



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS DEL AGUA A
TRAVÉS DE SU BIOSORCIÓN SOBRE FIBRAS
VEGETALES EMPACADAS EN UN FILTRO**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS NATURALES

P R E S E N T A

M. EN B. ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

DIRECTORES DE TESIS

DRA. PATRICIA MUSSALI GALANTE

DRA. FRANCISCA MÓNICA CALERO DE HOCES

CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE, 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DRA. PATRICIA MUSSALI GALANTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

PATRICIA MUSSALI GALANTE | Fecha:2020-11-16 13:55:31 | Firmante

HTyQXaFdK7N26OHVmlLHk+1A88JtjyPW6lGFVtWNIftPIM+SmJyAz+3ZXOquT4Nqmq08pBsa+tS/QUw0F/ayYklmT69JApfUSdm32hRSkA2fPlwfJb8OsKe55/I3QbNmXV1inSU NmGUC1JdQ01Ps0lkHufsm01FsDPX4ZxhJ/s1KbHzXxp9RgvrTc7ZXxdhxMRBr2FkcJBqSgv5dREbsVHaRjBI03A/p1AwwDUq/Qtp7kyyz2ufZ7p9QtV6NhgFKKnHokvf9q5QmunY czYJc1pdN+U2kSBI41xisktgI0BNzppgKD2ky2Jak2pxF7kakYuxlmm8Y+WbrnW37EMnIFQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



pdGbsK

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/m66eSGc8ARd2ElyFKyRVe4wAyETGehdu>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DRA. FRANCISCA MÓNICA CALERO DE HOCES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FRANCISCA MÓNICA CALERO DE HOCES | Fecha:2020-11-28 09:57:55 | Firmante

ncUiykZealMHgpFdCTsdPpoXASTapQeo6absAvXFBXfB1XV64VKMQNQJivChATM8DHfS5DyGBYnByffDDmEviRoEk9EfFicslhaVHDivN8A9Kdw84WQ6ECTjrJteeYEIeB56eFGeStJrb69q3zWbo1gCLTSB1ScKRi6WcSqD3sKYghDErMSn1trZYwdZM3I5/u80EYajptzk9Rhn3mLt4AeqCbSFOLj3rRQWo2mAPIExDW5rCn20mZeUF0vrKevrDnCecuaJ0WFS+upgFVfdJtqvUW2qWAoAOK4dRU0/YpaLvljFy7w3ZnJVgltuZPYeoQkPKUHzluGVNpcd3GfQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



IsWx1X

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/UFqZb19Uj5S50X6Eg4nqPB3qLOtqA53G>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DR. ALEXIS JOAVANY RODRÍGUEZ SOLÍS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALEXIS JOAVANY RODRIGUEZ SOLIS | Fecha:2020-11-26 13:07:38 | Firmante

tBNqvsdOirtLKQmuYdj7wrW4HeTIRu1IVJHQ+9mhcgCho3e9G8D9AHcXrtKhFTIXmJbxRlp53nCmhLUfUCdVePMtagxuH4DE5gh8FeXd2gyfrdhWR66ls8IG4iE5Ag6gL6Y2lpUvPEXfDIAnadBmahqKLQToUkqCO4mDPTxqp1e62i0UeL4uczklitneoK96iilPBVKbKW/WrkPSApaxgWRDmU/QDgNTwQubAW37PH0JBJ93jWdgn1RnwMltxfMU4x7PxRBr+gHrTjV2qeB05EohbM0/R+4foy6XJr8UkZTrFpAckBr9Q8NbQrrb7wAUu2yL7KChsj5vRj1G2jDp/Bg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



s2RcQP

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/4yDXmhNiCcgag0aK5RATuBNr0PwDgUW>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2020-11-16 12:55:52 | Firmante

g7sSARABtnMtlf5iZ3vNNiKOhRE96IE9CPYFrfzNI4nWTFx82uqCqaBamTLevQXkwE+jFhjWUauYE7bEkFqqfOEow1BmG5tW4l0z14/XjL0liZw42IXqqAE1gldra0F0tv8WaXEXifHa440xHWbp6LdVRGaPCf9UK/2OaQcvGqQ5dWDJZn/I2C4k/nQbt9m9zMIzFqkXXCkYbYkt7L9uV3+nU3AxjabMxIYz1HZISYdaEJSStm15YDQ9luPcjAPLz16xhYyHy5bsv1ypWPkB9Dq5zVgumHI4kGpNtbSr2WY7tJggj1Q0Dkb31D7tYUZXXAn7yLgCO3O0qCPb7Cb+g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



8firxM

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/fQooaaUbCmptKdVzckjQ3FjLghdhDc6g>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DR. EFRAÍN TOVAR SÁNCHEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

EFRAIN TOVAR SANCHEZ | Fecha:2020-11-16 13:39:17 | Firmante

J/pSf8bZVnKnoB6eZzxILa/ulL4LFRZiZipNlqpJ2azdafzWf6ffXSQBULQ65riX0iYx7zn5xADVDGxGSeYKIRKFN860pwL5b4n9n0tNYP7ZTdBOL5+d730swNhw+wnuBGxz5XmcWjlCQ7ZTTXfmsyjo2pH0AfU4JhRk4qv0n8jc9yskRxcjWyP7jSf+7tuVlsfumfVTxSXkmREcOUCm5ZTb1fT+FLY2+Plpc5XILZH4P4rmfEWwjtXFHsdIISXkuKup1WOupfnxXH+s0QR3CM4iFXg7wWjj6HhMuBCtAWqOnRXCxYLvseicP/CEzLf8V8CvuEgZ26cE49ASw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



C2sjHG

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/oQLiYNbP2OGA4aCd1M6eBQBo5tq2zYyW>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DR. ALEXANDRE TOSHIRRICO CARDOSO TAKETA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALEXANDRE TOSHIRRICO CARDOSO TAKETA | Fecha:2020-11-15 22:51:11 | Firmante

N8S4Ku3s1JftBuPBGA9uqYEctJa5taRZTQp6kR/EHWL5OIZgX85wTvoigJchkliwJ6Xi0fy55qZhz0pjC8Qdjul9dx5MphQ7YlufkvRC2RhrNG18BL4gg2hzz2CNXG3HNZ2e72qirxygr
NwlGPkoFaHQzM1XSUY2KLNtdTJ8lAxpnmuHQHjc9kAoPW47g7Yhh8pWIY/kQR5VwJopdUXUY1bArOCuSxvLhWKeTEOu7ezNaDZkGl/g3vZbBGFtp0hEtFoa8hZiGzm4ZgomQ
O6Jmcyz8ReH26Dpb4HnT55PgoWU5iicGTABgJ/u9oHdVQquVamgeXTMTdJL3zcjiJJPg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



q5v0EX

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ozyv6jtoZspe70IHGEmrydVR4eTnpYj1>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales



Cuernavaca, Morelos a 13 de noviembre del 2020.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dra. Patricia Mussali Galante (Tutor principal CEIB UAEM)

Dra. Francisca Mónica Calero de Hoces (Co tutor Universidad de Granada, España)

Dr. Alexis Joavany Rodríguez Solís (CEIB UAEM)

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña (CIQ UAEM)

Dr. Efraín Tovar Sánchez (CIByC UAEM)

Dr. Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa (CEIB UAEM)

Dra. Luz de María Breton Deval (IBT UNAM)

Tesis: Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro.

Alumno que lo presenta a revisión: ANA KAREN IVANNA FLORES TRUJILLO

Programa: DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

VOTO

El documento ha sido revisado y reúne los requisitos para editarse como TESIS por lo que es

APROBADO

ATENTAMENTE

DRA. LUZ DE MARÍA BRETON DEVAL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

LUZ DE MARIA BRETON DEVAL | Fecha:2020-11-21 10:44:57 | Firmante

bCdcY+BSDReqmufqTwVhI0pK+326aShKwS6Jk8uRr02ovPVpnK+X/+Hm7cREP2zCo3DpnKMqKsQhtumxG2tHhpig5225n66vH+Mch730MNb/AS20NaEXpguSS8LbGo/TDlrPc
DOJHzJXu3TCH2cVb3TZ5iCdCwfMUDNnPRy4CfWS71+VX9hotza4YKjaxlFSV73wJQMOOb+el5EQyP/PdSp+Eljd4/ZE6L1qg1+JaaTaBupbXX9Fv3zgemn9/8WEFtnTXrYYAE+7
10ECf7P80XZpiChOtCgod7QkF540+S/NAzfYxa5uLbUpmRb/qfh0pj2WrVkhFuG1JI01rZj8w==

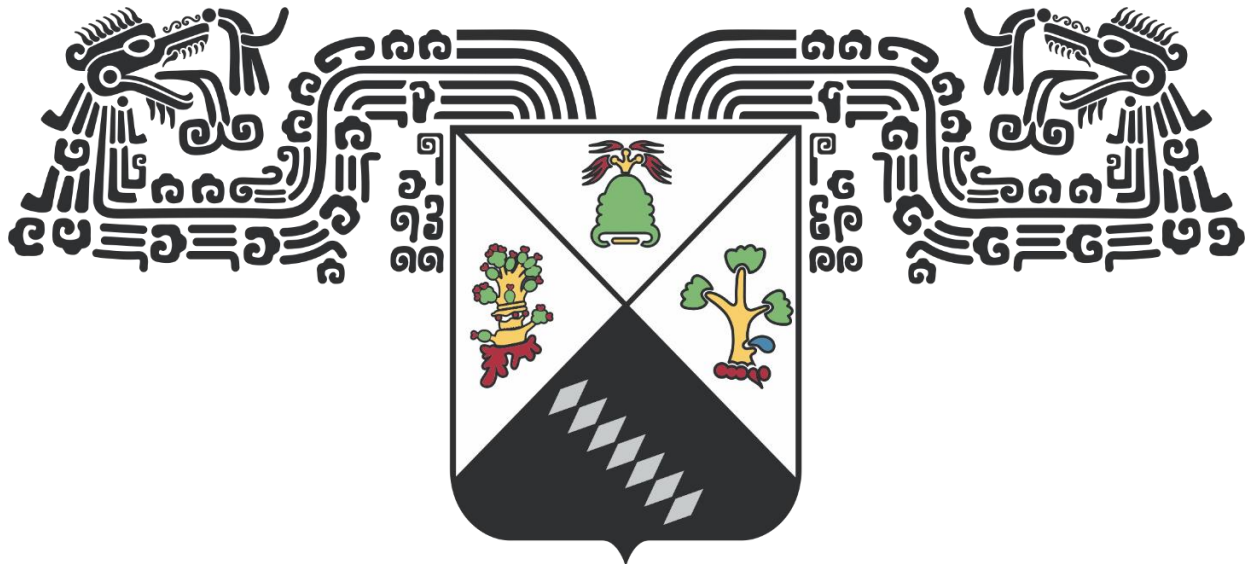
Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



5NtPVq

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/6gWvEnGLToFpjDX62zVmnJgmiqR71Xmd>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

La presente **TESIS** fue realizada en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LIA) perteneciente al Centro de Investigación en Biotecnología (CEIB) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (**UAEM**), ubicado en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) al otorgar la beca N°**592589**, para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de ver otro logro realizado. Gracias por tantas bendiciones.

*A mi abuelo **Fco. Javier Flores Vallejo**, por haberme apoyado tantos años y creer en mí. A pesar de que ya no estás conmigo, sé que estarías feliz de ver esto (te llevo siempre en mi corazón) y a mi abuela **Ma. de los Ángeles Trujillo Reyes**, por todo tu apoyo siempre, por cuidarme y quererme tanto ... los amo muchísimo y siempre serán mis padres.*

*A mi madre **Norma Angélica Flores Trujillo** por quererme tanto, darme siempre tu apoyo, creer y confiar en mí. Todo te lo debo a ti. Te amo.*

*A mi hermana **Karla Daniela Flores Trujillo** a quien amo con todo el corazón y la cual alegra mis días. Gracias por tu apoyo y gracias también a **Alan García** por siempre estar ustedes para mí.*

*A mis tíos **Javier, Jesús, Reyna, Rosario, Enrique y Héctor^t** y a mis primos **Héctor, Enrique, Mariana, Pablo e Iker**. Gracias por siempre estar contigo, apoyándome e impulsándome a seguir adelante.*

AGRADECIMIENTOS

A mi **Comité Tutorial** por su valioso tiempo y sugerencias para realizar este proyecto

A la **Dra. Patricia Mussali**, por permitirme cerrar este ciclo con su ayuda. Gracias por las oportunidades brindadas, sugerencias, entusiasmo, por creer en mí, por estar al pendiente de mi proyecto, impulsándome a seguir adelante, por ser una excelente persona, profesional y directora, en verdad le agradezco mucho todo lo que me ha apoyado. Muchísimas gracias por todo.

A la **Dra. Mónica Calero**, por recibirme en su grupo de trabajo y que a pesar de la distancia siempre estuvo al pendiente del trabajo, por sus sugerencias y ayuda. Gracias por permitirme en todo este tiempo seguir aprendiendo de ti. Mi más sincero agradecimiento y gratitud.

Al **Dr. Alexis Rodríguez**, por apoyarme en todo momento, por su paciencia cuando no entendía algo, estar al pendiente de mi trabajo y ayudarme cuando era necesario a resolver mis dudas. Muchísimas gracias por todo.

Al **Dr. Hugo Saldarriaga**, por todas sus atenciones hacia mi persona y hacia el proyecto, por estar siempre al pendiente y resolver mis dudas siempre que era necesario. Muchas gracias por su amabilidad y buen trato.

Al **Dr. Efraín Tovar**, por siempre estar al pendiente de mi trabajo y por su interés en el mismo. Por todas las oportunidades que me ha brindado, por su profesionalismo y por apoyarme. Muchísimas gracias por todo.

Al **Dr. Alexandre Cardoso**, por su interés en el proyecto, por las atenciones prestadas y tomarse el tiempo para hacerme sus sugerencias.

A la **Dra. Luz Breton**, a quien le agradezco sus atenciones, el tomarse el tiempo para leer mi proyecto y hacerme las sugerencias necesarias para que el trabajo estuviera mejor redactado.

Por último, quiero agradecer a la **Dra. Ma Laura Ortiz**, quien ha sido parte muy importante de mi formación académica, fungió como mi Tutora hasta que se lo permitieron y siempre estuvo al pendiente de mi proyecto y de mi formación. Muchas gracias por permitirme desde un inicio trabajar con Usted, por sugerirme este proyecto, estar al pendiente, ayudarme y apoyarme en todo momento. Por ser una excelente persona. Muchísimas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LIA) perteneciente al Centro de Investigación en Biotecnología (CEIB) adscrito a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, por recibirme como un miembro más, así como las facilidades otorgadas durante el doctorado y el desarrollo de este proyecto.

A la Dra. Luisa Castrejón por su amistad, consejos, apoyo y entusiasmo, por alentarme a seguir adelante. Muchas gracias por tu amistad.

A la Dra. Isela y a la Biol. Leticia Peña por su apoyo, orientación y enseñanzas respecto a las cuestiones del proyecto cuando lo requerí.

A mis compañeros Janeth, Marcos, Juan, Cinthya, Damaris, Alexis, Ana, Anaid, Miguel, Joel y Miguel Ángel, por el apoyo que recibí al realizar mis experimentos.

A los chicos de Servicio Social que me apoyaron durante todo este tiempo: Ana, Mabel, Emmanuel, Luis, Johan, Alejandra, Victoria y Cristian gracias por su apoyo y entusiasmo en querer aprender.

Al Grupo de “Concentración de sólidos y Biorrecuperación (RNM 152)” del Departamento de Química perteneciente a la Universidad de Granada, España, por todas las facilidades prestadas para realizar mi estancia de investigación y desarrollar parte de este proyecto.

Al Dr. Gabriel Blázquez y a la Dra. Ma. Ángeles Martín, por todas las atenciones prestadas durante mi estancia, por su paciencia al explicarme las dudas que tenía sobre los experimentos y mis resultados; además del buen trato brindado. Muchas gracias.

A mis ahora amigos que me acompañaron durante mi estancia en Granada: Verónica, Lucia, José y Pedro, quienes hicieron más ameno mi trabajo, además de que me ayudaban explicándome sobre mis experimentos. Muchas gracias chicos.

AGRADECIMIENTOS

Al M. en C. Enrique Sánchez Salinas, que fue la persona con la que inicié mi trabajo en la licenciatura y el cual me motivo a seguir adelante. Muchas gracias Maestro por sus aportaciones y entusiasmo que siempre mostró en mi trabajo, por impulsarme a seguir adelante. Gracias por su amistad y ser una excelente persona y profesional.

A mi amiga por siempre Ariana Arteaga, gracias por estar para mí cuando lo necesito, por apoyarme y animarme cuando me sentía estresada, por levantarme temprano para ir al laboratorio porque me regañaba jajaja, por ser una hermana para mí. Muchísimas gracias por tu amistad.

A mis amiguis y mosqueteros Janeth Esteves y Marcos Rosas, por los momentos compartidos en el laboratorio, las situaciones de estrés, ansiedad, enojo, melancolía que sentíamos por nuestros proyectos. Por siempre apoyarme. Muchas gracias por su amistad.

A mis amigos Jasiel, Yitzel, Marisol, Rocío, Victoria, Uriel, Aaron, César, Karime y Lunetón (donde quiera que esté) por ayudarme siempre, por sacarme siempre una sonrisa con sus bromas. Gracias chicos por su amistad.

A todas las personas que en algún momento contribuyeron de alguna forma a mi trabajo... mil gracias.

CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	5
Minería.....	5
Clasificación de la minería	6
Clasificación de minerales.....	7
Metales Pesados.....	8
Zinc	8
Plomo	9
Cadmio.....	9
Cobre	9
Hierro.....	10
Arsénico.....	10
Manganeso.....	11
Problemática ambiental de los Metales Pesados	11
Daños a la salud humana por exposición a metales pesados.....	11
Daños al ambiente por metales pesados	14
Métodos de remoción de Metales	17
ANTECEDENTES.....	21
JUSTIFICACIÓN.....	25
HIPÓTESIS	27
OBJETIVO GENERAL	27
LITERATURA CONSULTADA	28
CAPITULO 1	37
CAPITULO 2.....	57
CAPITULO 3	92
CONCLUSIONES GENERALES.....	133
PERSPECTIVAS	135
ANEXO 1	136
ANEXO 2	137
ANEXO 3	140
ANEXO 4	143

Flores-Trujillo A.K.I. 2020. Eliminación de metales pesados del agua a través de su biosorción sobre fibras vegetales empacadas en un filtro. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias Naturales, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.

RESUMEN

La contaminación del agua por metales pesados es un problema de relevancia mundial, ya que estos contaminantes afectan al ambiente y a la salud humana. Existen diferentes tratamientos para su eliminación del agua, entre los cuales se encuentran los tratamientos biológicos, como el proceso de biosorción, que es la eliminación de metales pesados utilizando biomasa vivo o inerte. *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* son especies de plantas que cuenta con amplia distribución en México. Las fibras de estas plantas pueden ser utilizadas como alternativa para la eliminación de metales pesados del agua, mediante un proceso de biosorción. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de estas fibras para ser empleadas en el diseño de una columna para la remoción de metales pesados del agua. En primera instancia, se les realizó la caracterización de ambas fibras por medio de un análisis de microscopía electrónica de barrido (FE-SEM), además de un análisis IR y análisis elemental. Estos análisis mostraron diferencias estructurales entre ambas fibras: los principales elementos químicos que las componen son el carbono y el oxígeno, además de otros elementos, lo que permite la presencia de grupos funcionales como hidróxido, carboxilo y carbonilo, entre otros. Posteriormente, para determinar la capacidad de las fibras para la eliminación de metales pesados del agua, se realizaron experimentos de adsorción por lotes, utilizando diferentes tamaños de partícula. Las fibras de *O. fuliginosa*, con un tamaño de partícula de <0.297 mm, eliminaron el 90% de Fe, seguido por Cu, Cr y Mn; mientras que las fibras de *A. angustifolia*, en tamaño 0.85 mm, lograron remover hasta un 85% el Mn, seguido por Cu, Cr y Fe. Para conocer la forma en la que los metales son adsorbidos por ambas fibras se realizaron isotermas de adsorción. Según el análisis de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich, *O. fuliginosa* absorbe metales pesados en forma de multicapa, mientras que *A. Angustifolia* las absorbe por ambos mecanismos monocapa y multicapa. Posteriormente, se realizaron experimentos en un sistema en continuo para poder conocer el comportamiento de las fibras empacadas en una columna con un flujo constante; se realizaron curvas de ruptura basadas en un diseño experimental que constó de tres parámetros en dos diferentes niveles (concentración de 50 ppm y 100 ppm, caudal de 2 mL/min y 4 mL/min y cantidad de biosorbente 1g y 2g), esto con la finalidad de conocer los factores que influyen en la capacidad de biosorción y el porcentaje de metal retenido. De acuerdo con los datos obtenidos se pudo visualizar que la retención de metales se ve favorecida al aumentar la cantidad de biosorbente, contrario a los factores de caudal y concentración, los cuales al aumentarse disminuyen la remoción del metal evaluado. Además, los datos fueron ajustados a cuatro modelos matemáticos (Adam-Bohart, Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-Respuesta) dando como resultado que las fibras de *O. fuliginosa* son las que mejor se ajustaron a los modelos.

Flores-Trujillo A.K.I. 2020. Removal of heavy metals through their biosorption on vegetable fibers packed in a filter. Doctoral thesis. Natural Sciences PhD, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Mexico.

ABSTRACT

Water pollution by heavy metals is a global relevance problem since these pollutants affect the environment and human health. There are different treatments for its removal from water. Biological treatments are among them, such as the biosorption process, which removes heavy metals using living or inert biological material. *Opuntia fuliginosa* and *Agave angustifolia* are plant species that have a wide distribution in Mexico. These plants' fibers can be used as an alternative for removing heavy metals from water through a biosorption process. The objective of this work was to evaluate the potential of these fibers to be used in the design of a column for the removal of heavy metals from water. In the first instance, the characterization of both fibers was carried out through an FE-SEM analysis, in addition to an IR analysis and elemental analysis. These analyzes showed structural differences between both fibers: the main chemical elements that compose them are carbon and oxygen and other elements, which allows the presence of functional groups such as hydroxyl, carboxyl, and carbonyl, among others. Subsequently, to determine the fibers' capacity to remove heavy metals from the water, batch adsorption experiments were performed using different particle sizes. The fibers of *O. fuliginosa*, with a particle size of <0.297 mm, eliminated 90% of Fe, followed by Cu, Cr, and Mn; while the fibers of *A. angustifolia* in size 0.85 mm, managed to remove up to 85% of Mn, followed by Cu, Cr, and Fe. To know the mechanism by both fibers, adsorb metals, adsorption isotherms were performed. According to the adsorption isotherms analysis by Langmuir and Freundlich, *O. fuliginosa* absorbs heavy metals in a multilayer form, while *A. angustifolia* absorbs them by both monolayer and multilayer mechanisms. Subsequently, experiments were carried out in a continuous system to know the behavior of the fibers packed in a column at a constant flow. Breakdown curves were made based on an experimental design that consisted of three parameters at two different levels (concentration of 50 ppm and 100 ppm, flow rate of 2 mL/min and 4 mL/min, and amount of biosorbent 1g and 2g), this to evaluate the factors that influence the biosorption capacity and the percentage of metal retained. According to the data obtained, it was possible to visualize that the retention of metals is favored by increasing the amount of biosorbent, contrary to the flow and concentration factors, which, when increasing the evaluated metal's removal, decreases. The data were fitted to four mathematical models (Adam-Bohart, Yoon-Nelson, Thomas, and Dose-Response), resulting in the *O. fuliginosa* fibers that best fit the models.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los niveles de contaminación de los cuerpos acuíferos han sido objeto de preocupación por gran parte de la población, debido al continuo deterioro de las aguas (Lim & Aris, 2014). Particularmente la contaminación del agua por metales pesados representa un grave peligro para la salud humana y para el ambiente, con efectos en todos los niveles de la organización biológica (Tovar-Sánchez *et al.*, 2012), ya que estos elementos a menudo se encuentran en concentraciones por encima de los límites permisibles (Erry *et al.*, 2000). Una de las actividades que generan residuos ricos en metales pesados, es la minería.

En el estado de Morelos durante varias décadas se realizaron actividades de extracción de minerales metálicos, a partir de las cuales se generaron residuos sólidos denominados jales (jales, del náhuatl “xalli”, arenas finas), que fueron depositados en espacios aledaños. Estos jales contienen generalmente sulfuros metálicos residuales que son fuente principal de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) o bien conocidos como metales pesados (Mussali-Galante, 2013).

Un ejemplo de este tipo de contaminación es el caso del poblado de Huautla, municipio de Tlaquiltenango. En dicha zona se localizan tres jales localizados a 500 metros del pueblo de Huautla. Estos residuos mineros se encuentran a la intemperie y al borde de arroyos que desembocan en el Rio Amacuzac (Mussali-Galante *et al.*, 2013). Dichos jales suman 780,000 toneladas con altas concentraciones de Pb, Cd, As, Zn y Cu (Tovar Sánchez *et al.*, 2016). Estos residuos constituyen un peligro para los pobladores que se abastecen del agua proveniente de corrientes que atraviesan los jales mineros, además del agua de bebida obtenida de un cuerpo de agua que se origina al interior de una mina abandonada.

Una alternativa para abatir los problemas de salud causados por los metales en el agua es removerlos a través de tecnologías eficientes y de bajo costo. Los tratamientos que son utilizados para remover dichos contaminantes del agua en general son de tipo químico, que en muchos de los casos pueden provocar impactos negativos al ambiente, por lo que las alternativas de biorremediación representan una estrategia para la purificación de los cuerpos de agua contaminados por metales pesados.

Un método utilizado para la remoción de dichos contaminantes es la biosorción, la cual se basa en la captación de iones metálicos por diferentes tipos de biomasa (biosorbentes), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico. Dentro de las ventajas que ofrece este tipo de métodos, es que hacen uso de materiales de alta disponibilidad y de bajo costo, tiene alta selectividad a metales específicos, actúa bajo un amplio rango de condiciones fisicoquímicas (Villanueva, 2006), hay una gran reducción en el volumen de residuos peligrosos y una gran capacidad de adsorción de diferentes metales pesados y sus mezclas, comparativamente con los adsorbentes comerciales. Dentro de los biosorbentes más utilizados se encuentran los microorganismos como bacterias y cianobacterias, además de diversas especies de plantas y residuos agrícolas (Bilal *et al.*, 2013 y Sud *et al.*, 2008).

Es por esta razón que la elaboración de una columna empacada con fibras naturales contribuiría a brindar una solución a la problemática de contaminación de agua que enfrenta esta comunidad.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Minería

México es un país con una cantidad abundante de recursos minerales. La minería es una actividad dedicada a la extracción y producción de diferentes minerales para distintos fines. Su importancia radica en que contribuye con el 4.9% del Producto Interno Bruto (PIB) a nivel nacional según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el 2010.

Entre los yacimientos que más se han explotado son los epitermales (aquellos en los que la mineralización ocurrió de 1-2 Km de profundidad desde la superficie y se depositó a temperaturas de entre 50 y 200°C), los de metasomatismo de contacto o skarn (cuya mineralización ocurre a profundidades intermedias y se encuentran temperaturas entre los 200-500°C a una presión alta) y los hipotermales (su mineralización ocurre a grandes profundidades y tienen una temperatura que oscila entre los 300-500°C a una presión muy alta). En estos tipos de yacimientos se encuentran minerales que son tanto económicos, como no económicos, y con el fin de separarlos se utilizan diversos procesos físicos y químicos (Romero y Ruíz, 2010; SGM, 2014).

Los suelos mineros son por lo general suelos jóvenes que se caracterizan por su inestabilidad y baja cohesión. La extracción de minerales metálicos causa un problema complejo, ya que se presenta, por lo general, una contaminación multielemental (Vega *et al.*, 2004).

Las actividades mineras son consideradas una de las principales fuentes de contaminación ambiental; debido a que los elementos que se encuentran asociados a los yacimientos de oro (Au) y plata (Ag) normalmente son acompañados por arsénico (As), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Romero, 2011).

Esta actividad conlleva a la generación de residuos de granulometría fina llamados jales mineros, estos se generan en el proceso de concentración de minerales de plata, plomo, zinc, entre otros; estos residuos contienen sulfuros metálicos residuales, que son fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT's). Uno de los principales problemas

ambientales asociado a los jales mineros es la dispersión de estos contaminantes hacia el entorno, ya que al oxidarse los EPT's pueden convertirse en un serio problema al contaminar suelos, cuerpos de agua, vegetación y aire. Para que la oxidación de los EPT's ocurra es necesario que contengan elementos reactivos y condiciones climáticas adecuadas, por lo que este proceso es muy limitado, ya que generalmente ocurre a lo largo del tiempo (Romero & Gutiérrez, 2010; Romero *et al.*, 2008).

Actualmente no existe una estimación de la cantidad de jales distribuidos en México, sin embargo, se tienen indicios de que existen poco más de 80 sitios de almacenamiento en operación activos (Ramírez, 2001). Ante esta problemática, no se conoce el número y situación actual de las presas de jales inactivas abandonadas. Se sabe que en muchos lugares estos residuos fueron depositados en los alrededores de las minas en sitios expuestos sin tomar en cuenta medidas de protección ambiental, convirtiéndose en un foco de contaminación potencial para la región en donde se encuentren (Hernández-Plata *et al.*, 2020; Tovar-Sánchez *et al.*, 2016; Acosta-Saavedra *et al.*, 2011).

Clasificación de la minería

La minería se clasifica de acuerdo con el lugar en donde se esté llevando a cabo el proceso, en donde tres tipos de minería son los más comunes (SGM, 2020):

- **Minería a cielo abierto.** También llamado minado superficial, su excavación se realiza en la superficie del terreno y es empleada para la extracción de minerales a profundidades menores de 160 m.
- **Minería subterránea.** En este tipo de minería se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.
- **Minería por métodos especiales.** En donde se emplea técnicas en las que no es necesario penetrar físicamente el yacimiento para la extracción. Ejemplo de ello es el proceso Frasch y lixiviación.

Clasificación de minerales

La clasificación de los productos que se obtienen de la minería se realiza con base a sus características físico-químicas (INEGI, 2010):

- I. **Energéticos.** En esta clasificación se encuentran los minerales que permiten liberar energía a partir de ellos como son:
 - Hidrocarburos: En México, cerca de 88% de la energía que se consume proviene del petróleo. Es la principal fuente de insumos que permite producir combustibles para diferentes actividades, así como para generación de energía eléctrica.
 - Carbono térmico: Se utiliza como combustible en centrales carboeléctricas; y generan 5.2% de la electricidad que se consume en México.
- II. **No metales.** Estos minerales son considerados dentro de esta clasificación debido a que no poseen brillo propio ni conducen electricidad. Dentro de este grupo se encuentran: azufre, barita, fluorita, celestita, dolomita, fosforita, grafito, yeso, sulfato de magnesio, sulfato de sodio, entre otros.
- III. **Metales.** Dichos minerales son nombrados así debido a que presentan brillo propio y son buenos conductores de calor y electricidad. Los más comunes en México son: oro, plata, cobre, zinc, hierro y plomo,. En su estado natural se encuentran mezclados unos con otros y, para poder separarlos, se hace uso de procedimientos químicos y mecánicos.

Los minerales metálicos, según sus características y usos, pueden ser (INEGI, 2010; BioEnciclopedia, 2014):

- Metales preciosos: son aquellos con un alto valor económico ya que son escasos en la naturaleza. Entre ellos se encuentra el oro, el cual es muy utilizado en joyería; otros ejemplos son el platino, paladio y osmio.
- Metales industriales no ferrosos: son la materia prima para la industria de la transformación. Entre los más extraídos en México se encuentra el cobre, plomo y zinc.

- Metales siderúrgicos: son aquellos que se utilizan como materia prima en la industria siderúrgica. Entre los más importantes se encuentra el carbón, hierro y manganeso.

Metales Pesados

Los metales pesados se pueden encontrar en el ambiente de manera natural y antropogénica. De manera natural se puede encontrar por el desgaste mineral y por la actividad volcánica; mientras que de manera antropogénica se generan por diferentes medios como es la minería, fundición, galvanoplastia, por el uso de pesticidas y fertilizantes, deposición atmosférica, entre otros (Ali *et al.*, 2013).

Debido a su rol en sistemas biológicos se pueden clasificar en esenciales y no esenciales. Los metales pesados esenciales son aquellos que los organismos necesitan, en pequeñas cantidades, para realizar procesos fisiológicos y funciones bioquímicas, entre los que se encuentran el Fe, Zn, Mn, Cu y Ni. El otro tipo de metales llamados no esenciales son aquellos que los organismos no necesitan para sobrevivir ni para realizar sus funciones vitales (fisiológicas y bioquímicas); ejemplo de ellos son Cd, Pb, Cr, As y Hg (Ali *et al.*, 2013).

La distribución de los metales pesados en el ambiente ocurre generalmente por las propiedades de los metales y la influencia de diversos factores ambientales. De los 92 metales que se encuentran de manera natural, 30 de ellos son potencialmente tóxicos para el ser humano. Los metales pesados son llamados así porque su densidad es por lo menos cinco veces mayor a la del agua, además de que comparten algunas características comunes entre ellos, como el que su peso molecular sea mayor a 40.04 g/mol, y en bajas concentraciones ocasionen daños en la salud y el ambiente (Morais *et al.*, 2012).

Zinc

Este es un metal de transición, con símbolo Zn y se puede encontrar normalmente en forma sólida, tiene un aspecto azul grisáceo pálido, es ubicado en el grupo 12, en el periodo 4, su número atómico es 30. Posee un punto de fusión de 420.53°C, un punto de ebullición de 907.85°C, una masa atómica de 65.41 g/mol, densidad de 7.14 g/cm³ y su estado de oxidación es +2 (PRTR, 2016).

Este metal forma parte de la corteza terrestre, además de formar parte de minerales como la blenda, marmatita, entre otros. Dentro de las fuentes de emisoras de zinc se encuentran las actividades industriales mineras, la combustión de carbón, residuos y el procesado del acero (PRTR, 2016).

Plomo

Elemento metálico que se encuentra situado en el bloque p en el grupo 14 y periodo 6. De forma natural se puede encontrar en estado sólido y presenta un aspecto gris azulado. Su número atómico es 82 y su símbolo químico es Pb. Punto de fusión de 328.46°C, punto de ebullición de 1749.85 °C, masa atómica de 207.2 g/mol, densidad de 11.34 g/cm³, y valencias de +2 y +4 (PRTR, 2016).

Generalmente se encuentra presente en algunos minerales, ya que la mayoría de estos contienen al menos el 10% de este metal. La actividad que más genera este tipo de metal es la minería (PRTR, 2016).

Cadmio

Metal en transición que se encuentra situado en la tabla periódica en el bloque d, en el grupo 12 y periodo 5. Este elemento se encuentra en forma sólida y tiene un aspecto gris plateado. Cuenta con un peso atómico de 48, un punto de fusión de 322.07°C, un punto de ebullición de 768.85°C, masa atómica de 112.41 g/mol, densidad de 8.65 g/cm³ y su estado de oxidación es +2 (PRTR, 2016).

Este metal puede ser emitido de forma natural por la actividad volcánica, incendios naturales, descomposición de rocas, mientras que de manera antrópica se emite por la quema de combustibles fósiles y por los residuos industriales y urbanos (PRTR, 2016).

Cobre

Es un elemento de transición perteneciente al bloque d, se ubica en el grupo 11 y el periodo 4. Presenta un aspecto metálico, rojizo, además de que se puede encontrar en forma sólida. Cuenta con un número atómico de 29, su simbología es Cu, punto de fusión es de

1085.62°C, punto de ebullición de 2927.85 °C, masa atómica de 63.54 g/mol, densidad de 8.96 g/cm³ y estados de oxidación +1 y +2 (PRTR, 2016).

Puede ser liberado de forma natural por tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos. Mientras que de forma antropogénica puede emitirse por la industria minera, metalúrgica, la producción de madera y de fertilizantes fosfatados (PRTR, 2016).

Hierro

Es otro de los metales de transición que se localiza en el bloque d, grupo 8 y periodo 4; tiene un aspecto metálico brillante con un tono grisáceo y se encuentra de forma natural en estado sólido. Su peso atómico es 55.84, cuenta con un punto de fusión de 1,535°C, punto de ebullición de 2750.85°C, su masa atómica es de 55.84 g/mol, densidad de 7.87 g/cm³ y estados de oxidación +2 y +3 (PRTR, 2016).

Es el metal más abundante en la corteza terrestre, además de que forma parte de numerosos minerales. Una de las actividades antropogénicas que mayor producción de este elemento es la minería ya que se obtiene a partir de los óxidos de minerales como la pirita, siderita etc., (PRTR, 2016).

Arsénico

Es uno de los elementos conocidos como metaloides, ya que presenta propiedades intermedias entre metales y no metales, se ubica en el periodo 4, en el grupo 15; puede encontrarse de forma sólida y presenta un aspecto gris metálico. Algunas de sus características químicas son: su número atómico es 33, punto de fusión de 614.85°C, punto de ebullición de 817.85°C y su símbolo químico es As. Tiene una masa atómica de 74.92, densidad de 5.73 g/cm³ y sus números de oxidación son -3, +3, +5 (PRTR, 2016).

Puede encontrarse en suelos y diferentes minerales en pequeñas concentraciones. A nivel industrial es emitido por industrias productoras de cobre, plomo y zinc; además de que puede encontrarse en drenaje y lixiviados procedentes de la minería (PRTR, 2016).

Manganeso

Es un metal en transición que se encuentra en el bloque d, grupo 7 y periodo 4. De manera natural se puede encontrar en forma sólida, tiene un aspecto plateado. Dentro de sus características químicas se encuentra que posee un número atómico de 25, un punto de fusión de -272.15°C , un punto de ebullición de 1962.85°C , masa atómica de 54.93, densidad de 7.47 g/cm^3 y estados de oxidación de +2, +3, +4, +6 y +7.

Es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre, además de que su presencia es asociada a la del hierro. De manera natural se asocia a condiciones anaerobias y de microoxidación (BSVDE, 2003).

Problemática ambiental de los Metales Pesados

Algunos metales pesados forman parte de minerales esenciales para organismos aerobios y anaerobios, además de que su incremento es resultado de la continua actividad industrial y crecimiento tecnológico (Gavrilescu, 2004). La contaminación ocasionada por metales pesados ha conllevado a una serie de afectaciones no solo a los seres humanos sino al ambiente de manera general, ya que se conoce los efectos adversos que ocasionan en estos metales en el lugar que está contaminado por ellos. Los efectos tóxicos que se tienen en la salud y en el ambiente dependen en gran medida del tipo de metal que se encuentre y las concentraciones (que por lo general en elementos no esenciales no deben superar los 0.05 ppm). Algunos de estos elementos de gran preocupación en México son el arsénico, mercurio, el plomo y el cadmio (INECC, 2009).

Daños a la salud humana por exposición a metales pesados

Los metales pesados se encuentran de manera natural en algunas ocasiones presentes en el ambiente en bajas concentraciones, que con el paso del tiempo puede acumularse en grandes cantidades y puede resultar peligroso (Martin & Griswold, 2009). Existen diferentes estudios en donde se puede observar el daño ocasionado por diferentes metales pesados en agua y suelo, ya que las afecciones presentadas por los organismos que se encuentran habitando cerca de sitios expuestos a este tipo de contaminación se deben

principalmente a la ingesta (comida o bebida) o inhalación de este tipo de contaminantes. En la tabla 1, se enlistan algunos de los padecimientos originados por los metales pesados.

Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Madrid *et al.*, 2011, en una zona minera situada en la parte alta del río San Jorge en Córdoba, Colombia. En dicho territorio se realizan explotaciones de ferroníquel, carbón y oro; además de tenerse conocimiento de que en el lugar se está presentado daño genotóxico en dos especies de roedores asociados a componentes del carbón. En la investigación desarrollada se realizaron estudios de efectos genotóxicos en pobladores de la Cuenca del río San Jorge, específicamente de metales como Hg, Cd, Pb, Cu y Zn. En el análisis se determinó la frecuencia de aparición de micronúcleos para evaluar daño en DNA y lo reportado por los autores es que los metales como Cd, Pb, Cu y Zn no sobrepasaron los límites máximos permisibles establecidos por la EPA (3, 100, 1600 y 7000 µg/L respectivamente); mientras que Hg sobrepasó por lo menos 4 veces el LMP que es <5.8 µg/L. Así mismo se reportó la presencia de micronúcleos (1-8 micronúcleos), la cual asocian a la cantidad de Hg en sangre, sin embargo, también hay diversos factores que influyen como lo son excesiva contaminación crónica derivada de los vapores inhalados de mercurio, la ingesta de pescado contaminado, así como la presencia de otros metales pesados en agua.

Tabla 1. Principales padecimientos ocasionados por metales pesados (Flores-Trujillo, 2016; OMS, 2013; ATSDR, 2008; Nava-Ruiz & Méndez-Armenta, 2011).

METAL PESADO	PADECIMIENTOS
Plomo	Afecta sistema nervioso y cerebro. Provoca hipertensión arterial y lesiones renales. En embarazadas puede causar aborto natural, muerte fetal, parto prematuro, además de malformaciones.
Cadmio	Produce daño en pulmones, cerebro e hígado enfermedades renales, irritación grave del estómago, fragilidad en hueso, alteraciones nerviosas e incluso la muerte.
Arsénico	Causa enfermedades gastrointestinales y síndrome neurológico. Se almacena en riñón, hígado, corazón y pulmón, incluso se relaciona con distintos tipos de cáncer como el de hígado, riñón, pulmón, vesícula, vejiga, piel y próstata.
Zinc	Produce la enfermedad denominada “Fiebre de vapores de metal”, además de producir calambres estomacales, náuseas, vómitos, anemia, daño en páncreas, disminución del colesterol beneficioso en sangre, daño a riñón, pérdida de apetito, disminución del gusto y olfato, produce órganos sexuales mal desarrollados y crecimiento retardado en hombre jóvenes.
Manganeso	En altas concentraciones produce la enfermedad llamada “manganismo” que es una combinación de alteraciones en el sistema nervioso, además de falta de coordinación. A su vez, conlleva alteraciones en funciones motoras. En niños puede ocasionar daño en hígado.
Cobre	Irritación en nariz y garganta, daño permanente en riñones e hígado, trastornos digestivos que involucran náuseas, vómitos, diarreas y calambres estomacales. Puede acumularse en tejidos y causar la muerte.
Hierro	Concentraciones más altas a las necesitadas por nuestro cuerpo están asociadas con enfermedades neurodegenerativas como Parkinson o Alzheimer, hemocromatosis y enfermedad de Hallervorden-Spatz.

A nivel nacional, en particular en el estado de Morelos, se tiene la problemática de contaminación de agua por metales pesados. Tovar-Sánchez *et al.*, 2016, indican una situación similar al sur del estado, específicamente en el poblado de Huautla, perteneciente al municipio de Tlaquiltenango. En esta zona, durante el siglo XVI hasta 1992 se contó con actividad minera, especialmente de Zn, Pb, y Ag. En dicha área se estima hay alrededor de 780,000 toneladas de residuos ricos en Pb, Mn, y Cd, entre otros metales, ya que se tiene conocimiento de que existen residuos de Pb y As en la zona (2,298 y 139 mg/kg, respectivamente). Incluso hacen mención que los habitantes cuentan con una red de

distribución de agua que proviene desde la mina “Pájaro verde” hasta un tanque de almacenamiento de donde abastecen sus necesidades. Es por ello que se realizaron estudios en los que se tomaron muestras de sangre de habitantes y muestras agua en dicha región, con la finalidad de conocer si existe daño genotóxico asociado a este metal en habitantes provenientes de esta región. Los autores reportan concentraciones de arsénico de 0.240 µg/ml, en donde esta concentración supera los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua de bebida, incluso los niveles de este metal en sangre se encuentran alrededor de 60 µg/L. Por otra parte, se encontró un efecto genotóxico en los habitantes que se correlaciona con las concentraciones de As halladas en muestras de sangre.

Daños al ambiente por metales pesados

Los metales pesados en el ambiente no solo causan daños al ser humano sino de igual forma lo hace en el ambiente. Ejemplo de ello es la contaminación que ocurre en aguas superficiales o lugares, en donde la flora y fauna ha sido afectada por esta problemática. Algunos estudios relacionados al daño ocasionado por metales pesados en flora y fauna se muestran en la tabla 2.

Legislación en materia de contaminación de agua por Metales Pesados

En base a esta problemática se han estipulado diferentes normativas que llevan a la regulación de este tipo de contaminantes, como son las que emiten la Organización Mundial de la Salud (OMS), la agencia de Protección Ambiental (EPA) y algunas otras dependencias en México, las cuales se conocen como Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

Las NOM son un conjunto de regulaciones técnicas de vigilancia obligatoria expedidas por las dependencias de la Administración Pública Federal, en donde se establecen reglas, especificaciones, atributos, características o prescripciones aplicables a un producto, sistema, instalación, proceso, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, mercado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación (SEMARNAT, 2015).

Tabla 2. Ejemplos de especies vegetales y animales que sufren afectaciones por metales pesados.

Especie afectada	Lugar de estudio	Descripción y resultados	Referencia
<i>Nicotiana tabacum</i> var. <i>xanthi</i> <i>Solanum tuberosum</i> var. <i>Korela</i>	Suelo contaminado por metales pesados en Strimice y como control suelo de Jezeri al norte de República Checa	Se utilizaron plantas de tabaco y papa de un sitio conminado por Cd, Pb, Zn y Cu y se reportan una serie de daños como la inhibición de su crecimiento, hojas con malformaciones que pueden estar asociadas a una fragmentación del DNA.	Gichner <i>et al.</i> , 2006
<i>Apodemus flavicollis</i>	Área de dos acerías en Varsovia y Cracovia; teniendo como sitio control el bosque de Borecka en el norte de Polonia.	Se encontró daño en hígado, riñones y testículos resultado de altas concentraciones de plomo y cadmio del lugar en donde habitan. Además, se observó una disminución de glucógeno, fibrosis intersticial, aumento en el número de núcleos, necrosis en hepatocitos, atrofia de glomérulos, entre otras afecciones.	Damek-Propawa & Sawicka-Kapusta, 2003
<i>Crassostrea gigas</i>	Este estudio se realizó en cuatro granjas camaroneras y dos granjas de ostras en los estados de Sinaloa y Sonora.	Se encontraron en ostras concentraciones de 05.5-987.8 µg/g para Zn, 4.2-7.3 µg/g para Cd, 7.2-9.9 µg/g para Pb y 4.8-5.21 µg/g para Ni. Estos resultados sobrepasaron los LMP para estos metales. También se detectaron niveles de daño al DNA en los hemocitos de las ostras. Además, se observó una correlación positiva entre al daño genotóxico y el níquel.	Vázquez-Boucard <i>et al.</i> , 2014
<i>H. tigerinus</i> <i>L. smithi</i> <i>C. alticola</i> <i>Fejarvarya</i> sp. <i>S. leptoglossa</i> <i>E. cyanophlyctis</i>	Cuerpos de agua del Valle de Barak, Assam, India.	Se determinaron concentraciones de Cu y Pb en hígado, intestino y cola de renacuajos de las 6 especies. Los resultados mostraron que las concentraciones de Pb excedían el límite permisible señalado por la OMS (0.1 mg/L), impactando principalmente en la disminución de la población de anfibios, además de que hay una acumulación de estos metales en el cuerpo de los anfibios.	Singh <i>et al.</i> , 2016
<i>Meriones persicus</i>	Mina de hierro localizada en Sangan, al noroeste de Irán.	Se midieron concentraciones de Pb, Cu, Cd, Co, Cr, Fe, Mo, Ni, Sb y Zn en riñón, hígado y tejo muscular de los roedores. Dentro de los resultados se observaron diferencias entre los roedores jóvenes y adultos en cuanto a la bioacumulación, ya que los adultos presentaron concentraciones más altas de Cu y Cd; además, de que los machos tenían una mayor concentración de Zn en riñones y las hembras Fe en el hígado. Por último, reportan hiperemia, hemorragia, daño degenerativo en los túbulos de las células epiteliales, infiltración de leucocitos mononucleares fueron efectos encontrados en el tejido muscular de los roedores y lo asocian a la presencia de los metales pesados.	Shahsavari <i>et al.</i> , 2019
<i>Lupinus luteus</i>	Se utilizaron dos suelos diferentes. El primero contaminado con metales pesados de una fundidora de Zn y el segundo fue turba orgánica como control en Polonia.	Los metales evaluados fueron Cd, Pb, Zn, Ni y Ag. Los resultados muestran un aumento en los niveles de expresión de metalotioneínas en plantas cultivadas bajo estrés por metales pesados, además de que se observó bioacumulación de los metales en las hojas.	Jaskulak <i>et al.</i> , 2019

La Secretaria de Medio Ambiente y recursos Naturales (SEMARNAT) es la encargada de expedir las NOM vigentes en el sector Ambiental con la finalidad de establecer características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan y protejan el

cuidado del ambiente, así como promover la mejora de los Recursos Naturales. Las NOM vigentes se clasifican en 10 materias: Agua, contaminación por ruido, emisiones de fuentes fijas, emisiones de fuentes móviles, impacto ambiental, lodos y biosólidos, medición de concentraciones, metodologías, protección de flora y fauna, residuos y suelos (SEMARNAT, 2015). Se cuenta con NOM's que regulan las concentraciones de metales pesados en agua y suelo. Algunas de ellas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas que establecen diversos criterios sobre metales pesados en suelo y agua.

Norma Oficial Mexicana	
NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.
NOM-087-ECOL-SSA1-2002	Establece la clasificación de los residuos peligrosos biológico-infecciosos así como las especificaciones para su manejo.
NOM-127-SSA1-1994	Establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación.

A su vez existen diferentes normas internacionales y nacionales que establecen los límites máximos permisibles de diferentes metales pesados en agua de consumo humano, en donde las concentraciones permisibles varían según los criterios de cada una de ellas. En la tabla 4, se muestran las concentraciones establecidas en cada una de ellas.

Tabla 4. Comparación de Límites máximos permisibles de metales pesados en agua de consumo humano.

Metal pesado	NOM-127 SSA1-1994 (mg/L)	EPA (mg/L)	OMS (2004) (mg/L)
Plomo	0.01	0.01	0.01
Cadmio	0.005	0.003	0.003
Zinc	5.00	3.0	*
Arsénico	0.05	0.05	0.01
Cromo total	0.05	0.05	0.05
Manganeso	0.15	0.10	0.4
Hierro	0.30	0.20	*
Mercurio	0.001	0.001	0.006
Aluminio	0.20	0.20	**
Cobre	2.00	1.00	2.00

*No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes normalmente en el agua de bebida.

**No puede determinarse un valor de referencia basado en criterios de salud.

Métodos de remoción de Metales

En la actualidad existen distintos métodos para la remoción/eliminación de estos contaminantes en agua, que incluyen métodos químicos, físicos y biológicos. Entre los procesos comúnmente utilizados para tratar efluentes con metales pesados se encuentran: adsorción con carbón activado, intercambio iónico, extracción con solventes, micro/nano/ultrafiltración, ósmosis inversa y flotación no convencional (Cardona *et al.*, 2013).

A pesar de tener resultados eficientes durante la remoción de metales pesados en agua, los métodos químicos y físicos presentan algunas desventajas como son que la presencia de agentes orgánicos disminuya su rendimiento, su selectividad es media y en algunos casos se requiere de presiones muy altas para su funcionamiento, como es el caso de la ósmosis inversa (Reyes *et al.*, 2006).

Dentro de los métodos biológicos se encuentra la biorremediación, la cual incluye procesos como la fitorremediación, bioacumulación y biosorción, los cuales no presentan daños al ambiente, no producen contaminación secundaria y presentan bajos costos (Vijayaraghavan & Balasubramanian, 2015).

La biosorción es uno de los procesos más utilizados para biorremediación de metales pesados. Este término consiste en la unión pasiva de este tipo de contaminantes a biomasa viva o muerta a través de diferentes mecanismos fisicoquímicos, que es un proceso no controlado por el metabolismo (Sala *et al.*, 2010 y Vijayaraghavan & Balasubramanian, 2015).

Los dos mecanismos principales según Reyes *et al.*, (2006) son:

- **Bioacumulación:** Basada en la absorción de metales mediante los mecanismos de acumulación al interior de la biomasa vivas (Figura 1).

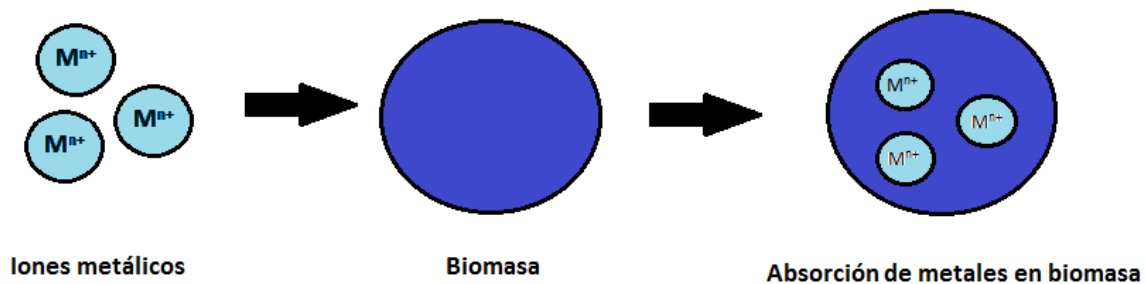


Figura 1. Mecanismo de bioacumulación de metales pesados (tomado de Reyes *et al.*, 2006).

- **Bioadsorción:** Basada en la adsorción de los iones en la superficie de la biomasa. El fenómeno puede ocurrir por precipitación, atracción electrostática o intercambio iónico (Figura 2).

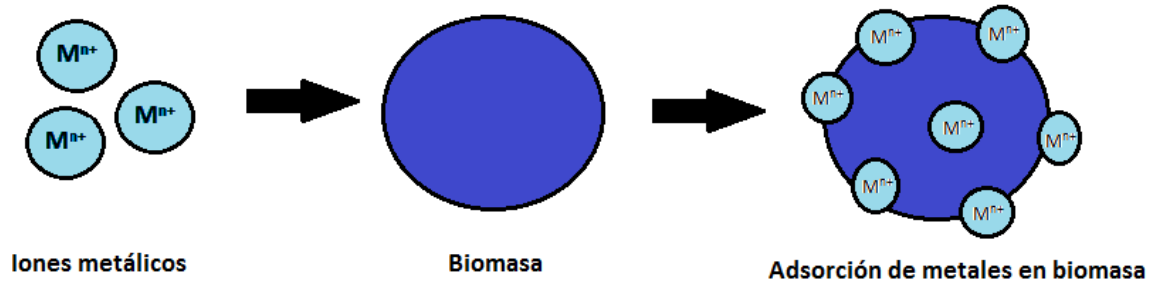


Figura 2. Mecanismo de bioadsorción de metales pesados; tomado de Reyes *et al.*, 2006.

Los materiales utilizados en este proceso actúan rápidamente por lo que el tiempo de contacto es corto, dando como resultado efluentes con bajo contenido de metales. En dicho proceso se han utilizado diversos materiales de origen biológico, como lo son las algas, hongos, caparazón de artrópodos, bacterias, restos de vegetales, entre otros; mismos que se encuentran en gran abundancia (Tabla 5). Los iones de metales pesados y metaloides se unen a los centros activos de biosorción del material biológico mediante la formación de complejos, quelatos, intercambio iónico, microprecipitación en la parte interna del material, principalmente (Iliná *et al.*, 2009).

Muchos de los microorganismos que se utilizan en varios procesos no son recomendables para el caso del proceso de la biosorción. En el caso de levaduras, estas células no resultan convenientes o viables debido a la falta de actividad metabólica que presentan, que a su vez va a afectar intracelularmente a la célula, debido a la acumulación de metales por la permeabilidad de la membrana celular, aunque en ocasiones las células permeabilizadas por la acción de detergentes. Los metales pueden ser acumulados intracelularmente por un proceso independiente al metabolismo (Soares & Soares, 2012).

Otro tipo de biosorbentes son los residuos de la agricultura, los cuales van a estar constituidos principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa. Este tipo de materiales contienen una alta cantidad de grupos hidroxilo, lo cual conlleva a tener una buena habilidad del adsorbente para unir metales. Además, presentan otros grupos funcionales como carboxilo, amino, amida, alcoholes y éster, dando como ventaja a este tipo de adsorbente que tengan una fuerte afinidad hacia los metales y una alta selectividad debido

a la abundancia y disponibilidad de unión de los grupos antes mencionados en su superficie. Además de que los residuos agrícolas presentan facilidad en cuanto a su procesamiento, son de bajo costo, hay abundancia de materias y no presentan impactos negativos al ambiente (Nguyen *et al.*, 2013).

Tabla 5. Tipos de material biológico utilizados en la remoción de metales pesados.

BACTERIAS, HOGOS Y LEVADURAS		
Cd(II), Cr(III), Cu(II) y Zn (II)	<i>Cronobacter muytjensii</i> KSCAS2	Saranya <i>et al.</i> , 2018
Pb(II) y Cu (II)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Amirnia <i>et al.</i> , 2015.
Fe(III), Cr(III), Co(II), Cu(II), Cd(II), Zn(II) y Ag ⁺	<i>Geobacillus thermodenitrificans</i>	Chatterjee <i>et al.</i> , 2010
Cd (II)	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Aspergillus niger</i> y <i>Aspergillus flavus</i>	Kumar-Awasthi <i>et al.</i> , 2017
Co(II), Mn(II), Pb(II), Fe(II), Cu(II), Zn(II), Cd(II) y Ni(II)	<i>Rhodococcus opacus</i>	Goswami <i>et al.</i> , 2017; Abdel-Ghani & El-Chaghaby, 2014; Basurco-Cayllahua & Torem, 2010
Cu (II) y Pb (II)	<i>Micrococcus luteus</i>	Puyen <i>et al.</i> , 2012
Cu(II), Pb(II) y Cd(II)	<i>Auricularia polytricha</i>	Huang <i>et al.</i> , 2012
Cd(II) y Co(II)	<i>Rhizobium</i> spp.	Abd-Alla <i>et al.</i> , 2012
PLANTAS Y RESIDUOS AGRICOLAS		
Pb(II), Cd(II), Zn(II), Cu(II), Cr(III), Ni(II) y As	<i>Ailanthus glandulosa</i> L, <i>Robinia pseudoacacia</i> L, <i>Artemisia artemisiifolia</i> L y <i>Verbascum thapsus</i> L	Čudić <i>et al.</i> , 2016
Pb(II), Cd(II) y Cu(II)	<i>Musa paradisiaca</i> , <i>Citrus limonum</i> y <i>Citrus sinensis</i>	Kelly-Vargas <i>et al.</i> , 2012
Pb(II), Cd(II), Zn(II) y Cu(II)	<i>Avena fatua</i>	Areco <i>et al.</i> , 2013
Pb(II), Cu(II), Zn(II) y Mn(II)	<i>Lolium multiflorum</i>	Mugica-Alvarez <i>et al.</i> , 2015
Cu(II), Zn(II), Cd(II) y Pb(II)	Fibras naturales de algodón.	Gomes-Paulino <i>et al.</i> , 2014
Cu(II), Mn(II) y Zn (II)	<i>Valeriana officinalis</i> L	Adamczyk-Szabela <i>et al.</i> , 2015

ANTECEDENTES

La contaminación del agua para consumo humano por metales pesados puede derivar en diversos efectos a la salud y al ambiente en general, dependiendo del tipo de elemento del cual se trate. La contaminación por parte de metales pesados incluye la destrucción de la vegetación, la degradación del suelo y la contaminación de los cuerpos de agua, la cual constituye una seria amenaza. Algunos de estos elementos, con mayores efectos y que son de gran preocupación en México, son el mercurio, el plomo y el cadmio (INECC, 2009).

Un ejemplo de la contaminación de agua ocasionada por estos EPT's es la que ocurre en el poblado de Huautla, en donde Tovar Sánchez *et al.*, (2016) colectaron agua de diferentes depósitos en el poblado. De estas muestras se obtuvo la concentración de metales pesados, siendo que los resultados reflejaron que el As es el metal que sobrepasa los LMP (0.025 mg/L) que marca la NOM-127-SSA1-1994, con concentraciones de 0.237 mg/L. Además, se observó que hay otros metales como Pb y Zn que se encuentran en el agua, pero no sobrepasan los LMP.

Con base a lo anteriormente descrito, Flores-Trujillo (2016) trabajó con cuatro diferentes fibras para probar su capacidad de remoción de metales pesados en agua. Dentro de estas fibras se encontraban *Opuntia sp.*, *Agave sp.*, *Luffa sp.* y *Saccharum sp.*, a las cuales se les realizó una caracterización química de los componentes; una vez realizado lo anterior a una parte de las fibras se les hizo un pre-tratamiento con NaOH debido a que algunos materiales lignocelulósicos presentan mejoras en la capacidad de adsorción (Velázquez-Jiménez *et al.*, 2013). Una vez finalizado este procedimiento, los biosorbentes se colocaron en soluciones de metales que contaban con 100 ppm de Pb, Cd y Zn de manera separada. Así mismo, se realizó un estudio de desorción empleando las fibras que fueron utilizadas anteriormente y se les añadió una solución de CaCl_2 .

Además, se llevaron a cabo análisis de espectrometría infrarroja a las fibras, para determinar los grupos funcionales de los biosorbentes que se encontraban interactuando con los metales. En este análisis se observó que dependiendo del metal que se encontrara

absorbido, los grupos funcionales cambiaron y su intensidad de vibración fue diferente dependiendo del metal y la fibra utilizada. Por otra parte, se estudió el equilibrio del proceso mediante los modelos de Langmuir y Freundlich, los cuales indicaron el tipo de adsorción que se realizaba entre las fibras y los metales.

Dentro de los resultados obtenidos se observó que las fibras de *Opuntia sp.* y *Agave sp.*, fueron aquellas que presentaron un mayor porcentaje de remoción de los metales antes mencionados, ya que sus capacidades de adsorción fueron superiores al 80%. En algunos casos, las fibras que no tenían el pre-tratamiento, fueron aquellas que tuvieron una mayor capacidad de adsorción. En cuanto a los resultados obtenidos de la desorción, se visualizó porcentajes menores al 20% del metal adsorbido, lo cual indicó una fuerte interacción de los grupos funcionales de los biosorbentes con los metales; esto fue comprobado con el análisis infrarrojo. Por último, al realizar las isoterma en donde se observó que ambas fibras adsorben los metales en forma de monocapa, se encontró que la interacción del metal y lo grupos funcionales fue la más fuerte.

Por otra parte, Serrano-Hernández (2016) utilizó fibras de *Agave sp.* y *Opuntia sp.* para saber la capacidad de adsorción de Cd, Zn y Pb, tomando en cuenta diferentes tamaños de partícula, ya que se sabe que la cantidad del adsorbato que puede adsorberse es directamente proporcional a área externa, siendo mayor en las partículas de menor tamaño (Wankat, 2008). En este trabajo se empleó fibra sin ningún tipo de tratamiento y la metodología que se aplicó fue preparar soluciones a una concentración de 100 ppm de cada uno de los metales, el biosorbente con la solución se colocó en agitación a 100 rpm, posteriormente se retiró el biosorbente y la concentración retenida se determinó por espectrometría de absorción atómica.

Dentro de los resultados obtenidos del trabajo, se reportó que las partículas menores a 0.297 mm fueron aquellas que presentaron un mayor porcentaje de remoción de estos metales. También se observó que la capacidad de adsorción de *Opuntia sp.* depende en gran medida del tamaño de partícula y el metal adsorbido; mientras que para *Agave sp.* la adsorción va a depender de las características moleculares de los metales.

En el año 2015 se colectaron muestras de agua del poblado de Huautla, perteneciente al municipio de Tlaquiltenago, Morelos. Dichas colectas pertenecían al cauce que se forma a las afueras de la mina y tomas de agua domiciliarias de donde los habitantes de la comunidad abastecen sus necesidades. Con las muestras colectadas se midió la concentración de los metales pesados en el agua de los dos lugares.

En la tabla 6 se muestran las concentraciones promedio de metales encontradas, comparando estos resultados con los valores de los LMP de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) para cada uno de los metales analizados que se encuentra vigente para agua y el número de veces que la concentración del metal supera los LMP de la NOM.

Tabla 6. Metales pesados y su concentración encontrada en el agua de Huautla, Morelos.

METAL	CONCENTRACIÓN PROMEDIO (ppm)		NORMA (ppm)	NO. DE VECES QUE SE SUPERA LA NORMA	
	CASA	CAUCE		CASA	CAUCE
Cd	0.005 ± 0.004	0.006 ± 0003	0.003	1.6	2.0
Zn	0.14 ± 0.003	0.148 ± 0.010	5.000	NA	NA
Fe	3.77 ± 1.051	3.411 ± 1.073	0.300	12.5	11.3
Pb	0.756 ± 0.213	0.722 ± 0.193	0.010	75.6	72.2
Mn	0.104 ± 0.014	0.105 ± 0.017	0.150	NA	NA
Cu	0.203 ± 0.012	0.224 ± 0.029	2.000	NA	NA

*La NOM comparada con las concentraciones obtenidas son las establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

**NA= No aplica

De esta forma se puede observar que metales como Pb, Fe y Cd superan los límites máximos permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 por 1.6 veces para el Cd, 12.5 veces para hierro y 75.6 veces para Pb. Es por ello que estos metales son de preocupación, ya que puede presentarse una serie de afectaciones en el ambiente y en la salud humana.

Por otra parte, se ha identificado con base en distintos trabajos que las fibras de *Opuntia sp.* y *Agave sp.* son utilizadas en la remoción de diferentes metales, como se muestra en la tabla 7, en donde se ha comprobado hasta el 95% de remoción de diferentes como el Pb, Cu, Cr, Zn y Fe.

Tabla 7. Ejemplos de los porcentajes de remoción de metales por fibras de *Opuntia sp.* y *Agave sp.* (Los valores están dados en ppm)

FIBRA	METAL	RESULTADO	AUTOR(ES)
<i>Opuntia sp.</i>	Cd (II)	10 } 20 } 48.3% 50 }	Rosique, 2013.
	Cr (VI)	4,244.8 → 67.93% 6,432.9 → 39.67% 8,489.7 → 70.71%	López & Maldonado, 2017.
	Cu (II) Fe (II)	Cu 19.6 → 82.75% Fe 16.6 → 78.36%	Morales <i>et al.</i> , 2017.
	Pb (II) Zn (II) Cd (II)	Cd 1.33 } Pb 4.37 } 95% Zn 38 → 62%	Vizcaíno & Fuentes, 2015.
<i>Agave sp.</i>	Cu (II) Cd (II)	Cu 200 → 40.7 % Cd { 200 → 52.9% 500 → 43% 700 → 38%	González, 2013.
	Pb (II)	37,000 → 95% Dependiendo del pH	Romero-González, 2007.
	Cu (II)	98% de remoción	Rivera <i>et al.</i> , 2017.

JUSTIFICACIÓN

México es uno de los países impulsores de la minería, ya que está considerado como el primer lugar a nivel mundial en producción de plata (Ag), se encuentra entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales como plomo (Pb), cadmio (Cd), oro (Au) y cobre (Cu), entre otros; además de ser considerado el primer lugar de inversión en exploración minera y el quinto país con mejor ambiente para realizar negocios mineros, según datos de la SE (2017). Como consecuencia de esta actividad se ha generado contaminación por metales pesados en zonas acuíferas. Esto conlleva a una serie impactos tanto a nivel ambiental como a la salud humana, ya que contamina grandes cantidades de suelo y cuerpos de agua. En humanos produce una serie de daños a la salud que van desde intoxicaciones, dolores de cabeza, daño a distintos órganos (dependiendo del metal), alteraciones en el sistema nervioso e incluso la muerte. Se estima que una de las principales causas de muerte de los habitantes de regiones en donde se llevan a cabo dichos procesos es la ingesta de estos metales a través del agua.

En el estado de Morelos durante varias décadas se realizaron actividades de explotación y obtención de metales como plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn), a partir de los cuales se generaron residuos sólidos denominados jales (jales, del náhuatl "xalli", arenas finas), que fueron depositados en espacios aledaños. Estos jales contienen generalmente sulfuros metálicos residuales que son fuente principal de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) o bien conocidos como metales pesados (Mussali-Galante, 2013). Los residuos del proceso fueron depositados sin ningún cuidado ambiental. Uno de estos sitios fue el poblado de Huautla, perteneciente al municipio de Tlaquiltenango. En dicha zona se encuentran tres jales de residuos mineros con importantes concentraciones de As, Cd, Cu y Pb, los cuales constituyen un peligro inminente para los cuerpos de agua que desembocan en el Río Amacuzac, y para los pobladores que abastecen sus necesidades diarias de estas aguas. Particularmente la contaminación de agua por metales pesados representa un grave peligro para la salud humana y para el ambiente, con efectos en todos los niveles de la organización biológica (Tovar-Sánchez *et al.*, 2012), ya que estos elementos a menudo se encuentran en concentraciones por encima de los límites permisibles (Erry *et al.*, 2000).

Se tienen reportes de diferentes afectaciones a individuos de la comunidad de Huautla, en donde se ha encontrado metales como As, Pb y Zn en el agua de bebida que a su vez ha generado diversos efectos biológicos en las personas expuestas; entre las afectaciones se encuentra el daño al ADN, así como afectaciones al ciclo celular, rompimientos en el ADN y aberraciones cromosómicas.

Una alternativa para abatir los problemas de salud causados por los metales en el agua es removerlos a través de tecnologías eficientes y de bajo costo. Los tratamientos que son utilizados para remover dichos contaminantes del agua en general son de tipo químico, que en muchos de los casos pueden provocar impactos negativos al ambiente, por lo que las alternativas de biorremediación representan una estrategia para la purificación de los cuerpos de agua contaminados por metales pesados. Es por ello que se hace necesario el uso de tecnologías de biorremediación para la remoción de dichos metales del agua. El proceso de biosorción es uno de los métodos más eficaces actualmente, el cual se basa en la captación de iones metálicos por diferentes tipos de biomasa (biosorbentes), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico. En este procedimiento se hace uso de agentes biológicos, en este caso diferentes fibras naturales, que no dañan al ambiente ni a la salud humana. Dentro de las ventajas que ofrece este tipo de métodos, es que hace uso de materiales de alta disponibilidad y de bajo costo, tiene alta selectividad a metales específicos, actúa bajo un amplio rango de condiciones fisicoquímicas (Villanueva, 2006), hay una gran reducción en el volumen de residuos peligrosos y una gran capacidad de adsorción de diferentes metales pesados y sus mezclas, comparativamente con los adsorbentes comerciales. Dentro de los biosorbentes más utilizados se encuentran los microorganismos como bacterias y cianobacterias, además de diversas especies de plantas y residuos agrícolas (Bilal *et al.*, 2013 y Sud *et al.*, 2008).

Por todo lo anterior, en este trabajo se busca hacer más eficiente la remoción de metales pesados a través del diseño de un columna empacada con fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*, para contribuir a disminuir la concentración de metales pesados en el agua de bebida de la comunidad de Huautla, Morelos.

HIPÓTESIS

Dado que las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* adsorben metales pesados en su estructura, será posible hacer más eficiente la remoción de metales pesados en agua al empacarlas en una columna diseñada *ex profeso*.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados del agua, utilizando las fibras naturales de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* empacadas en una columna diseñada para tal fin.

LITERATURA CONSULTADA

- Abd-Alla M. H., Mohamed Morsy F., El-Enany A.W.E. & Ohyama T. (2012). Isolation and characterization of a heavy-metal-resistant isolate of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* potentially applicable for biosorption of Cd²⁺ and Co²⁺. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 67:48-55.
- Abdel-Ghani N.T. & El-Chaghaby G.A. (2014). Biosorption for metal ions removal from aqueous solutions: a review of recent studies. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. 3(1):24-42.
- Acosta-Saavedra L.C., Moreno M.E., Rodríguez-Kessler T., Luna A., Arias-Salvatierra D., Gómez R. & Calderon-Aranda E.S. (2011). Environmental exposure to lead and mercury in Mexican children: a real health problem. *Toxicology Mechanisms and Methods*. 21(9): 656-666.
- Adamczyk-Szabela D., Justyna Markiewicz J. & Wolf W.M. (2015). Heavy metal uptake by herbs. IV. Influence of soil pH on the content of heavy metals in *Valeriana officinalis* L. *Water Air Soil Pollut.* 226(4):106.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2008). División de Toxicología ToxFAQsTM. Disponible en: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.pdf. Consultado el 09 de julio del 2014
- Ali H., Khan E. & Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*. 91: 869-881.
- Amirnia S., Ray M.B. & Margaritis A. (2015). Heavy metals removal from aqueous solutions using *Saccharomyces cerevisiae* in a novel continuous bioreactor-biosorption system. *Chemical Engineering Journal* 264: 863-872.
- Areco M. M., Saleh-Medina L., Alcira Trinelli M., Marco-Brown J. L. & dos Santos Afonso M. (2013). Adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) by dead *Avena fatua* biomass and the effect of these metals on their growth. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 110: 305-312.

- Basurco-Cayllahua J. E. & Torem M.L. (2010). Biosorption of aluminium ion onto *Rhodococcus opacus* from wastewaters. *Chemical Engineering Journal*. 161: 1-8.
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental (BVSDE). (2003). Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_quimicos/Manganeso.pdf. Consultado el 09 de febrero del 2017
- Bilal M., Shah J., Ashfaq T., Gardazi S., Tahir A., Pervez A., Haroon H. & Mahmood Q. (2013). Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater- A review. *Journal of Hazardous Materials*. 263: 322-333.
- BioEnciclopedia. (2014). Minerales metálicos. Disponible en: <http://www.bioenciclopedia.com/minerales-metalicos/>. Consultado del 29 de enero del 2016.
- Cardona A.F., Cabañas D.D. & Zepeda A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería* 17(1):1-9.
- Chatterjee S.K., Bhattacharjee I. & Chandra G. (2010). Biosorption of heavy metals from industrial waste water by *Geobacillus thermodenitrificans*. *Journal of Hazardous Materials*. 175:117-125.
- Čudić V., Stojiljković D. & Jovović A. (2016). Phytoremediation potential of wild plants growing on soil contaminated with heavy metals. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 67(3): 229-239.
- Damek-Poprawa M. & Sawicka-Kapusta K. (2003). Damage to the liver, kidney, and testis with reference to burden of heavy metals in yellow-necked mice from areas around steelworks and zinc smelters in Poland. *Toxicology*. 186(1-2): 1-10.
- Erry B.V., Macnair M.R., Meharg A.A. & Shore R.F. (2000). Arsenic contamination in wood mice (*Apodemus sylvaticus*) and bank voles (*Clethrionomys glareolus*) on abandoned mine sites in southwest Britain. *Environmental Pollution*. 110: 179-187.
- Flores-Trujillo A.K.I. (2016). Remoción de metales pesados del agua a través de procesos de biosorción. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

- Gavrilescu M. (2004). Removal of heavy metals form the environment by biosorption. *Engineering in Life Science*. 4(3):219-232.
- Gichner T., Patková Z., Száková J. & Demnerová K. (2006). Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 65(3): 420-426.
- Gomes Paulino A., da Cunha A.J., da Silva Alfaya R.V. & da Silva Alfaya A.A. (2014). Chemically modified natural cotton fiber: a low-cost biosorbent for the removal of the Cu (II), Zn (II), Cd (II), and Pb (II) from natural water. *Desalination and Water Treatment*. 52(22-24): 4223-4233.
- González Núñez R. (2013). Aprovechamiento de desechos plásticos, agrícolas y de crustáceos para preparar adsorbentes económicos para metales pesados. Academia de Ingeniería de México. Tesis de especialidad. Pp. 1-31.
- Goswami L., Manikandan N.A., Pakshirajan K. & Pugazhenth G. (2017). Simultaneous heavy metal removal and anthracene biodegradation by the oleaginous bacteria *Rhodococcus opacus*. *3 Biotech*. 7(1):37.
- Hernández-Plata I., Rodríguez V.M., Tovar-Sánchez E., Carrizalez L., Villalobos P., Mendoza-Trejo M.S., Mussali-Galante P. (2020). Metal brain bioaccumulation and neurobehavioral effects on the wild rodent *Liomys irroratus* inhabiting mine tailing areas. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Huang H., Cao L., Wan Y., Zhang R. & Wang W. (2012). Biosorption behavior and mechanism of heavy metals by the fruiting body of jelly fungus (*Auricularia polytricha*) from aqueous solutions. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 96:829-840.
- Iliná A., Martínez J.L., Segura E.P., Villareal J.A. & Gregorio K.M. (2009). Biosorción de arsénico en materiales derivados de maracuyá. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25(4):201-216.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2009). Metales pesados. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>. Consultado el 04 de enero del 2016.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Minería. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E>. Consultado del 29 de enero del 2016.
- Jaskulak M., Rorat A., Grobelak A., Chaabene Z., Kacprzak M. & Vandebulcke F. (2019). Bioaccumulation, antioxidative response, and metallothionein expression in *Lupinus luteus* L. exposed to heavy metals and silver nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(16):16040-16052.
- Kelly-Vargas K., Cerro-Lopez M., Reyna-Tellez S., Bandala E.R. & Sanchez-Salas J.L. (2012). Biosorption of heavy metals in polluted water, using different waste fruit cortex. *Physics and Chemistry of the Earth*. 37(39): 26-29.
- Kumar-Awasthi A., Kumar-Pandey A. & Khan J. (2017). An eco-friendly approach for minimizing pollution of metal from municipal solid waste leachate in India. *Journal of Cleaner Production* 140(3): 1618-1625.
- Lim A.P. & Aris A.Z. (2014). A review on economically adsorbents on heavy metals removal in water and wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 13:163-181.
- López E. & Maldonado S. (2017). Determinación de la factibilidad del uso de *Opuntia ficus-indica* como material biosorbente para la retención de cromo hexavalente (Cr⁺⁶). *Revista de Energía Química y Física*. 4(3):1-11.
- Madrid G., Gracia L., Marrugo J. & Urango I. (2011). Genotoxicidad de metales pesados (Hg, Zn, Cu, Pb y Cd) asociado a explotaciones mineras en pobladores de la cuenca del río San Jorge del departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. 23:103-111.
- Martin S. & Griswold W. (2009). Human health effects of heavy metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*. 15:1-6.
- Morais S., García e Costa F. & Pereira M.L. (2012). Heavy metals and human health. INTECH Open Access Publisher. Pp. 227-240.
- Morales Aredo J.J., Díaz Silva V.T., Gil Calderón A.P., León Vargas J.M. & Vejarano Mantilla R.D. (2017). Remoción de metales contaminantes mediante biomasa de tuna

- (*Opuntia ficus*): bioadsorción de Cu y Fe en un medio modelo. VII Encuentro Científico Internacional del Norte-ECI Norte 2017.
- Mugica-Alvarez V., Cortés-Jiménez V., Vaca-Mier M. & Domínguez-Soria V. (2015). Phytoremediation of mine tailings using *Lolium multiflorum*. International Journal of Environmental Science and Development. 6(4):246.
- Mussali-Galante P. (2013). Análisis de las poblaciones de *Peromyscus* sp. (*Rodentia: Muridae*), asociadas a jales dentro de la reserva de la biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México: un enfoque ecotoxicogenómico. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mussali-Galante P., Tovar-Sánchez E., Valverde M. & Rojas del Castillo E. (2013). Biomarcadores de exposición para determinar la contaminación ambiental por metales pesados: de las moléculas a los ecosistemas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29(1), 117-140.
- Nava- Ruiz C. & Méndez- Armenta M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). Archivos de Neurociencias (México). 16(3): 10-147.
- Nguyen T.A., Ngo H.H., Guo W.S., Zhang J., Liang S., Yue Q.Y., Li Q. & Nguyen T.V. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. Bioresource Technology. 148: 574-585.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2013). Intoxicación por plomo y salud. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>. Consultado el 09 de julio del 2014.
- Puyen Z. M., Villagrasa E., Maldonado J., Diestra E., Esteve I. & Solé A. (2012). Biosorption of lead and copper by heavy-metal tolerant *Micrococcus luteus* DE2008. Bioresource Technology. 126:233-237.
- Ramírez, E. (2001). Almacenamiento de residuos mineros en México. Memoria del seminario "Almacenamientos de Residuos Mineros" CNA – SMMS - CMM, México D.F. México.

- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR). (2016). Disponible en: <http://www.prtr-es.es/>. Consultado el 07 de Febrero del 2017.
- Reyes E.D., Cerino F. de J. & Suárez M.A. (2006). Remoción de metales pesados con carbono activado como soporte de biomasa. *Ingeniería*. 9(31):59-64.
- Rivera-Santillán R.E, Patricio-Ramírez F. & Sánchez- Jiménez V. Biosorption of heavy metals using organic waste from Tequila Processing. (2017). *Said State Phenomea*. 262: 609-612.
- Romero F. M. & Gutiérrez Ruíz M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62(1):43-53.
- Romero F.M., Armienta M.A., Gutiérrez M.E. & Villaseñor G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 24(2):43-54.
- Romero-González J., Parra-Vargas F., Cano-Rodríguez F., Rodríguez E., Ríos-Arana J., Fuentes-Hernández R. & Ramírez-Flores J. (2007). Biosorption of Pb(II) by *Agave tequilana weber* (agave azul) biomass. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 6(3):295-300.
- Romero J.A. (2011). Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del Distrito Minero El Triunfo, B.C.S., México. Tesis de maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos. Instituto Politécnico Nacional.
- Rosique Hueso M. (2013). Bioadsorción de cadmio por biomasa de *Opuntia*. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, Colombia. Pp. 1-123.
- Sala L.F., S. I. García, J.C. González, M.I. Frascaroli, S. Bellú, F. Mangiameli, P. Blanes, M. H. Moggeta, V. Andreu, A. M. Atria & J. M. Salas. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Anales de Química*. 106(2):114-120.
- Saranya K., Sundaramanickam A., Shekhar S., Meena M., Sathishkumar R.S. & Balasubramanian, T. (2018). Biosorption of multi-heavy metals by coral associated

- phosphate solubilising bacteria *Cronobacter muytjensii* KSCAS2. Journal of Environmental Management. 222: 396-401.
- Secretaría de Economía (SE). (2017). Minería. Disponible en: <http://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>. Consultado el 06 de enero del 2017.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-oficiales-mexicanas>. Consultado el 29 de enero del 2017.
- Serrano Hernández A.C. (2016). Biosorción de metales pesados sobre fibras de *Agave* sp. y *Opuntia* sp. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). Minería (2014). Disponible en: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/yacimientos-minerales/clasificacionyacimientos>. Consultado el 07 de febrero del 2017.
- Servicio Geológico mexicano (SGM). Explotación minera. (2020). Disponible en: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html. Consultado el 16 de octubre del 2020.
- Shahsavari A., Yazdi F.T., Moosavi Z., Heidari A. & Sardari P. (2019). A study on the concentration of heavy metals and histopathological changes in Persian jirds (Mammals; Rodentia), affected by mining activities in a iron ore mine in Iran. Environmental Science and Pollution Research. 26(12):12590-12604.
- Singh P., Dey M. & Ramanujam S.N. (2016). Bioaccumulation of heavy metals in anuran tadpoles: A study in Barak Valley, Assam. International Journal of Aquatic Biology. 4(3):171-178.
- Soares E.V. & Soares H. (2012). Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green technology: a review. Environmental Science and Pollution Research. 19: 1066-1083.

- Sud D., Mahajan G. & Kaur M.P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions- A review. *Bioresource Technology*. 99: 6017-6027.
- Tovar-Sánchez E., Cervantes L.T, Martínez C., Rojas E., Valverde M., Ortiz-Hernández M.L. & Mussali-Galante P. (2012). Comparison of two wild rodent species as sentinels of environmental contamination by mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5), 1677-1686.
- Tovar-Sánchez E., Mussali-Galante P., Martínez-Pacheco M., Ortiz-Hernández M.L., Sánchez Salinas E. & Olvera-Velona A. (2016). Relationship between genotoxic damage and arsenic blood concentrations in individuals residing an arsenic contaminated area in Morelos, Mexico. *Revista de Contaminación Ambiental*. 32(1):101-117.
- Vázquez-Boucard C., Anguiano-Vega G., Mercier L. & Rojas del Castillo E. (2014). Pesticide residues, heavy metals, and DNA damage in Sentinel *Oysters Crassostrea gigas* from Sinaloa and Sonora, Mexico. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 77(4):169-176.
- Vega F.A., Covelo E.F., Andrade M.L. & Marcet P. (2004). Relationships between heavy metals content and soil properties in mine soils. *Analytica Chimica Acta*. 524:141-150.
- Velázquez-Jiménez L.H., Pavlick A. & Rangel J.R. (2013). Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products*. 43: 200-206.
- Vijayaraghavan K. & Balasubramanian R. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. *Journal of Environmental Management*. 160:283-296.
- Villanueva C.C. (2006). Biosorción de Cobre (II) por biomasa pretratada de cáscara de *Citrus sinensis* (naranja), *Citrus limonium* (limón) y *Opuntia ficus* (palmeta de nopal). Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Vizcaíno Mendoza L. & Fuentes Molina N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cascara de naranja y tuna. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 25(1):43-60.

Wantak P.C. (2008). Ingeniería de procesos de separación. Segunda edición. Estado de México: Pearson Educación.

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS FIBRAS DE *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*

CONTENIDO

1.1 INTRODUCCIÓN.....	39
1.2 OBJETIVO	39
1.3 METODOLOGÍA	40
1.3.1 Análisis fisicoquímico de las fibras naturales	40
1.3.1.1 Distribución del tamaño de partícula.....	40
1.3.1.2 Análisis FE-SEM	40
1.3.1.3 Análisis elemental	40
1.3.1.4 Determinación de la hemicelulosa	41
1.3.1.5 Análisis de los materiales biosorbentes por espectrofotometría de infrarrojo (IR).....	41
1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
1.4.1 Análisis fisicoquímico de las fibras.....	42
1.4.1.1 Distribución del tamaño de partícula	42
1.4.1.2. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	43
1.4.3. Análisis elemental de las fibras de <i>Opuntia fuliginosa</i> y <i>Agave angustifolia</i>	48
1.4.4. Determinación del porcentaje de Hemicelulosa	49
1.4.5. Análisis Infrarrojo de los materiales biosorbentes	50
1.5 CONCLUSIONES	53
1.6 LITERATURA CONSULTADA	54

1.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de biosorción puede ser definido como la habilidad que posee un material biológico de acumular metales pesados de soluciones acuosas mediante interacciones fisicoquímicas (Abbas *et al.*, 2014; Rahimizadeh & Liaghat, 2015). Para este tipo de procedimiento se han utilizado diferentes clases de biosorbentes, los cuales son clasificados conforme a su procedencia, como por ejemplo los lodos provenientes de depuración de aguas residuales, entre los que se encuentran bacterias, hongos y algas; los provenientes de residuos industriales como las levaduras y los productos agrícolas (Abbas *et al.*, 2014).

El uso de plantas y material agrícola para la remoción de metales pesados ha sido empleado desde hace varios años, ya que éstos tienen la capacidad de acumular metales esenciales y no esenciales (Kumar *et al.*, 2017). Los desechos agrícolas y de plantas son utilizados para la extracción de metales pesados debido a su bajo valor económico y a su alta disponibilidad. Este tipo de material celulósico está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Malik *et al.*, 2017).

Diversos estudios han comprobado que moléculas como la celulosa y lignina presentan sitios de unión importantes para la remoción de los metales tales como grupos hidroxilo, carboxilo y carbonilo, los cuales presentan una gran afinidad por los metales (Qaiser *et al.*, 2007; Volesky, 2003). Algunos ejemplos de este tipo de biosorbentes que han sido utilizados se encuentran la cáscara de arroz, de papa, de cítricos, de mango de plátano, de tamarindo, bagazo de caña, maíz, semilla de manzana, cebada, entre otros (Malik *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2015; Tejada-Tovar *et al.*, 2014).

1.2 OBJETIVO

Llevar a cabo la caracterización fisicoquímica de las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LAS FIBRAS NATURALES

Este análisis se llevó a cabo para conocer las características físicas y químicas de las fibras a estudiar, para ello se utilizó la metodología propuesta por Almendros (2016):

1.3.1.1 Distribución del tamaño de partícula

Para realizar el estudio granulométrico de los residuos, se tomaron 20 g de muestra previamente secada y triturada hasta un tamaño inferior a 2 mm, dicha muestra se tamizó utilizando tamices normalizados de diferentes tamaños de apertura desde el tamaño menor a 0.297 cm hasta 3 cm, para determinar la distribución granulométrica.

1.3.1.2 Análisis FE-SEM

Este método se utilizó para analizar la superficie del sólido y estudiar su morfología. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido de alta resolución, que permitió conocer con mayor detalle el mecanismo de retención de los metales pesados en la superficie de las fibras utilizadas.

1.3.1.3 Análisis elemental

Este método analiza C, H, N y S simultáneamente, y se fundamenta en una combustión rápida de las muestras orgánicas, que se queman gracias al uso de catalizadores, transformándose todo el hidrógeno en H₂O, el nitrógeno en N₂, el carbono en CO₂ y el azufre en SO₂. Los gases resultantes se pasan por una columna cromatográfica para separarlos y cuantificarlos. El contenido de oxígeno (O₂) se determina indirectamente, por diferencia de los elementos antes mencionados.

1.3.1.4 Determinación de la hemicelulosa

Para determinar el contenido de α celulosa se seguirá el método establecido en la norma TAPPI T 203 y la holocelulosa de acuerdo con Wise *et al.* (1946). La cantidad de hemicelulosa se calculará con base en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ hemicelulosa} = \% \text{ holocelulosa} - \% \alpha\text{-celulosa}$$

1.3.1.5 Análisis de los materiales biosorbentes por espectrofotometría de infrarrojo (IR)

Con el objetivo de observar los principales grupos funcionales en las fibras vegetales que probablemente interactúan con los metales pesados, se realizó un análisis de los materiales utilizados como biosorbentes, antes y después de adsorber el metal, a través de espectrofotometría de infrarrojo.

El procedimiento utilizado fue el siguiente:

- a) El material biosorbente seco, se molió hasta un tamaño inferior a 0.25 mm.
- b) Se tomaron 2 mg, se colocaron en el compartimiento para la muestra del espectrofotómetro y se presionó con el accesorio de diamante.
- c) Por último, se realizó el barrido para obtener el espectro de IR en el rango de 4000-400 cm^{-1} con una resolución de 2 cm^{-1} .

1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.4.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LAS FIBRAS

1.4.1.1 Distribución del tamaño de partícula

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos del análisis granulométrico utilizando 20 g de cada una de las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*.

Tabla 8. Distribución del tamaño de partícula en gramos (g) de los biosorbentes utilizados

	TAMAÑO (cm)	g	PORCENTAJE
<i>Opuntia fuliginosa</i>	> 2	0.205	0.97
	2 - 1.40	1.183	5.61
	1.40 – 1	2.408	11.41
	1 – 0.71	2.985	14.15
	0.71 – 0.50	2.615	12.39
	0.50 – 0.355	2.619	12.41
	0.355 – 0.250	2.113	10.01
	< 0.250	6.846	32.45
<i>Agave angustifolia</i>	> 2	7.350	34.83
	2- 1	0.254	29.64
	1 – 0.85	3.980	18.86
	0.85 – 0.5	2.249	10.66
	0.50 – 0.297	1.112	5.27
	< 0.297	0.056	0.27

En el caso de *Opuntia fuliginosa* se observó que se logró un mayor porcentaje con tamaños menores a 0.250 cm (32.4%), y el porcentaje menor lo obtuvo a un tamaño mayor a 2 cm; en cambio aquel tamaño de partícula que se consiguió en un mayor porcentaje para *Agave angustifolia* es el mayor a 2 cm (34.8%) y el que se alcanzó en un porcentaje menor es el menor a 0.297 cm (0.2 %).

1.4.1.2. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En este análisis se hizo uso de un microscopio electrónico de barrido de campo ambiental, en donde se observó la superficie de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* (Figuras 3 y 4), a su vez se realizó un microanálisis para conocer el contenido de algunas especies inorgánicas de las fibras.

La superficie de *O. fuliginosa* (Figura 3) se observó muy diferente a la de las fibras de *A. angustifolia*, ya que se visualizaba un tipo de red fibrosa en donde en las partes periféricas se encontraban formas lobuladas, además de encontrarse también oxalatos. El microanálisis de esta muestra permitió saber que la fibra está conformada principalmente por carbono, nitrógeno, calcio y magnesio, siendo los cristales de calcio los más abundantes. Estos cristales son abundantes en estas plantas debido a que el Ca llega a constituir hasta el 50% de peso seco de la planta; además de que son derivados del ácido oxálico que produce su metabolismo. Una de las funciones de los oxalatos de calcio es la detoxificación ya que disminuye el potencial tóxico del ácido oxálico, manteniendo bajos niveles de solubilidad; aunque también se ha sugerido que son una fuente de almacenamiento de nutrientes estructurales, ya que ayudan a la rigidez e incluso a la captación de luz (Ávila-Lara, 2019; Tovar-Puente *et al.*, 2007), además de que la precipitación de estos mismos en los tejidos de las plantas podrían estar relacionada con aspectos fisiológicos como la tensión de agua (Monje & Baran, 2002).

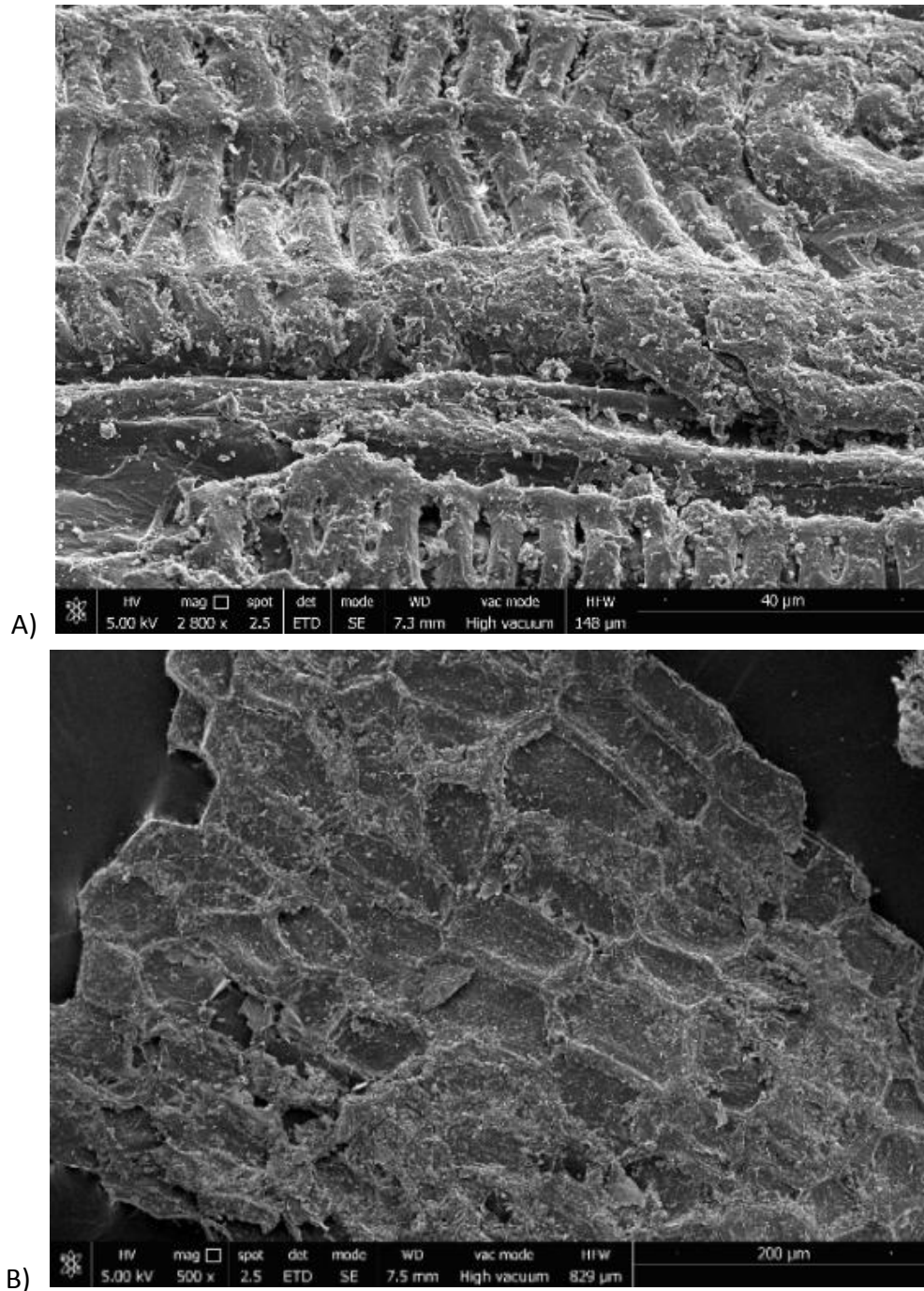


Figura 3. Fibras de *O. fuliginosa* al realizar el análisis FE-SEM: A) superficie de la fibra a 2800X y B) superficie de la fibra a 500X

En la figura 4 se pueden observar distintas formas de la fibra de *A. angustifolia*, en donde una es en forma helicoidal y la otra en forma de red. Por su parte, el microanálisis

indicó que la fibra estaba compuesta principalmente de carbono y calcio, lo que se debe probablemente a la abundancia de calcio en los suelos en los que se cultiva el agave (Torres-Morán, 2005).

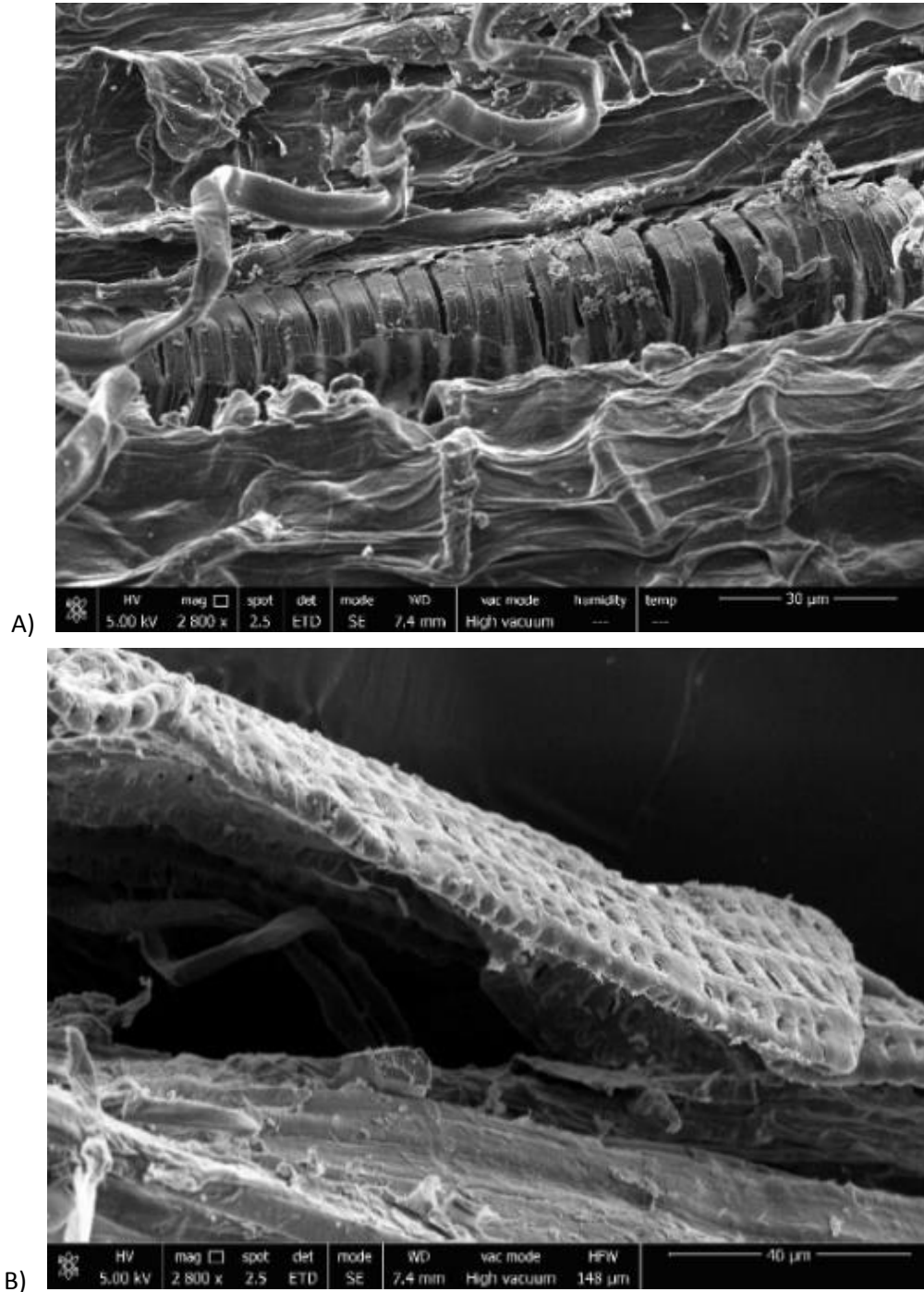


Figura 4. Fibras de *A. angustifolia* al realizar el análisis FE-SEM: A) superficie de la fibra a 2800X – 30 µm y B) superficie de la fibra a 2800X – 40 µm.

La figura 5 muestra la superficie de las fibras de *O. fuliginosa* al estar en contacto con una mezcla de metales. En las imágenes se observa los iones metálicos atrapados en la superficie, los cuales no son internalizados, además se observan aglomerados con los metales.

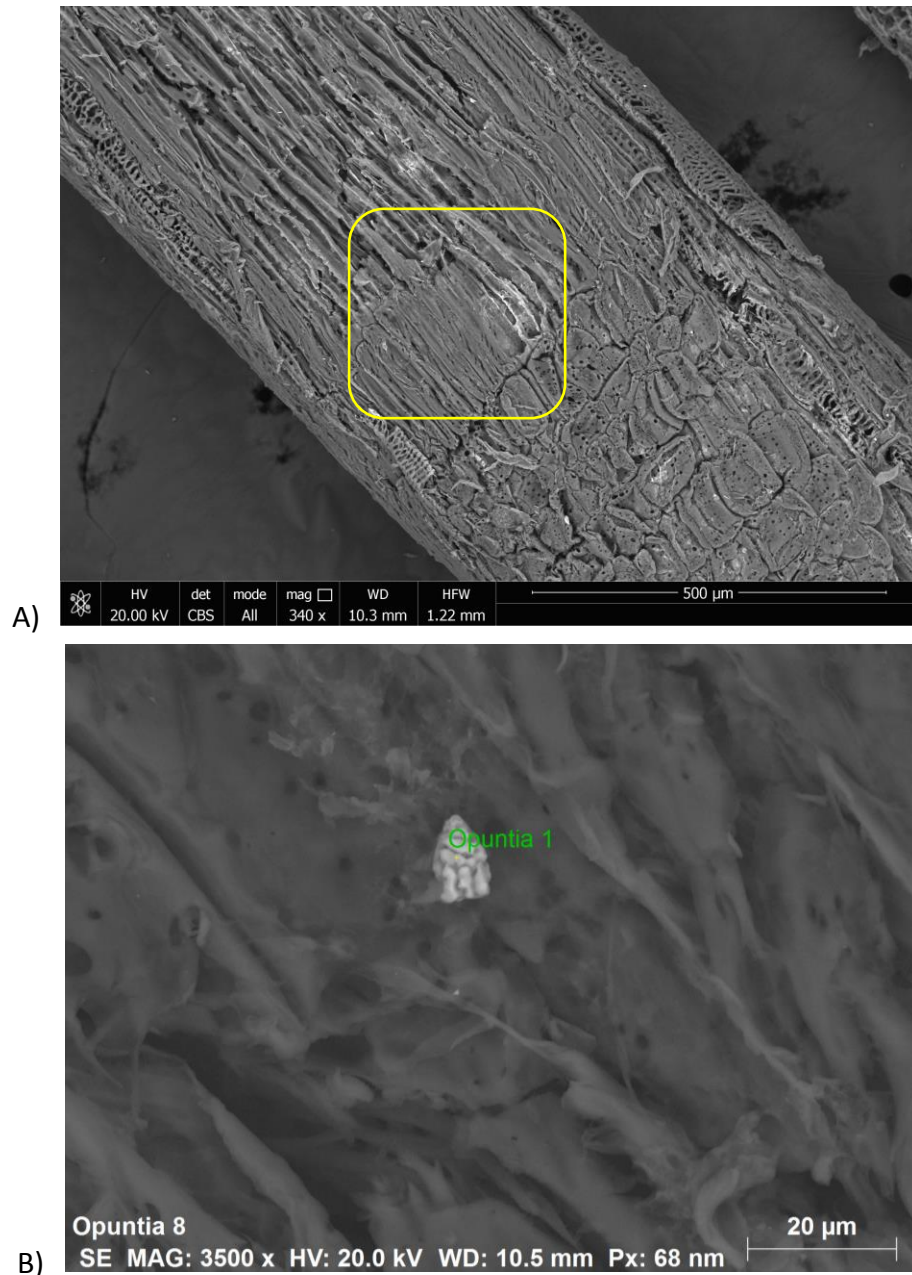


Figura 5. Análisis FE-SEM de la superficie de las fibras de *O. fuliginosa* al estar en contacto con los metales de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn; los señalamientos corresponden a los iones metálicos retenidos en las fibras: a) imagen a 340X y b) imagen a 3500X.

Por último, la figura 6 muestra a las fibras de *A. angustifolia* al estar en contacto con la mezcla de metales a diferentes resoluciones (500X, 2068X y 3603X). En ellas se observan puntos iluminados, lo que permitió, identificar los metales que se encuentran retenidos en la superficie.

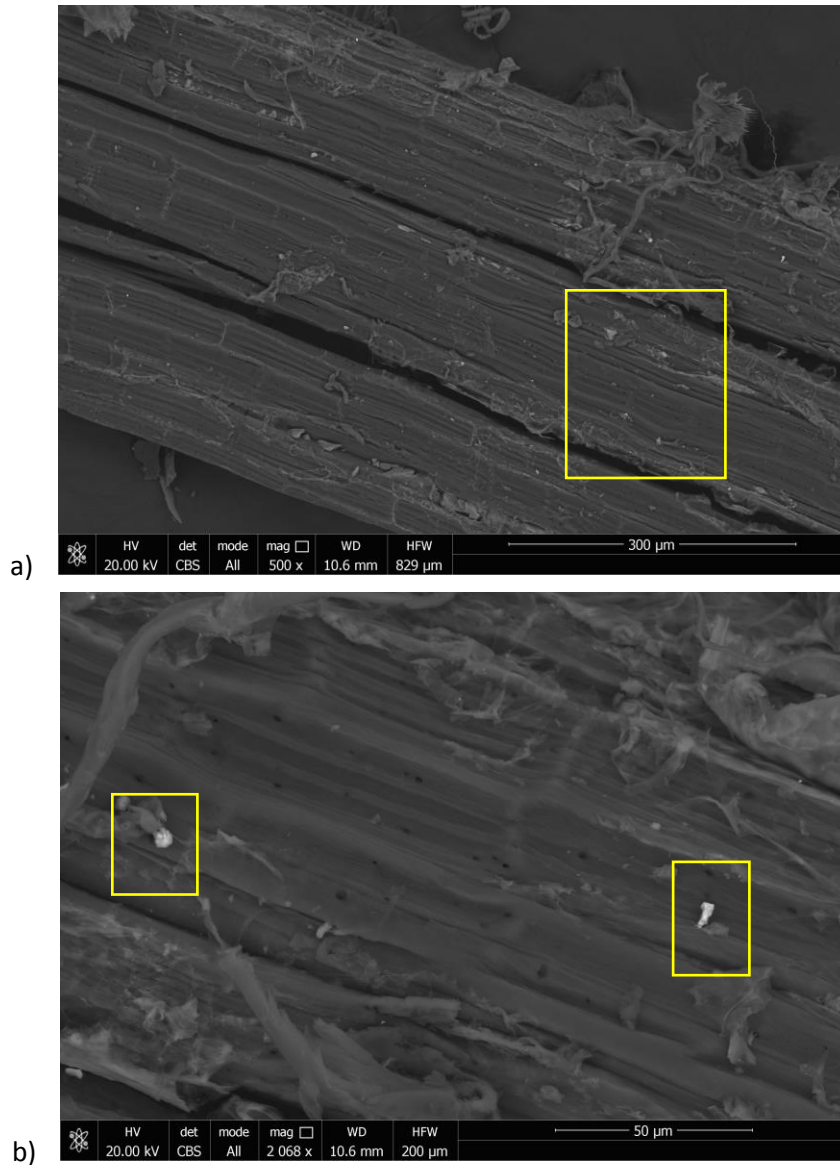


Figura 6. Análisis FE-SEM de la superficie de las fibras de *A. angustifolia* al estar en contacto con los metales de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn; los señalamientos corresponden a los iones metálicos retenidos en las fibras: a) imagen a 500X, b) imagen a 2068X y c) imagen a 3603X.

Esto también lo manifiesta Eftekhari *et al.*, (2019) al utilizar las fibras de algodoncillo; sin embargo, en el estudio hacen referencia a que los metales se quedan retenidos en la superficie debido es un espacio no poroso y con una sección hueca, lo que les proporciona una superficie más amplia para que los metales sean retenidos, lo cual pudiera estar pasando en los biosorbentes utilizados en este trabajo.

Además, se pueden estar llevando a cabo una serie de mecanismos que pueden explicar su retención en la superficie el biosorbente, como es la complejación, intercambio iónico, precipitación y adsorción física, aunque también se pueden realizar más de uno de estos mecanismos (Plaza, 2012; Ho *et al.*, 2001); por otra parte, hay que considerar que este proceso no solo depende de la morfología de la superficie del biosorbente, sino de otras características como los grupos funcionales y el área superficial específica (Ighalo *et al.*, 2020).

1.4.3. Análisis elemental de las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*

En la tabla 9 se muestran los resultados del análisis elemental de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*. Dichos resultados revelan que las fibras están constituidas principalmente por oxígeno y carbono y en menor proporción por hidrógeno, nitrógeno y azufre.

Tabla 9. Análisis elemental de las fibras estudiadas

Material	Análisis elemental				
	%C	%H	%N	%S	%O
<i>O. fuliginosa</i>	42.87	7.03	0.53	< 0.1	49.57
<i>A. angustifolia</i>	42.47	6.33	0.34	< 0.1	50.86

C= carbono

H= hidrógeno

N= nitrógeno

S= azufre

O= oxígeno

Los porcentajes obtenidos en el presente estudio son comparables a los reportados por Trachtenberg & Mayer (1981), en *Opuntia ficus-indica* 42.57% de C, 6.31% H y 51.12% de O; sin embargo, Peláez-Cid *et al.*, 2013, reportan para la misma especie porcentajes de

36.2% C, 5.6% H, 0.1% N y 58.1% O. Entretanto, Velázquez- Jiménez *et al.*, 2013 reportó porcentajes similares al analizar *Agave salmiana* con un 49.26% de O, 41.72% de C, 1.69% de H y un 0.42% de N. Dichas composiciones con alto contenido de oxígeno y carbono sugieren la presencia de grupos funcionales tales alcoholes, carboxilos y carbonilos, principalmente, los cuales tienen gran afinidad por las especies metálicas.

1.4.4. Determinación del porcentaje de Hemicelulosa

Los porcentajes de hemicelulosa y α -celulosa, se obtuvieron utilizando la metodología establecida en la norma TAPPI T 203. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Porcentajes de Hemicelulosa y α -celulosa obtenidos para *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

BIOSORBENTE	HEMICELULOSA (%)	CELULOSA (%)
<i>O. fuliginosa</i>	18.40	5.64
<i>A. angustifolia</i>	23.46	12.38

Estos resultados se obtuvieron con base en el porcentaje de holocelulosa que se reportó por Flores-Trujillo *et al.*, (2020) para ambas fibras (24.05% para *O. fuliginosa* y 35.85% para *A. angustifolia*). El trabajo de Fuentes Herrera (2018) muestra que del total de holocelulosa que se encuentra presente en las fibras de *Opuntia ficus*, el 70% es celulosa, sin embargo, no se señala la cantidad de este compuesto. Otro trabajo realizado por Cheikh y colaboradores (2018) muestran porcentajes de 23.27% para celulosa y 15.3% para hemicelulosa, al utilizar la misma fibra que el trabajo anterior, en donde el porcentaje de hemicelulosa es semejante al obtenido en este trabajo. Por otra parte, Láinez *et al.*, (2018) reportan un contenido de celulosa de 20.67% y 3.74% de hemicelulosa para *Agave salmiana*, los cuales son semejantes a los obtenidos en el presente trabajo. Sin embargo, en el estudio realizado por Montiel *et al.*, (2016) se reportan porcentajes de 40.1% de celulosa y 17% hemicelulosas presentes en las fibras de *Agave tequilana*. Con estos

porcentajes podemos deducir que las diferencias que pudieran existir entre las diferentes fibras en cuanto a los porcentajes pudieran ser debido a que no se trata de la misma especie, además de que influyen dentro de estos porcentajes la composición química de las fibras como a cantidad de pectinas, proteínas, cutina, compuestos grasos, suberina y ceras (Munguía-Aguilar, 2016), que garantizan la presencia de grupos funcionales ricos en oxígeno y algunos constituyentes minerales que funcionan como sitios de unión (Villabona-Ortiz *et al.*, 2020).

La celulosa y la hemicelulosa poseen una gran afinidad con cationes metálicos y metaloides indispensables para contener dichos contaminantes y extraerlos de diversos ecosistemas. Es por ello la importancia de contar la información química de ambos biosorbentes, ya que la pared celular difiere entre plantas, en cuanto al tamaño de poro, grupos funcionales, cadenas de polisacáridos (Plaza, 2012).

1.4.5. Análisis Infrarrojo de los materiales biosorbentes

Con el objetivo de conocer los grupos funcionales que poseen las fibras vegetales y conocer cuáles podrían interactuar con los metales a estudiar, se realizó un análisis de los materiales utilizados como biosorbentes a través de espectrofotometría de infrarrojo. En la figura 7 Y 8 se muestran los espectros IR de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* sin tener contacto con ningún metal y al estar en contacto con Cu, Cr, Mn y Fe.

En la figura 7, se observa que la fibras de *O. fuliginosa* poseen enlaces –OH ($3600-3000\text{ cm}^{-1}$), ya que se puede visualizar una vibración en la absorbancia al estar en contacto con los metales antes descritos, lo cual indica que estos grupos hidroxilo están interactuando con los metales estudiados. Otras señales de importancia que se pueden observar son los relacionados con enlaces –CH alifáticos, grupos amino, enlaces C=O de grupos carboxilo, grupos amino, enlaces C-O y C-N e hidrocarburos aromáticos (Martín-Lara *et al.*, 2008). Estos grupos desempeñan un papel importante a la unión de metales pesados, pues poseen la capacidad de unir metales cambiando sus iones de hidrógeno por iones metálicos, ya que son altamente reactivos y se desprotonan durante la adsorción (Nguyen *et al.*, 2013; Meitei & Prasad, 2013); lo que indica que dichos grupos funcionales podrían

estar interactuando para formar diferentes complejos con los iones metálicos, como por ejemplo hidróxido de plomo ($Pb(OH)_2$), hidróxido de cadmio ($Cd(OH)_2$), hidróxido de zinc ($Zn(OH)_2$), tetramina de cadmio ($Cd(NH_3)_4$), entre otros. Es importante señalar que en el caso de la interacción entre la fibra con el Cu se muestra una mayor disminución en la absorbancia en los enlaces $-OH$ y enlaces $-CH$ alifáticos, mientras que con el Cr presenta una mayor disminución en los sitios de enlaces carbonilo, enlaces carboxilo, grupos amino y enlaces C-O y C-N, lo cual indica que estos dos metales se encuentran ocupando en mayor cantidad de sitios activos dentro de la fibra.

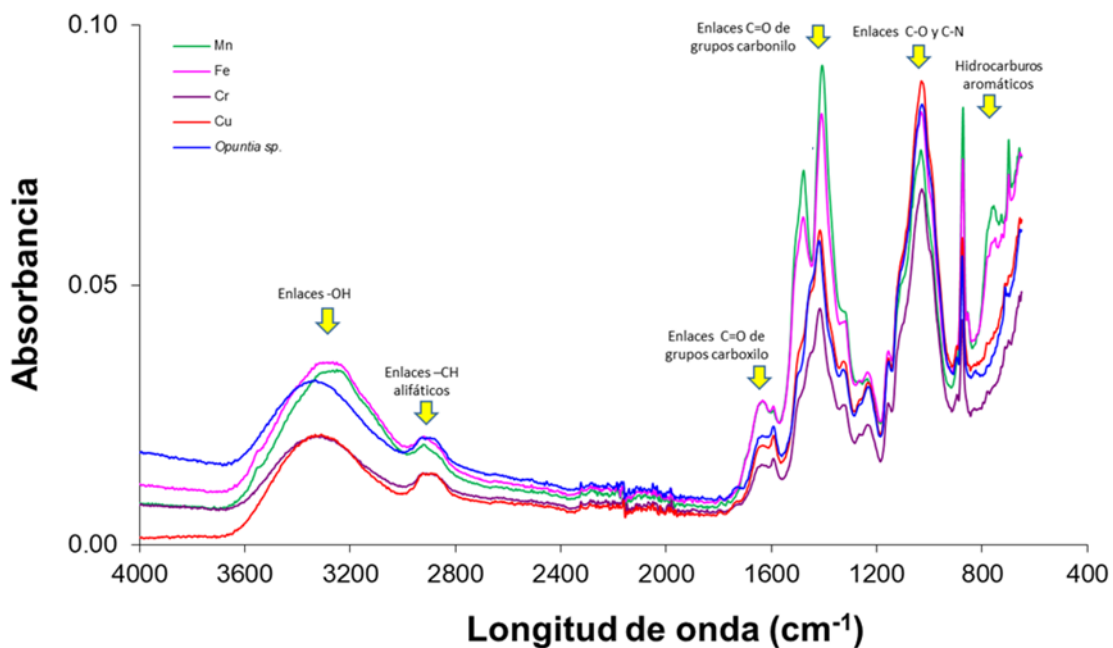


Figura 7. Análisis IR de las fibras de *Opuntia fuliginosa* frente a los metales: Cr, Cu, Fe y Mn.

La figura 8 muestra los espectros infrarrojos de la fibra sola de *A. angustifolia* y de la fibra al estar en contacto con los metales mencionados anteriormente. En este análisis se puede visualizar que hay interacción en los enlaces $-OH$, enlaces $-CH$ alifáticos, grupos carbonilo, grupos carboxilo, grupos metilo y enlaces C-O y C-N. En este caso la fibra con Mn

muestra una disminución en la absorbancia en los enlaces –OH y enlaces –CH alifáticos, mientras que con el Fe se da con los grupos carbonilo.

La interacción con los grupos metilo no ha sido reportada para la remoción de metales pesados; sin embargo, este tipo de vibración se puede estar dando debido a que son grupos presentes en la estructura de la lignina (Alomá *et al.*, 2008), ya que trabajos como el de Tejeda y colaboradores (2014) muestran vibraciones en este tipo de enlaces.

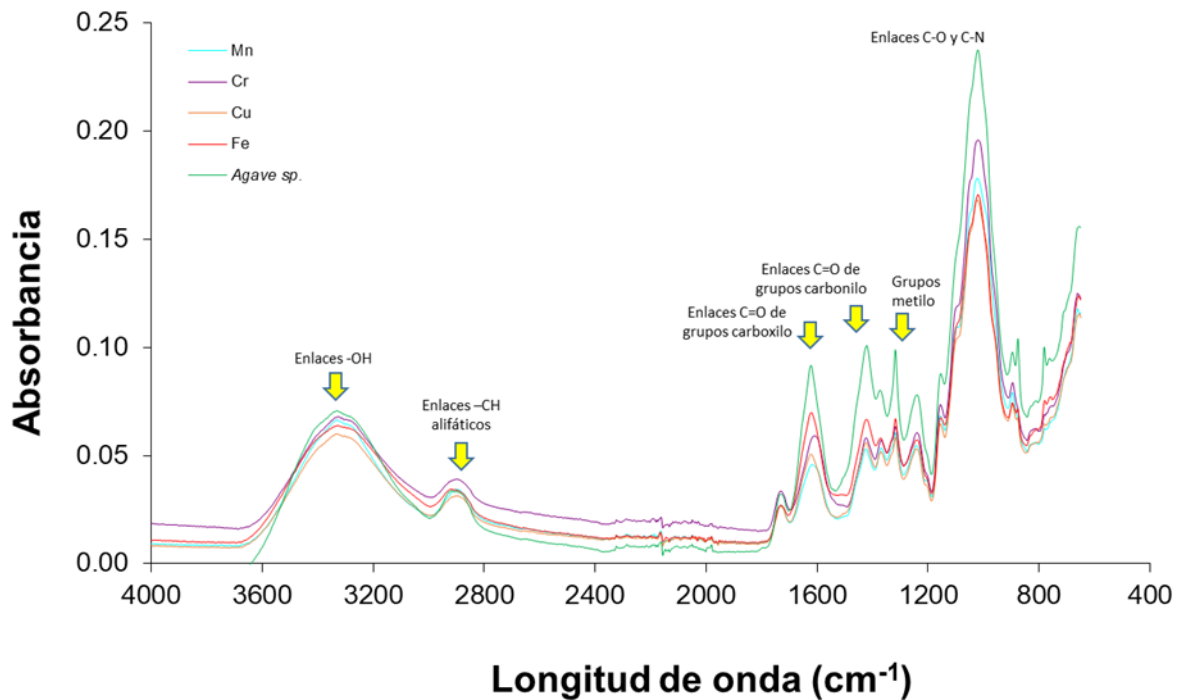


Figura 8. Análisis IR de las fibras de *Agave angustifolia* frente a los metales: Cr, Cu, Fe y Mn.

1.5 CONCLUSIONES

Al realizar el análisis elemental de las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* se observó que ambas fibras se encuentran compuestas principalmente por oxígeno, seguida de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en un porcentaje mínimo (<0.1), lo cual sugiere la presencia de grupos funcionales tales como OH⁻, HCOO⁻, C=O, CN⁻.

En el análisis FE-SEM de las fibras de *A. angustifolia* se observaron formas helicoidales, mientras que en las fibras de *O. fuliginosa* se observaron formas de red y lobulada; además se realizó un microanálisis de las fibras en donde se corrobora que están compuestas principalmente por carbono. Asimismo, se observó que los iones metálicos quedan atrapados en la superficie y no son internalizados. Entretanto, el microanálisis realizado a las fibras sugiere la formación de compuestos, dada la identificación de los conglomerados de diferentes metales en su superficie.

Por su parte, en caso del porcentaje de hemicelulosa y α -celulosa, se observó que estos dos componentes se encuentran en las fibras en proporciones diferentes, ya que sus porcentajes corresponden a menos del 25% en el caso de *O. fuliginosa* y menos del 35% en el caso de *A. angustifolia*.

Se obtuvieron los análisis infrarrojos de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* con y sin metales (Cr, Cu, Fe, y Mn). En el caso de *O. fuliginosa* se observó la presencia de grupos amino; mientras que en *A. angustifolia* no se observaron dichos grupos.

1.6 LITERATURA CONSULTADA

- Abbas S.H., Sulaymon A.H., Ismail I. & Mostafa T.M. (2014). Biosorption of heavy metals:A review. *Journal of Chemical Science and Technology*. 3(4): 74-102.
- Almendros Molina A. I. (2016). Biosorción de níquel con residuos vegetales. Valorización del biosorbente agotado mediante tratamientos termoquímicos. Tesis doctoral. Universidad de Granada, España.
- Alomá I., Rodríguez I., Curbelo A., Sardiñas R. & Cortés M. (2008). Remoción de cromo y níquel de soluciones acuosas utilizando bagazo de caña como biosorbente. Consultado el 10 de enero del 2019. Disponible en: <http://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2008/3/9.pdf>
- Ávila-Lara A.I. (2019). Evaluación de bagazo de *Agave tequilana* Weber variedad azul y de *Opuntia ficus indica* en pretratamientos químicos y enzimáticos para su aplicación en la producción de ácido succínico. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.
- Cheikh Rouhou M., Abdelmoumen S., Thomas S., Attia H. & Ghorbel D. (2018). Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus racquets (*Opuntia ficus indica*): Structural and microstructural studies. *International Journal of Biological Macromolecules*. 116: 901-910.
- Eftekhari E., Hasani H. & Fashandi H. (2019). Removal of heavy metal ions (Pb²⁺ and Ni²⁺) from aqueous solution using nonwovens produced form lignocellulosic milkweed fibers. *Journal of Industrial textiles*. 0(0): 1-19.
- Flores Trujillo A.K.I., Mussali-Galante P., De Hoces M., Blázquez-GarcíaG., Saldarriaga-Noreña H.A., Rodríguez-Solís A., Tovar-Sánchez E., Sánchez-Salinas E. & Ortiz-Hernández M.L. (2020). Biosorption of heavy metals on *Opuntia fuliginosa* and *Agave angustifolia* fibers for their elimination from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 1-14.
- Fuentes Herrera I. (2018). Extracción de celulosa a partir de *Opuntia ficus* para la evaluación de retención de Flúor (F). Tesis Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gupta V. K., Nayak A. & Agarwal S. (2015). Bioadsorbents for remediation of heavy metals: status and their future prospects. *Environmental Engineering Research*, 20(1), 1-18.

- Ho Y.S., Ng J.C. & McKay G. (2001). Removal of lead (II) from effluents by sorption on peat using second-order kinetics. *Separation Science and Technology*.36(2):241-261.
- Ighalo J.O., Adeniyi A.G., Omodele A.A.E. & Arowoyele L.T. (2020). Competitive adsorption of Pb(II), Cu(II), Fe(II), and Zn (II) from aqueous media using biochar from oil palm (*Elaeis guineensis*) fibers: a kinetic and equilibrium study. *Indian Chemical Engineer*. 1-11.
- Kumar Yadav K., Gupta N., Kumar V. & Kumar Singh J. (2017). Bioremediation of heavy metals from contaminated sites using potential species: A review. *Indian Journal of Environmental Protection*. 37(1): 65-84.
- Láinez M., Ruiz H., Castro-Luna A. & Martínez-Hernández S. (2018). Release of simple sugars from lignocellulosic biomass of *Agave salmiana* leaves subject to sequential pretreatment and enzymatic saccharification. *Biomass and Bioenergy*. 118: 133-140.
- Malik D.S., Jain C.K. & Yadav A.K. (2017). Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*. 7: 2113-2136.
- Martín-Lara M.A., Pagnanelli F., Mainelli S., Calero M. & Toro L. (2008). Chemical treatment of olive pomace: Effect on acid-basic properties and metal biosorption capacity. *Journal of Hazardous Materials*. 156(3):448-457.
- Meitei M.D. & Prasad M.N.V. (2013). Lead (II) and cadmium (II) biosorption on *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleiden biomass. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 3(1): 200-207.
- Monje P.V. & Baran E.J. (2002). Characterization of calcium oxalates generated as biominerals in Cacti. *Plant Physiology*. 128: 707-713.
- Montiel C., Hernández-Meléndez O., Vivaldo-Lima E., Hernández-Luna M. & Bárzana E. (2016). Enhanced Bioethanol production from blue agave bagasse in a combined extrusion-Saccharification process. *BioEnergy Research*. 9(4): 1005-1014.
- Munguía Aguilar D. (2016). Deslignificación de la penca de *Agave tequilana* F.A.C. Weber empleando peróxido de hidrógeno alcalino como pretratamiento para la producción de biohidrógeno. Tesis Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica. A.C. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Nguyen T.A.H, Ngo H.H., Guo W.S., Zhang J., Liang S., Yue Q.Y., Li Q. & Nguyen T.V. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*. 148: 574-585.
- Plaza Cazón J. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.

- Peláez-Cid A.A., Velázquez-Ugalde I., Herrera-González A.M. & García-Serrano J. (2013). Textile dyes removal from aqueous solution using *Opuntia ficus-indica* fruit waste as adsorbent and its characterization. *Journal of Environmental Management*. 130: 90-97.
- Qaiser S., Saleemi A.R. & Mahmood Ahmad M. (2007). Heavy metal uptake by agro based waste materials. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(3), 409-416.
- Rahimizadeh M. & Liaghat A. (2015). Biosorbents for adsorption of heavy metals: A review. *International Conference Environmental Science, Engineering & Technologies (CESET-2015)*. Pp. 1-12.
- Tejeda L., Tejeda C., Marimón W. & Villabona A. (2014). Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución. *Revista Luna Azul*. 39: 124-142.
- Tejeda-Tovar C., Villabona-Ortiz A. & Garcés-Jaraba L. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*. 34: 109-123.
- Torres-Morán M.I. (2005). Evaluación de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno y calcio en plantas de *Agave tequilana weber* variedad azul, in vitro y en invierno. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara.
- Tovar-Puente A., Pando-Moreno M., González-Rodríguez H., Scott-Morales L. & Méndez-Gallegos S. (2007). Density of calcium oxalate crystals in 15 prickly pear cultivates species. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 9:91-98.
- Trachtenberg S. & Mayer A.M. (1981). Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 20(12): 2665-2668.
- Velázquez-Jimenez C.H., Pavlick A. & Rangel-Mendez R. (2013). Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as absorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products*. 43: 200-206.
- Villabona-Ortiz A., Tejeda-Tovar C., Ruiz-Paternina E., Frías-González J.D. & Blanco-García G.D. (2020). Optimization of the effect of temperature and bed height on Cr (VI) bioadsorption in continuous system. *Revista Facultad de Ingeniería*. 29(54):e10477.
- Volesky B. (2003). Sorption and biosorption. BV Sorbex Inc., Motreal, Canada. Pp.1-316.
- Wise L.E., M. Murphy, A. A. D'Addieco. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Pap. Trade J.* 122(2): 35-43.

**ESTUDIOS DE
ADSORCIÓN/DESORCIÓN
UTILIZANDO FIBRAS DE
Opuntia fuliginosa
Y *Agave angustifolia***

CONTENIDO

2.1 INTRODUCCIÓN	59
2.2 OBJETIVO	60
2.3 METODOLOGÍA	60
2.3.1 Pruebas de Adsorción-Desorción.....	60
2.3.1.1 Estudios de Adsorción- Desorción de Cr, Cu, Fe y Mn	60
2.3.1.2 Ciclos de Adsorción-Desorción de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn	61
2.3.2 Análisis Estadístico.....	61
2.3.3 Equilibrio de Biosorción.....	61
2.3.3.1 Isotermas de adsorción con los modelos de Langmuir y Freundlich	62
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
2.4.1 Análisis de la adsorción y desorción del Cu, Mn, Fe Y Cr sobre las fibras.	64
2.4.1.1 Manganeso.....	64
2.4.1.2 Cobre	66
2.4.1.3 Hierro.....	68
2.4.1.4 Cromo.....	70
2.4.1.5 Adsorción de la mezcla de Cr, Cu, Fe y Mn	72
2.4.2 Ciclos de adsorción-desorción de Cd, Zn, Pb, Cu, Mn, Fe y Cr	75
2.4.3 Equilibrio de Biosorción	79
2.4.3.1 Isotermas de Langmuir	79
2.5 CONCLUSIONES	86
2.6 LITERATURA CONSULTADA	88

2.1 INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es una preocupación a nivel mundial debido a su toxicidad, ya que estos contaminantes no se degradan y se bioacumulan en la cadena trófica causando varios padecimientos y desastres en los ecosistemas, además de los impactos negativos sobre la salud pública (Wang *et al.*, 2015; Li & Tao, 2015). Actualmente existen diversas técnicas o tratamientos físico-químicos que pueden ser aplicados para la remoción de metales pesados, como el intercambio iónico, precipitación química, extracción con disolventes, nanofiltración, coagulación, ósmosis inversa y adsorción, entre otros (Wang *et al.*, 2015; Ahmad *et al.*, 2015).

La biosorción ha tenido gran auge debido a que es una técnica eco-amigable, fácil de usar, con afinidad específica, bajo costo y diseño simple (Gunatilake, 2015; Salman *et al.*, 2015). Es una técnica utilizada para la remoción de iones metálicos, compuestos orgánicos, entre otros, debido a diversas interacciones que se dan entre el sustrato y el biosorbente (Salman *et al.*, 2015). El proceso de adsorción depende de varias condiciones experimentales como el tamaño de partícula, pH, concentración del metal, la cantidad de sitios activos y la competencia de iones metálicos para unirse a estos sitios (Ahmad *et al.*, 2015); además, es un método efectivo para la eliminación o reducción de la concentración de una gama amplia de contaminantes disueltos en efluentes (Paul *et al.*, 2018). Uno de los biosorbentes más utilizados en este tipo de procedimientos son los residuos de plantas, debido a la diversidad de grupos funcionales que se presenta en la pared celular de este tipo de residuos, lo que favorece ciertas fuerzas de atracción para los iones metálicos, lo que permite una alta eficiencia en la eliminación de estas especies (Acharya *et al.*, 2018). Un paso necesario para llevar de forma adecuada el proceso de biosorción es el establecimiento de una correlación del equilibrio de biosorción. Para ello es necesario utilizar isothermas de adsorción, las cuales son esenciales para la optimización de mecanismos de biosorción, ya que una isoterma permite explicar el fenómeno por el cual se lleva a cabo la movilidad de una sustancia a una fase sólida a una temperatura y pH persistentes (Anastopoulos & Kyzas, 2015).

2.2. OBJETIVO

Realizar pruebas de adsorción-desorción de metales pesados con las fibras seleccionadas, utilizando diferentes tamaños de partícula.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 PRUEBAS DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN

Estas pruebas permitirán determinar la capacidad de adsorción-desorción de las fibras de los metales Cr, Cu, Fe y Mn, utilizando la metodología de Flores-Trujillo (2016).

2.3.1.1 Estudios de Adsorción- Desorción de Cr, Cu, Fe y Mn

Se utilizaron matraces Erlenmeyer de 125 ml y los ensayos de adsorción-desorción se realizaron de manera individual para cada uno de los metales estudiados (Cr, Cu, Fe y Mn); a cada matraz se le agregaron 75 ml de una solución individual de Cr, Cu, Fe y Mn, que se realizó por triplicado. A cada uno de los matraces se le agregaron 0.5 g de cada biosorbente, el cual previamente fue cortado en 8 diferentes tamaños (<0.297, 0.297, 0.5, 0.85, 2.0, 1, 2 y 3 cm). Una vez que se pusieron en contacto las soluciones de los metales con la fibra, estas se agitaron a 100 rpm a una temperatura de 30°C por 24 horas y un pH de 5. Posteriormente, los biosorbentes se separaron y se determinó la concentración de los metales en la solución acuosa utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica.

Para el estudio de desorción se utilizó CaCl_2 a una concentración 1M. Se vertieron 75 ml en matraces que contenían el biosorbente ya expuesto con anterioridad al metal, en donde se les colocó en agitación a 100 rpm durante 48 horas. Posteriormente se filtró la muestra y al remanente se le determinó el contenido de metales por Espectroscopia de Absorción Atómica. Así mismo, estas pruebas se realizaron con diferente tamaño de partícula. Con dichos resultados se elaboraron isothermas de adsorción.

2.3.1.2 Ciclos de Adsorción-Desorción de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn

Se emplearon matraces Erlenmeyer de 125 ml, a cada uno de los cuales se les adicionaron 50 ml de soluciones que contenían Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, realizando los ensayos con cada uno de estos metales por separado y triplicado. A estos matraces se les agregaron 0.5 g de cada biosorbente con el tamaño que tuvo el mejor porcentaje de remoción de metales en el experimento anterior. Posteriormente se les colocó en agitación a una velocidad de 100 rpm a una temperatura de 30°C por 24 horas y un pH de 5. Una vez realizado lo anterior, los biosorbentes se separaron y se determinó la concentración de los metales utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica. Posteriormente el biosorbente fue colocado en 50 ml de una solución de CaCl₂ a una concentración 1 M, se les colocó en agitación a 100 rpm durante 24 horas. Posteriormente se filtró la muestra y el remanente se cuantificó el contenido de metales por Espectroscopia de Absorción Atómica. Este procedimiento se realizó por cuatro veces.

2.3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y una prueba de U-Mann Whitney para una comparación pareada de las fibras utilizando el programa STARVIEW con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, para validar los datos y determinar las diferencias en la eficiencia de retención de los metales del agua por los biosorbentes.

2.3.3 EQUILIBRIO DE BIOSORCIÓN

Para describir el equilibrio de biosorción de un material en una superficie a una temperatura constante, se realizaron isotermas de adsorción, en donde se utilizó la metodología descrita por Flores-Trujillo, 2016.

Se prepararon soluciones por separado de Cr, Cu, Fe y Mn a diferentes concentraciones (10, 20, 50, 100, 150 y 200 mg/L), a las cuales se les pusieron en contacto con los biosorbentes por separado y se llevaron a agitación a 100 rpm, a una temperatura constante (30°C) y un pH de 5. Se tomaron muestras de 3 ml de la solución en un intervalo de 15 minutos durante la primera hora, 30 minutos durante la segunda y tercera hora y posteriormente cada hora durante 10 horas, esto se realizó por triplicado.

Para calcular la capacidad de adsorción (q_e) de fibra elegida sobre cada metal se utilizó la siguiente fórmula:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

Donde:

V (L)= Volumen de la solución

m (mg)= Masa de biosorbente que se utilizó en la prueba.

C_o (mg/L) = Concentración inicial de cada metal

C_e (mg/L) = Concentración de metal en el equilibrio

2.3.3.1 Isotermas de adsorción con los modelos de Langmuir y Freundlich

Para describir el tipo de interacción que se da entre cada metal con cada fibra, se usaron los modelos de Langmuir y Freundlich, los cuales son utilizados para describir sistemas de adsorción sólido-líquido.

El modelo de Langmuir es representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{Lq_m}$$

Donde:

L (L/mg) = Constante de Langmuir

q_e (mg/g) = Metal adsorbido en las fibras en equilibrio

C_e (mg/l) = Concentración de metal en la solución en equilibrio

q_m (mg/g) = Metal adsorbido en las fibras en forma de monocapa.

La constante de Langmuir de isotermas, q_m y L, se obtiene representando C_e/q_e frente C_e.

El modelo de Freundlich puede ser representado utilizando la siguiente ecuación:

$$q_e = K_f C_e^{1/n}$$

Donde:

K_f (mg/L)= Constante relacionada con la capacidad de adsorción

n = Intensidad de adsorción.

Las constantes de Freundlich, K_f y n , se determinaron trazando el logaritmo de q_e frente el logaritmo de C_e .

Una vez realizada la prueba anterior se evaluó cual es el material más adecuado debido a las características que presentaron cada uno de los materiales y a la cantidad de retención de metales que cada uno presenta.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 ANÁLISIS DE LA ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DEL Cu, Mn, Fe y Cr SOBRE LAS FIBRAS.

Los resultados obtenidos para la capacidad de adsorción y desorción de ambas fibras en contacto con cada uno de los metales (Cr, Cu, Fe y Mn) se muestran a continuación.

2.4.1.1 Manganeso

En la figura 9 se muestra el comportamiento del Mn al estar en contacto con las fibras de *A. angustifolia* y *O. fuliginosa* en diferentes tamaños de partícula. Se observó que las fibras de *A. angustifolia* presentaron una mayor capacidad de adsorción, con porcentajes de remoción superiores al 60%, en comparación a los porcentajes de adsorción obtenidos por *O. fuliginosa*, que en la mayoría de los casos fueron menores al 50%. El análisis estadístico señala que hay diferencias estadísticamente significativas entre el porcentaje de adsorción de las fibras, más no existen diferencias significativas entre los diferentes tamaños de partícula, con excepción de los tamaños menores de ambas fibras ($H=36.863$ $p<0.05$), lo cual podría deberse a que, al utilizar el tamaño más pequeño de partícula, hay una mayor área de superficie de contacto en donde se pueden unir los metales a la fibra, así como el número de sitios activos para la biosorción (Flores Trujillo *et al.*, 2020; Jain *et al.*, 2016; Alfarra *et al.*, 2014; Ozdes *et al.*, 2014), ya que el tamaño de los poros juega un papel importante en la retención de átomos con un tamaño relativamente grande (Plaza, 2012); por lo que cuanto más pequeño sea el poro es más complejo que un metal como el Mn (con un radio iónico de 0.8 Å), quede retenido en dicho poros.

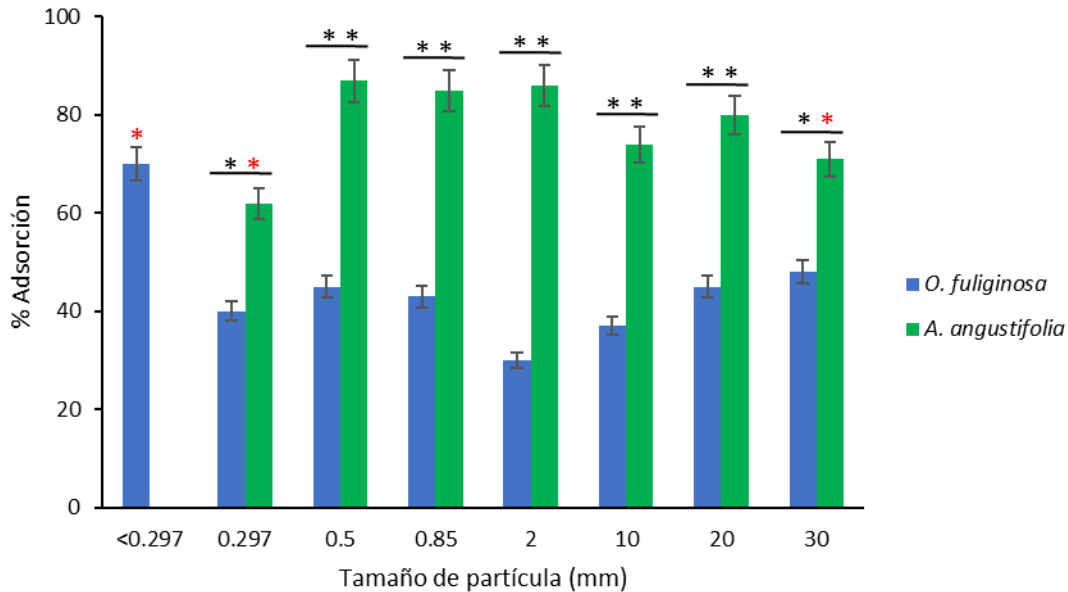


Figura 9. Adsorción de Mn (II) sobre las fibras vegetales. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticamente significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de adsorción del manganeso, - significan diferencias estadísticamente significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

Al analizar los datos obtenidos de la desorción del Mn (Figura 10), se puede apreciar que, en *A. angustifolia*, el porcentaje desorbido es menor al 50% con respecto al porcentaje adsorbido; sin embargo, no se muestran diferencias significativas entre los tamaños de partícula utilizados. En el caso de *O. fuliginosa* los porcentajes son menores al 60%; además de que al realizar el análisis estadístico se observaron diferencias entre los diferentes tamaños de partícula de la misma fibra.

Comparando los biosorbentes, se observa una diferencia estadísticamente significativa en los porcentajes de desorción del Mn entre las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* dos fibras dependiendo el tamaño de partícula que se empleó ($H=35.938$, $p<0.05$). Lo anterior, quiere decir que cuando se tiene un menor tamaño de partícula hay una mayor área de superficie en donde se exponen más grupos funcionales y este tipo de

retención podría ser más fuerte y esta unión también depende de los grupos funcionales que la fibra pueda tener y que sean afines con el ion metálico.

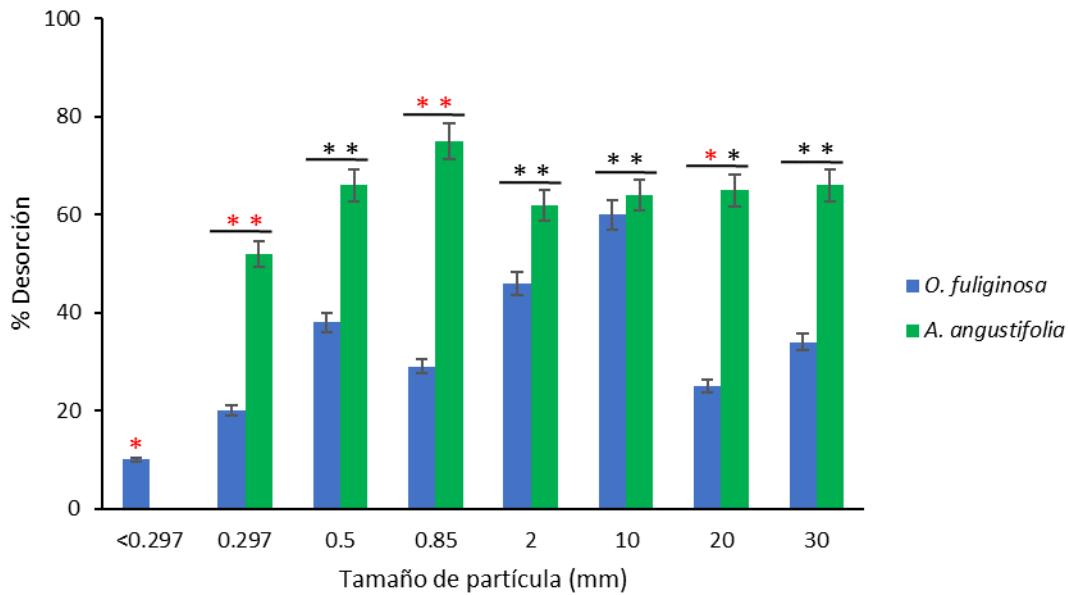


Figura 10. Desorción del Mn (II) sobre los diferentes biosorbentes. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de desorción del manganeso, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

2.4.1.2 Cobre

Los porcentajes de adsorción de cobre por las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* se observan en la figura 11. Se puede apreciar que para *A. angustifolia* existen diferencias significativas entre los tamaños de partícula, por lo que se observa porcentajes de adsorción mayores en fibras de menor tamaño (mayores al 60%) y porcentajes de adsorción menores en tamaños mayores a 1 cm, esto debido a la cantidad de sitios expuestos que se tienen en la fibra, ya que hay una mayor área de superficie en tamaños de partícula más pequeños ($H=36.774$, $p<0.05$).

O. fuliginosa presentó porcentajes de adsorción superiores al 60% en todos los casos. Al realizar los análisis estadísticos correspondientes (prueba de Kruskal-Wallis y U

Mann Whitney) se pudo apreciar que existen diferencias significativas frente a los diferentes tamaños de biosorbente, ya que los porcentajes más altos se obtienen con los tamaños de partícula menores a 0.85 cm al igual que a los 3 cm. Dichas diferencias también se encontraron entre ambas fibras y entre los diferentes tamaños de partícula.

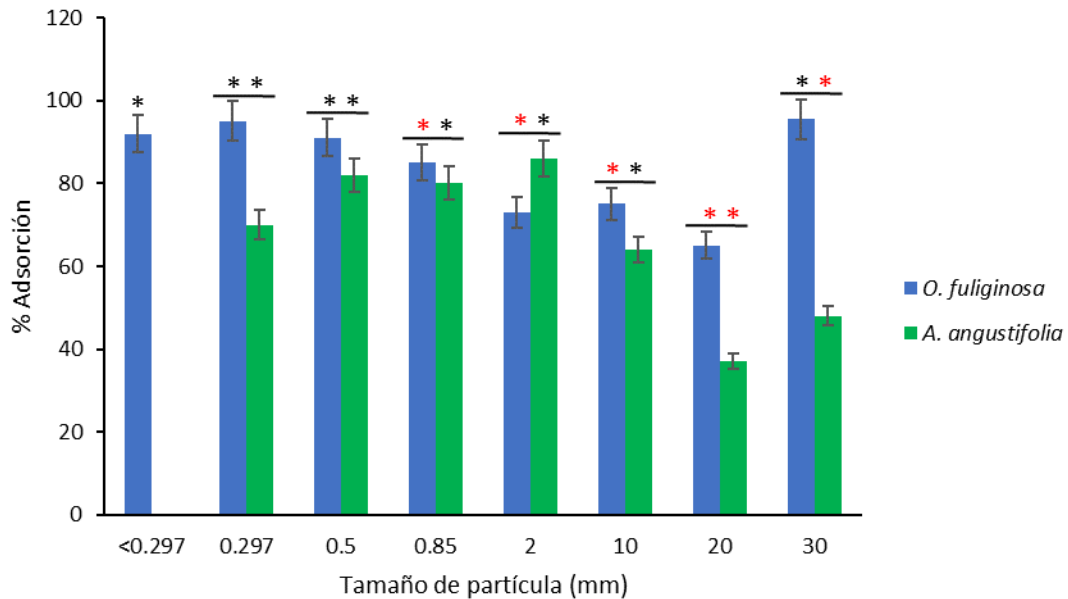


Figura 11. Adsorción de Cu (II) sobre las fibras vegetales. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de adsorción del cobre, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

Para los estudios de desorción de cobre (Figura 12) se obtuvieron diferencias significativas entre las dos fibras utilizadas ($H=37.507$, $p<0.05$). Al observar los porcentajes de desorción obtenidos por *O. fuliginosa*, no se muestran diferencias significativas de la desorción entre los diferentes tamaños de esta fibra; sin embargo, cuando se utilizaron las fibras de *A. angustifolia*, el resultado fue contrario, ya que desorbe en menor medida el Cu con tamaños a 0.50 cm.

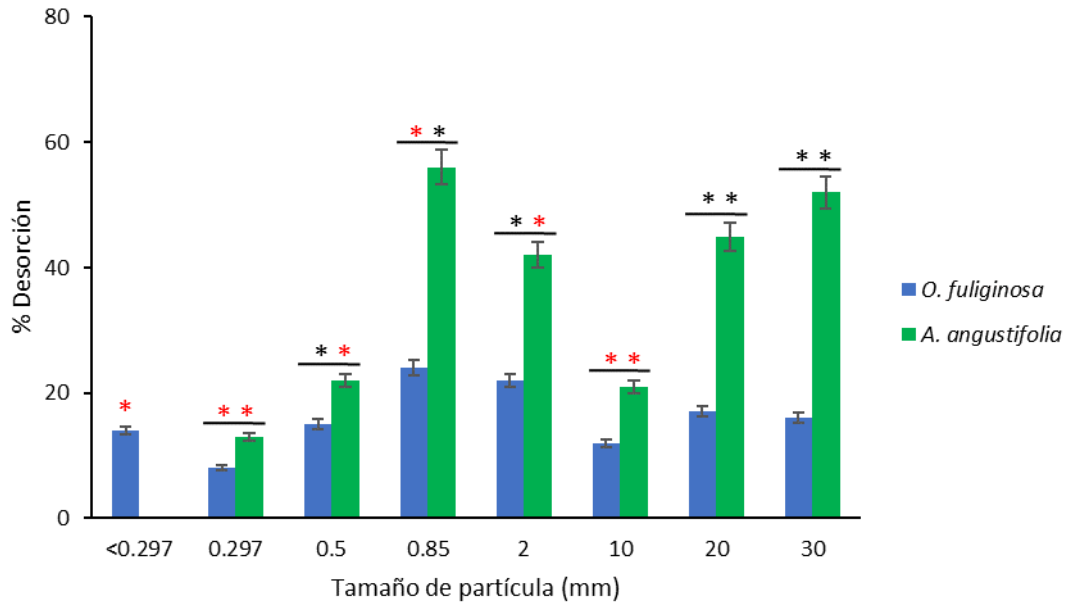


Figura 12. Desorción de Cu (II) sobre los diferentes biosorbentes. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de desorción del cobre, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

2.4.1.3 Hierro

El estudio de adsorción de Fe por ambas fibras señala que *O. fuliginosa* a diferentes tamaños de partícula, no muestra diferencias significativas en cuanto a los porcentajes de adsorción (Figura 13). De la misma manera, *A. angustifolia* no muestra diferencias significativas entre el porcentaje de adsorción de Fe a diferentes tamaños.

Sin embargo, al comparar ambas fibras en diferentes tamaños si se muestran diferencias significativas, ya que las fibras de *O. fuliginosa* muestran resultados de adsorción superiores al 80%, mientras que los obtenidos por *A. angustifolia* son inferiores al 40%.

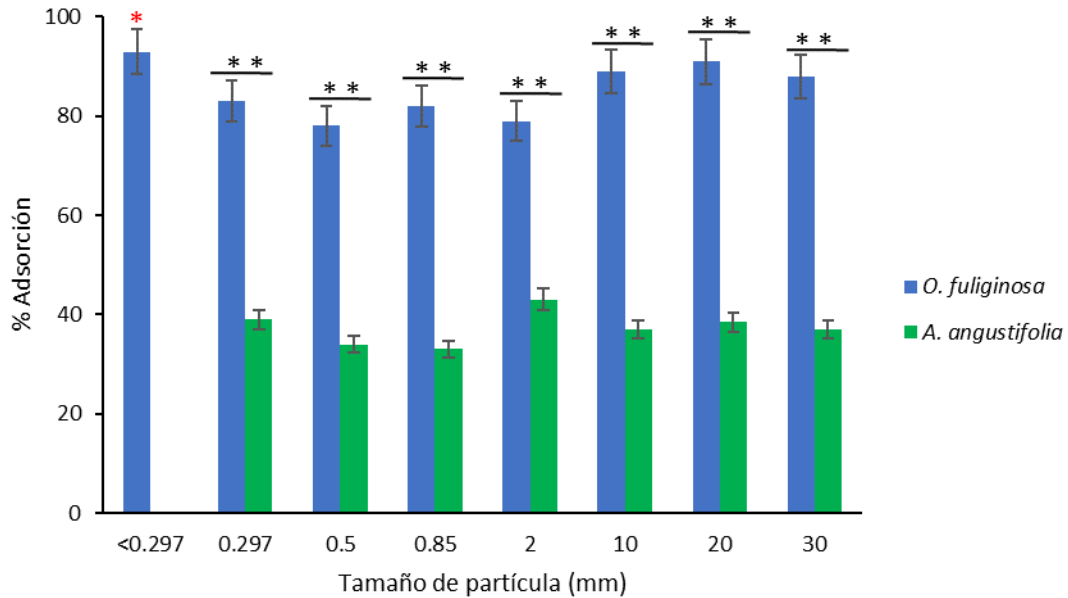


Figura 13. Adsorción de Fe (II) sobre las fibras vegetales. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de adsorción del hierro, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

En la figura 14 se muestran los porcentajes de Fe en solución, después de haber realizado los experimentos de desorción, los cuales se llevaron a cabo colocando las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* con CaCl_2 después de haber adsorbido los metales. Como se puede apreciar, *A. angustifolia* presenta un mayor porcentaje de desorción respecto a las fibras de *O. fuliginosa*, pues el análisis estadístico se comprueba que, en la mayoría de los casos, ambas presentan diferencias significativas en cuanto a los porcentajes de desorción a diferentes tamaños de partícula. Lo anterior se comprueba con el porcentaje adsorbido encontrado en los diferentes tamaños de ambas fibras utilizadas, con lo cual se asegura que el metal se encuentra en el biosorbente y que se están llevando a cabo uniones fuertes entre los grupos funcionales de las fibras utilizadas y el metal evaluado.

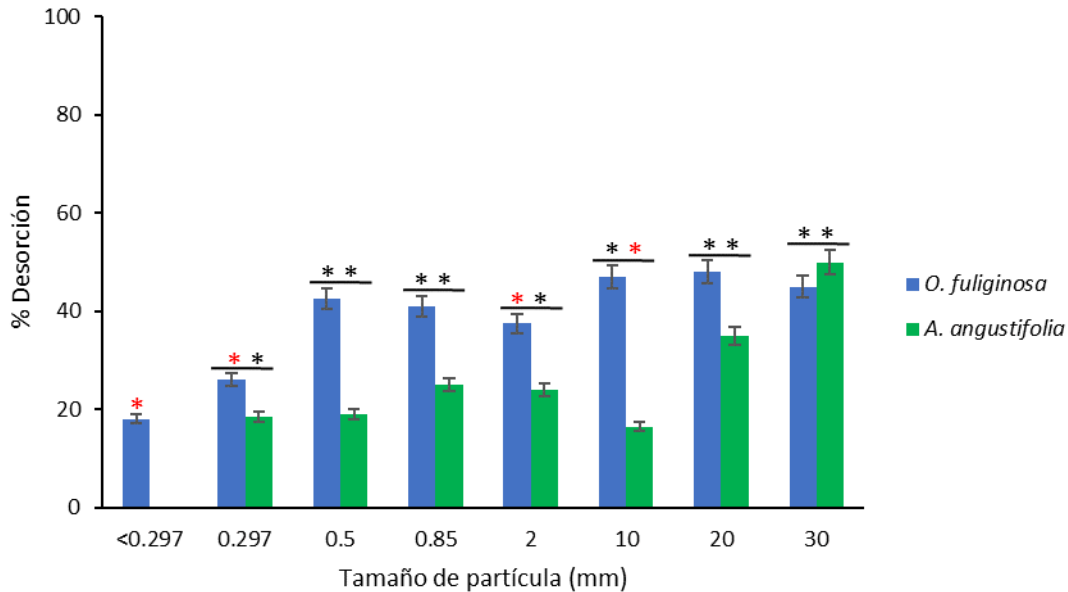


Figura 14. Desorción del Fe (II) sobre los diferentes biosorbentes. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de desorción del hierro, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

2.4.1.4 Cromo

En la figura 15 se observan los porcentajes de adsorción de cromo para ambas fibras. Se aprecia que ambas fibras presentan diferencias estadísticamente significativas al comparar el mismo tamaño de partícula entre ellas, ya que dependiendo de este tamaño se puede presentar mayor adsorción de una fibra u otra. Sin embargo, la fibra que mejor adsorbe este metal es *O. fuliginosa* en tamaño < 0.297 mm, con un 75% de remoción.

En el caso de *A. angustifolia* se puede observar que, si hay diferencias significativas entre los 8 diferentes tamaños de partícula, presentando porcentajes de remoción entre el 60% y el 23%. Por otra parte, *Opuntia fuliginosa* muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas en tamaños ≤ 0.297 mm, 0.85 mm y 2 cm; mientras que en los tamaños restantes si las hay. Al comparar esta fibra en cuanto a los porcentajes de

adsorción de la fibra de *A. angustifolia* se hace notar que presenta un mayor porcentaje de adsorción de dicho metal.

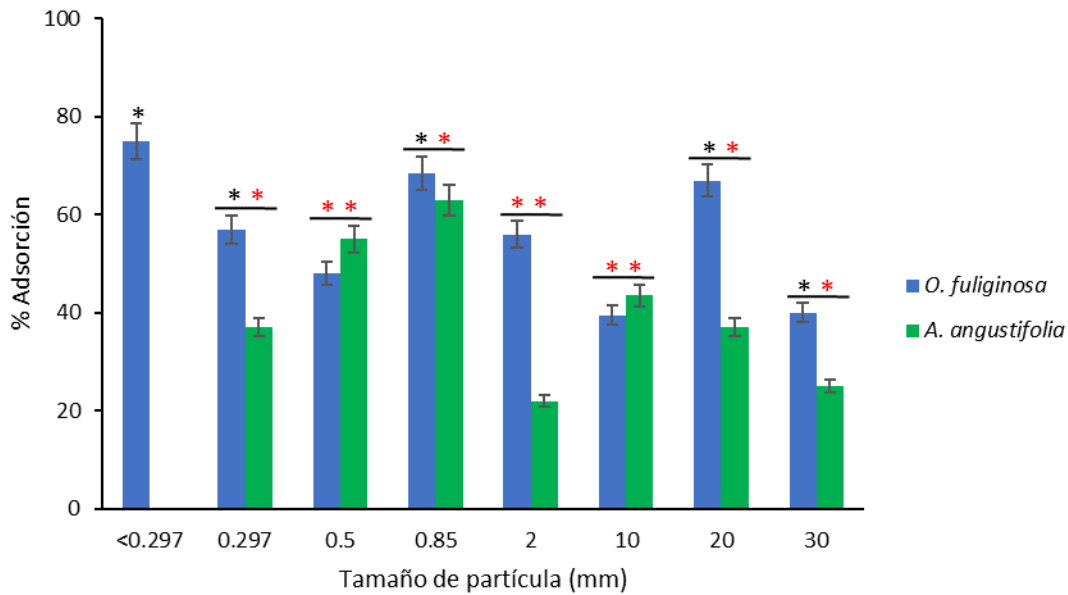


Figura 15. Adsorción de Cr (III) sobre las fibras vegetales. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de adsorción del cromo, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

Para el caso de la desorción se observa que la fibra de *O. fuliginosa* a mayor tamaño desorbe en un mayor porcentaje el metal; mientras que los porcentajes de desorción de cromo en *A. angustifolia* se mantienen por debajo de un 30% de desorción, sin embargo, si se muestran diferencias significativas en tamaños menores a 1 cm (Figura 16).

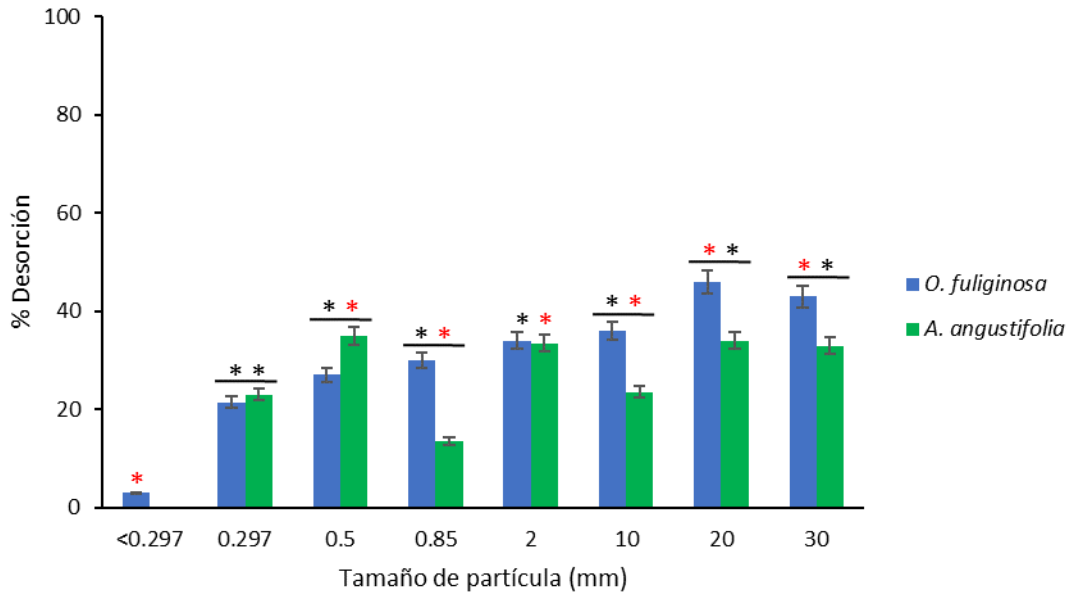


Figura 16. Desorción del Cr (III) sobre los diferentes biosorbentes. Comparación entre las 2 fibras por tamaño de partícula ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto al tamaño de partícula de las fibras utilizadas sobre los porcentajes de desorción del cromo, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar el mismo tamaño de partícula.

2.4.1.5 Adsorción de la mezcla de Cr, Cu, Fe y Mn

Para evaluar la capacidad de remoción de los metales en conjunto y saber si existe competencia entre ellos por ocupar los grupos funcionales expuestos de las fibras, se realizó un ensayo en donde se colocaron las dos fibras por separado, en una solución con una mezcla de los 4 metales. En la figura 17 se muestran los resultados obtenidos al llevar a cabo las pruebas de adsorción. Al estar en conjunto los cuatro metales, la adsorción no se lleva a cabo en la misma proporción que al estar de manera independiente, ya que existe competencia entre los sitios de unión de las fibras. En este caso se aprecia que la fibra de *O. fuliginosa* no presenta diferencias significativas en los porcentajes de adsorción del Cu, Fe y Mn; mientras que el porcentaje de adsorción para Cr, si mostró diferencias estadísticas. En el caso de las fibras de *A. angustifolia* se puede observar también una disminución en cuanto al porcentaje de adsorción al encontrarse los metales en conjunto. Para el caso del

Se pueden observar diferencias estadísticas significativas, al comparar su adsorción en la fibra con respecto a los otros metales que se encuentran en la mezcla; sin embargo, es importante señalar que este porcentaje de adsorción es menor al obtenido al remover únicamente este metal, lo cual podría deberse a que exista un mayor número de grupos funcionales que son afines a este ion metálico, por lo cual los porcentajes de remoción de los metales Mn, Cu y Cr se ven disminuidos.

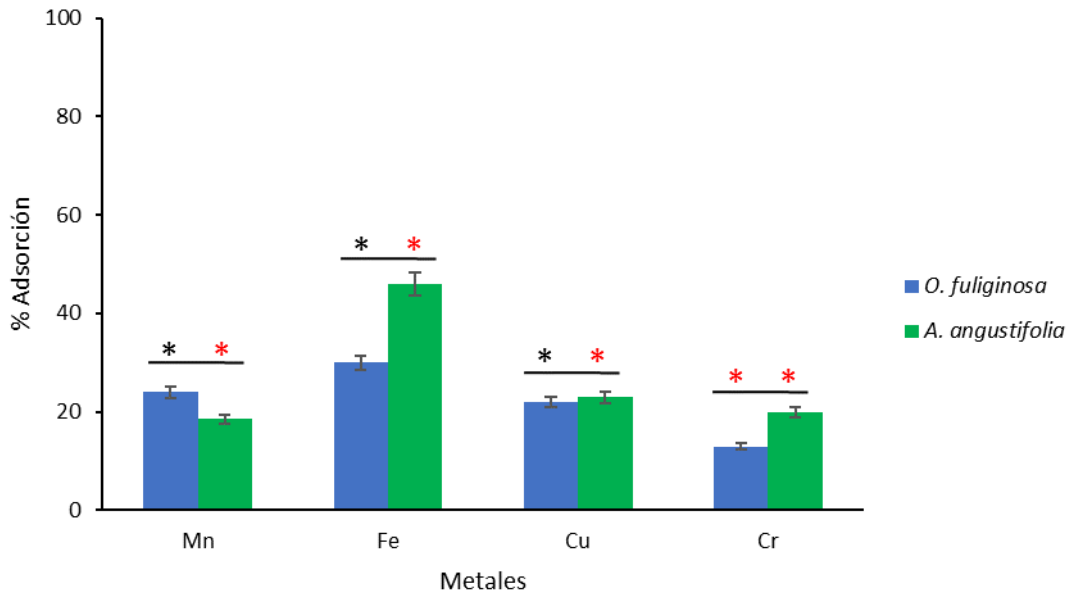


Figura 17. Adsorción de Mn (II), Fe (II), Cu (II) y Cr (III) sobre las dos fibras vegetales. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por cada metal ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la adsorción de los metales por parte de la misma fibra, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar la adsorción de el mismo metal.

Al realizar las pruebas de desorción, se observó que las fibras de *A. angustifolia* desorben en mayor proporción, comparativamente con las fibras de *O. fuliginosa*, tal y como se observó al estar expuestas a un solo metal, lo cual sugiere que hay competencias de los metales con los grupos funcionales, ya que puede intervenir el tipo de enlace que presentan y la abundancia de los grupos funcionales que cada una de las fibras podría

ejercer mayor o menor fuerza para retener los metales. Se encontraron diferencias significativas entre la desorción de los metales y entre las fibras (Figura 18).

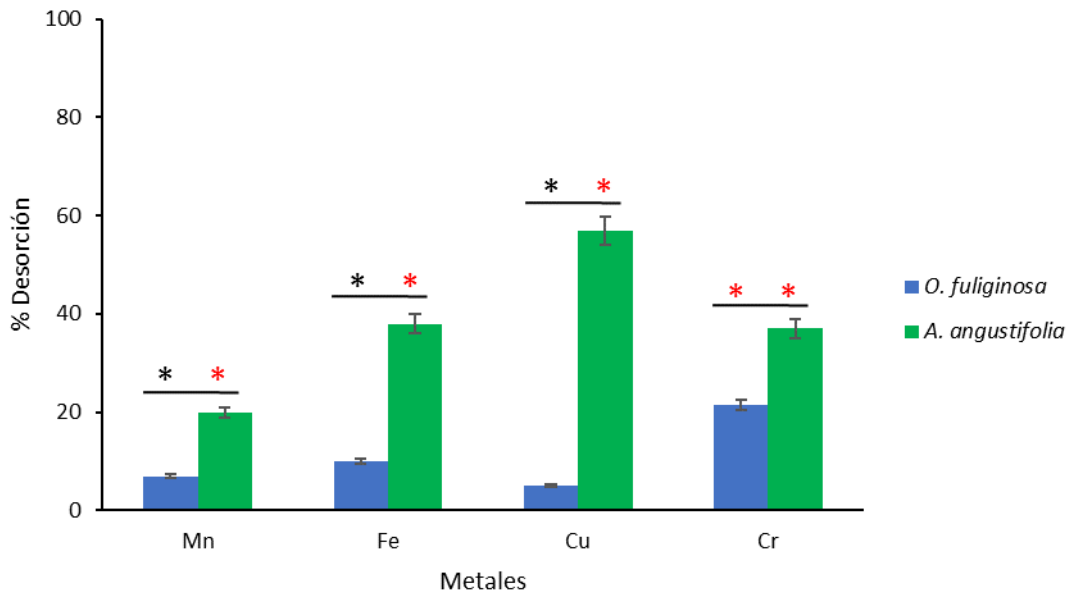


Figura 18. Porcentaje de la desorción de las fibras con la mezcla de Mn, Fe, Cu y Cr. El porcentaje fue calculado con base en el total adsorbido. Comparación entre las 2 fibras por cada metal ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la adsorción de los metales por parte de la misma fibra, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar la adsorción de el mismo metal.

Existen varios reportes como el de Nharingo *et al.*, (2015), en donde utilizaron fibras de *Opuntia ficus*, con diferente tamaño de partícula, para eliminar Pb de soluciones acuosas, en diferentes niveles de concentración. Los resultados concluyen que la eficiencia de remoción disminuye al aumentar el tamaño de partícula; además, los grupos funcionales se activan al disminuir el tamaño de partícula, ya que existe una mayor área de superficie en donde se pueden unir los iones metálicos (Yeneneh *et al.*, 2011). Otro trabajo es el de Vizcaíno & Fuentes (2015) en el que utilizaron las tunas de *Opuntia sp.* para eliminar Cd, Pb y Zn de soluciones acuosas. Los resultados obtenidos fueron porcentajes de remoción mayores al 95% para Pb y Cd, lo cual a pesar de que este estudio no se evaluaron la eficiencia de remoción de estos metales. Se muestra que las fibras de este género tienen un potencial

alto en la remoción de metales pesados. Asimismo, Barrera *et al.*, (2006) utilizaron la ectodermis de *Opuntia sp.* para eliminar Cd, Cr, Cu, Fe, Zn, Ni, y Pb de soluciones preparadas con diferentes concentraciones de estos metales. Dentro de sus resultados muestran porcentajes de remoción superiores al 95% excepto para el Zn que fue del 75%.

Por otra parte, también se han probado las fibras de *Agave sp.* para remover metales, por ejemplo, Cholico González *et al.*, (2020), usó el bagazo de agave para eliminar Pb, Cd y Zn a diferentes tamaños de partícula, obteniendo porcentajes de remoción superiores al 80%. Mientras tanto, Romero-González *et al.*, (2007) utilizó las fibras de Agave azul (*Agave tequilana* Weber) para eliminar Pb, que en tamaños de partícula pequeños obtuvo un porcentaje de remoción del 93%.

Sin embargo, hay que señalar que no todos los metales mostraron porcentajes altos de adsorción en tamaños de partícula pequeños y esto probablemente se deba a otros aspectos como: (1) el potencial redox, ya que es diferente para cada uno de los metales; (2) cambio en la configuración de la superficie del biosorbente; (3) algunas moléculas pueden ser demasiado grandes para entrar en poros tan pequeños (Shafiq *et al.*, 2018; Nguyen *et al.*, 2013).

2.4.2 CICLOS DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN DE Cd, Zn, Pb, Cu, Mn, Fe y Cr

Con la finalidad de conocer si las fibras pudieran ser empleadas para la recuperación de metales pesados, se realizaron ciclos de adsorción de los metales antes mencionados. Esto permitió evaluar la capacidad de adsorción de las fibras y conocer el tiempo y la eficiencia, para que puedan ser utilizadas en procesos de remoción de metales. En la figura 19 y 20 se muestran los diferentes ciclos de adsorción utilizando 7 metales pesados, con los cuales y se han realizado experimentos de adsorción/desorción con ambas fibras.

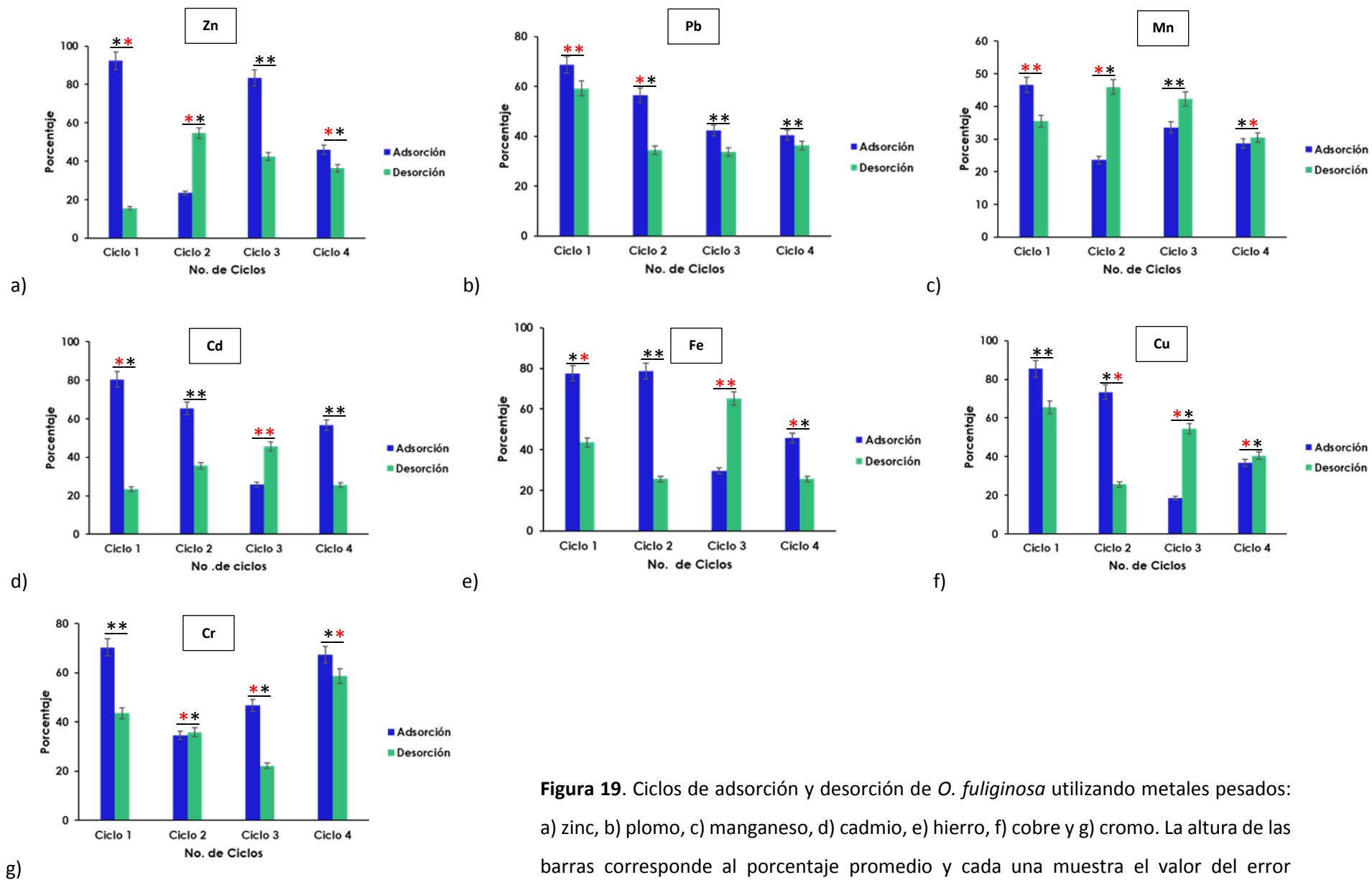


Figura 19. Ciclos de adsorción y desorción de *O. fuliginosa* utilizando metales pesados: a) zinc, b) plomo, c) manganeso, d) cadmio, e) hierro, f) cobre y g) cromo. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por ciclos ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas entre los ciclos de adsorción, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar un mismo ciclo.

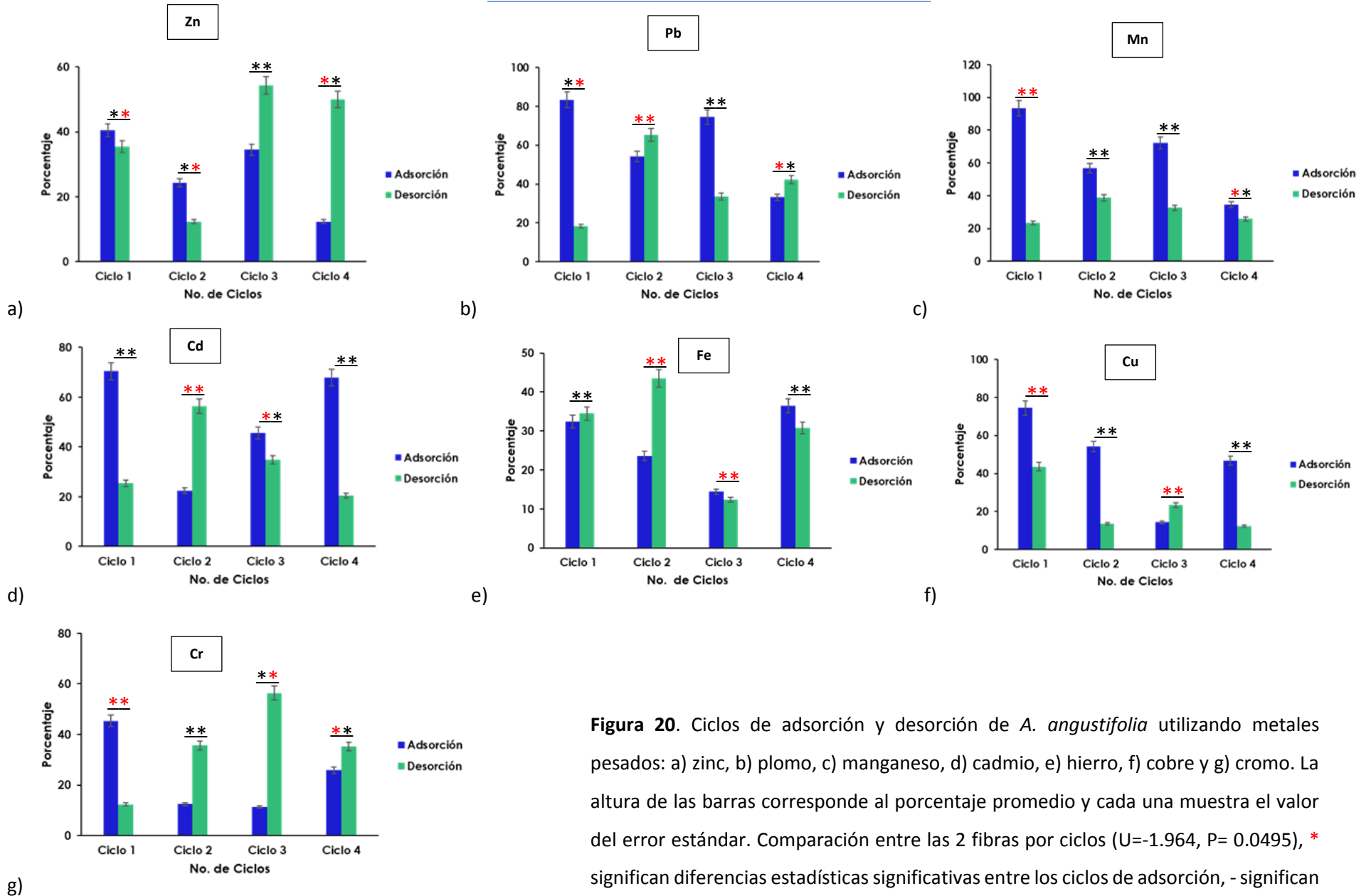


Figura 20. Ciclos de adsorción y desorción de *A. angustifolia* utilizando metales pesados: a) zinc, b) plomo, c) manganeso, d) cadmio, e) hierro, f) cobre y g) cromo. La altura de las barras corresponde al porcentaje promedio y cada una muestra el valor del error estándar. Comparación entre las 2 fibras por ciclos ($U=-1.964$, $P= 0.0495$), * significan diferencias estadísticas significativas entre los ciclos de adsorción, - significan diferencias estadísticas significativas entre ambas fibras al comparar un mismo ciclo.

De acuerdo con los resultados obtenidos por parte de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*, se observa que los porcentajes de adsorción varían dependiendo del ciclo en el que se encuentren; esto puede deberse a diversos factores tales como que los sitios de unión se encuentren activos, el acceso a otros sitios de unión que no haya sido ocupados dentro del ciclo anterior o bien la afinidad de los sitios por los metales. A su vez, se hace notar que el porcentaje de desorción, en su mayoría, aumenta conforme transcurren los ciclos. Sin embargo, la fibra de *Agave angustifolia* es aquella que desorbe en una mayor proporción.

En realidad, se cuenta con algunos trabajos en los que se emplean ciclos de adsorción para recuperar los metales adsorbidos. Uno de ellos es el realizado por Iqbal *et al.*, (2002), que utilizaron parte de la palmera *Livistona chinensis* para remover Pb, Ni, Cd, Cu, Cr y Zn y posteriormente recuperarlos al utilizar 3 ciclos de adsorción-desorción. Dentro de los resultados obtenidos se advierte que el porcentaje de metal removido no tuvo variaciones conforme el paso de los ciclos (mayor al 70% de remoción), a excepción del Cr, el cual mostró una disminución conforme el paso de los ciclos. Southichak *et al.*, (2006) evaluaron la eficiencia de remoción de Pb, Zn, Cd, Cu y Ni a través de ciclos de adsorción-desorción empleando como biosorbente el carrizo *Phragmites australis*. De acuerdo con los datos obtenidos ellos reportan que al paso de los ciclos la eficiencia de adsorción incrementa para todos los metales. Por otra parte, Kyzas (2012) empleó los residuos de café para remover Cu y Cr, en donde se evaluaron 10 ciclos de adsorción-desorción, llegando a la conclusión que el porcentaje de adsorción se ve disminuido conforme avanzan los ciclos. En nuestros resultados se muestra una disminución del porcentaje conforme pasan los ciclos, lo cual concuerda con lo señalado por Lata *et al.*, (2014), ya que ellos señalan que la capacidad de adsorción se ve disminuida en ciclos posteriores debido a que el adsorbato no se puede regenerar ya que existen vínculos muy fuertes con el metal.

De acuerdo con estos trabajos se muestra que las fibras no pierden su capacidad de remoción, sin embargo, estas desorciones se realizaron con ácidos, por lo cual nuestros resultados pueden diferir.

Con esto resultados se podría inferir que ambas fibras podrían ser utilizadas para la remoción y recuperación de los metales estudiados; sin embargo, las fibras de *O. fuliginosa* serían una mejor opción para este fin, ya que los porcentajes de desorción son bajos, es decir las uniones que se establecen entre los iones metálicos y los grupos funcionales de las fibras podrían ser más fuertes.

2.4.3 EQUILIBRIO DE BIOSORCIÓN

2.4.3.1 Isotermas de Langmuir El modelo de Langmuir es un modelo gas-sólido o líquido-sólido, en el cual la interacción entre los iones metálicos y la superficie del biosorbente se basa en fuerzas físicas (Vander Waals) y en su aplicación, se asume que la sorción ocurre en lugares específicos de la superficie del sorbente y que, además, una vez que el ion ocupa un lugar, no puede ocurrir posteriormente otra sorción en el mismo sitio (Dionisio, 2012).

La figura 21 muestra el ajuste de los datos de Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III) en base a las isotermas de Langmuir para las diferentes concentraciones ensayadas. En la tabla 11 se muestran los valores de los parámetros obtenidos de este modelo. Se observa que, para los cuatro metales estudiados, los resultados experimentales son aceptables debido al valor de r^2 obtenida por parte de *O. fuliginosa*.

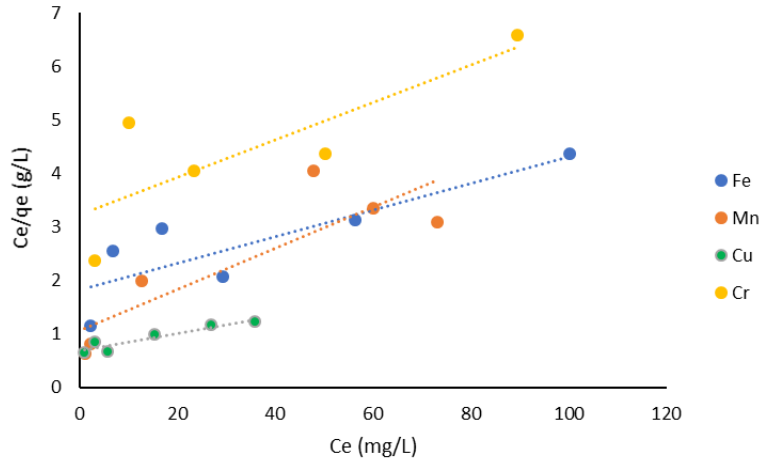


Figura 21. Ajuste de los datos obtenidos de acuerdo con el modelo de Langmuir, al adsorber Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III), utilizando como biosorbente *O. fuliginosa*. C_e = concentración de metal en la solución en equilibrio y q_e = metal adsorbido en las fibras en el equilibrio. Las unidades están dadas en miligramos/litro.

Tabla 11. Parámetros obtenidos con el modelo de Langmuir al utilizar los cuatro metales adsorbidos con *O. fuliginosa*.

METAL	q_m , mg/g	B, L/mg	r^2
Cu	53.92	0.027	0.8951
Fe	25.50	0.034	0.8909
Mn	19.63	0.055	0.8659
Cr	10.11	0.235	0.9568

q_m = Capacidad máxima de biosorción

b= Afinidad del sorbente por el sorbato

mg= Miligramo

g= Gramo

r^2 = Coeficiente de determinación

En la figura 22 se muestran los ajustes de las isothermas de Freundlich para los 4 metales antes mencionados. En la tabla 12 se muestran los parámetros obtenidos de dichas isothermas; en los resultados se muestra que el ajuste de los datos es mejor al utilizar este modelo, dado que el coeficiente de correlación es mayor.

Estos resultados reflejan que el comportamiento de la adsorción de los 4 metales es en forma de multicapa, dada para sólidos no porosos o con microporos.

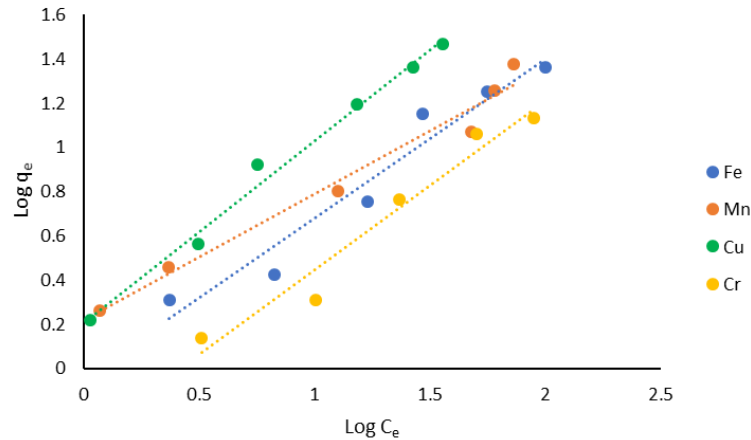


Figura 22. Ajuste de los datos obtenidos de acuerdo con el modelo de Freundlich, al adsorber Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III), utilizando como biosorbente *O. fuliginosa*. C_e= concentración de metal en la solución en equilibrio y q_e= metal adsorbido en las fibras en el equilibrio. Las unidades están dadas en miligramos/litro.

Tabla 12. Parámetros obtenidos con el modelo de Freundlich al utilizar los cuatro metales adsorbidos con *O. fuliginosa*.

METAL	k _f , (mg/g)·(L/mg) ^{1/n}	n	r ²
Cu	1.59	1.19	0.9858
Fe	1.55	1.68	0.9312
Mn	1.71	1.86	0.9858
Cr	0.48	1.31	0.9858

K_f= Capacidad de adsorción

n= Intensidad de adsorción

mg= Miligramo

g= Gramo

r²= Coeficiente de determinación

En cuanto a la figura 23, se observa el ajuste de los datos obtenidos al utilizar las isotermas de Langmuir con Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III) con *A. angustifolia* como

biosorbente. Los parámetros obtenidos de estas isotermas se muestran en la tabla 13, en donde se muestran que el coeficiente de correlación es mayor en Fe y Cu.

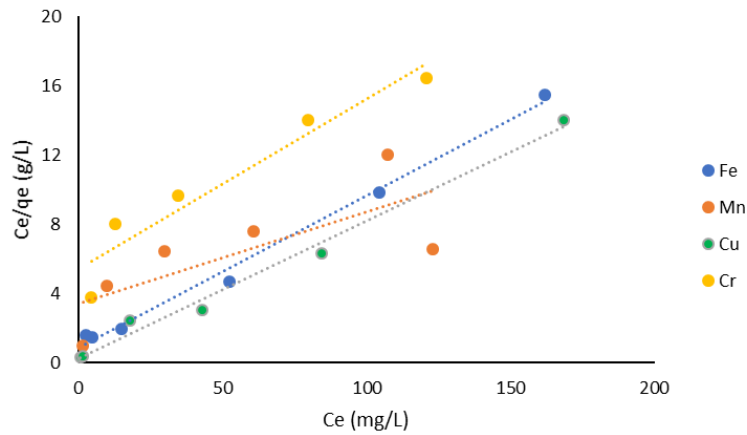


Figura 23. Ajuste de los datos obtenidos de acuerdo con el modelo de Langmuir, al adsorber Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III), utilizando como biosorbente *A. angustifolia*. C_e = concentración de metal en la solución en equilibrio y q_e = metal adsorbido en las fibras en el equilibrio. Las unidades están dadas en miligramos/litro.

Tabla 13. Parámetros obtenidos con el modelo de Langmuir al utilizar los cuatro metales adsorbidos con *A. angustifolia*.

METAL	q_m , mg/g	b , L/mg	r^2
Cu	14.51	0.148	0.9687
Fe	12.23	0.082	0.9868
Mn	11.06	0.035	0.9158
Cr	14.36	0.173	0.9158

q_m = Capacidad máxima de biosorción

b = Afinidad del sorbente por el sorbato

mg= Miligramo

g= Gramo

r^2 = Coeficiente de determinación

Por otra parte, se muestra la figura 24 en donde se observan las isotermas correspondientes al modelo de Freundlich para los 4 metales estudiados. En la tabla 14 se

pueden apreciar los parámetros obtenidos de dichas isothermas, además de los coeficientes de determinación en donde se puede apreciar que Mn y Cr fueron los que se ajustaron mejor a este modelo, debido a que su coeficiente fue mayor en comparación con el obtenido al ajustar los datos a la isoterma de Langmuir.

En este caso se puede concluir que la fibra de *A. angustifolia* adsorbe Fe y Cu en forma de monocapa debido a que la estructura del sólido es muy porosa o fina y ahí se pueden entrar grupos funcionales específicos para estos metales; mientras que Mn y Cr se adsorben en la fibra en forma de multicapa.

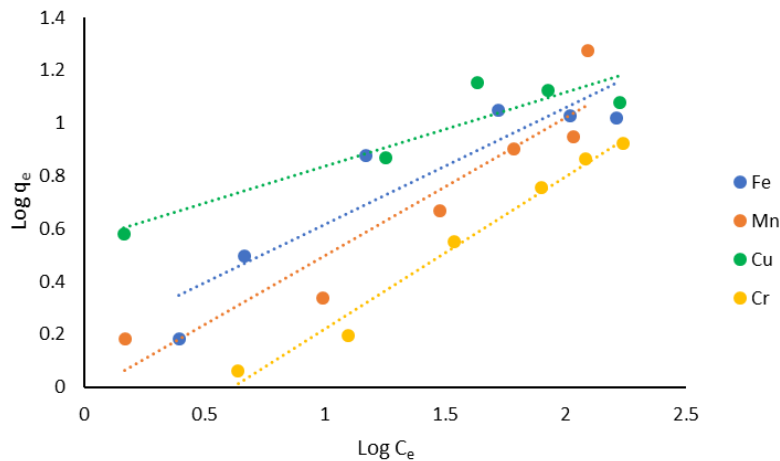


Figura 24. Ajuste de los datos obtenidos de acuerdo con el modelo de Freundlich, al adsorber Fe (II), Mn (II), Cu (II) y Cr (III), utilizando como biosorbente *A. angustifolia*. C_e = concentración de metal en la solución en equilibrio y q_e = metal adsorbido en las fibras en el equilibrio. Las unidades están dadas en miligramos/litro.

Tabla 14. Parámetros obtenidos con el modelo de Freundlich al utilizar los cuatro metales adsorbidos con *A. angustifolia*.

METAL	$k_f, (\text{mg/g}) \cdot (\text{L/mg})^{1/n}$	n	r^2
Cu	2.66	2.54	0.9561
Fe	1.29	1.94	0.8862
Mn	1.07	2.24	0.9359
Cr	0.43	1.71	0.9561

K_f = Capacidad de adsorción

n= Intensidad de adsorción

mg= Miligramo

g= Gramo

r^2 = Coeficiente de determinación

Al observar los resultados utilizando las fibras de *O. fuliginosa* se puede inferir que esta fibra adsorbe en forma de multicapa los metales, ya que al ajustarse los datos al modelo de Freundlich se asume que el proceso de adsorción tiene lugar en una superficie heterogénea (Akram *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2016; Dos-Santos *et al.*, 2011). Además, se puede asumir de los valores de $n > 1$, de este modelo indica que la adsorción se realizó de forma favorable y en una superficie heterogénea (Fernández-López *et al.*, 2014). Barka *et al.*, (2013) reportan que el modelo de Langmuir es aquel que mejor describe la adsorción de Pb y Cd al utilizar fibras de *Opuntia ficus indica*; a su vez, Fernández-López *et al.*, (2014) emplearon a la misma fibra para eliminar Cr (VI) y encontraron que la adsorción se realizaba en forma de monocapa, contrario a lo encontrado en este trabajo.

En cuanto a las fibras de *A. angustifolia*, se observó que Mn y Cr se adsorben en forma de multicapa; mientras que Fe y Cu son adsorbidos en forma de monocapa, ajustándose los datos de estos metales al modelo de Langmuir, indicando que en cada sitio no se puede unir más de un metal y que los sitios de unión en la superficie del biosorbente se encuentran limitados (Nikolic *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2016). Estos resultados sugieren que

ambos tipos de biosorción pueden existir bajo condiciones experimentales (Rosique *et al.*, 2016).

Esto se pueden comprobar con estudios como el de Hamissa *et al.*, (2010) en donde se utilizaron fibras de *Agave americana* para eliminar Cd y Pb y en donde los resultados obtenidos se ajustaron de manera satisfactoria al modelo de Langmuir y Freundlich con coeficiente de correlación mayores a 0.990. Dos-Santos *et al.*, (2011) utilizaron las fibras de *Agave sisalana* para remover Cd y Pb y en este estudio muestran que los datos se ajustan de manera más eficiente al modelo de Freundlich con coeficientes de 0.9667 y 0.9403. El trabajo realizado por de García-Reyes y Rangel-Méndez (2010) muestra que los datos se ajustan a ambos modelos al utilizar el bagazo de *Agave sp.* para remover Cr, sin embargo, ellos deciden aceptar el modelo de Langmuir, ya que este modelo predijo de una manera más eficiente los datos de adsorción. Un último ejemplo es el trabajo realizado por Marín-Allende *et al.*, (2016), donde se utilizó *Agave salmiana* para remover Cr (VI) del agua, los datos se ajustaron mejor al modelo de Freundlich con un coeficiente de correlación de 0.986, lo cual concuerda en lo encontrado en este trabajo.

2.5 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, en las pruebas de adsorción-desorción se observó que el Mn presenta un mayor porcentaje de adsorción (superior al 60%) por parte de *A. angustifolia*, al compararlo con los porcentajes de adsorción de *O. fuliginosa* (menores al 70%). Así mismo se visualizó que los tamaños más pequeños de partículas de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* se comportan de manera distinta, ya que la fibra de menor tamaño de *A. angustifolia* (0.297mm) fue aquella que adsorbió en una menor cantidad. Durante los experimentos de desorción se observaron diferencias estadísticamente significativas entre ambas fibras, siendo la fibra de *A. angustifolia* la que desorbe una menor cantidad de Mn.

Los resultados de Cu nos muestran que la fibra que presenta una mayor adsorción de este metal es *O. fuliginosa* en tamaños menores a 0.85 mm o bien a 3 cm, ya que el porcentaje de adsorción en los tamaños señalados es mayor al 85%. Además, se observó que esta fibra desorbe en una menor cantidad el metal (menor a 20%) independientemente del tamaño de la fibra a comparación de *A. angustifolia*, en donde el porcentaje máximo de desorción que se obtuvo fue del 60%.

El Fe presentó una mayor adsorción por parte de *O. fuliginosa*, en donde no se mostraron diferencias en cuanto a la biosorción en los diferentes tamaños de partícula, siendo estos porcentajes superiores al 80%. En cuanto a la desorción de este metal se pudo observar que esta misma fibra lo desorbe en una menor cantidad respecto a los porcentajes obtenidos por *A. angustifolia*; sin embargo, el porcentaje desorbido dependerá del tamaño de partícula utilizado.

Por su parte, al realizar los experimentos con Cr, se obtuvieron porcentajes de hasta el 70% de adsorción por parte de *O. fuliginosa* en tamaños ≤ 0.297 mm; mientras que en tamaños de 0.5 y 0.85 mm de *A. angustifolia* se llevó a cabo una adsorción de más

retenciones fuertes de los metales, del 60%. En cuanto a la desorción, *O. fuliginosa* presentó mayor desorción conforme aumentaba el tamaño de partícula; sin embargo, *A. angustifolia* presentó desorciones de hasta el 40% sin importar el tamaño de partícula.

Al estar los cuatro metales en conjunto se mostró competencia al unirse a los grupos funcionales de las fibras, sin embargo, al realizar la desorción se observó que las fibras de *A. angustifolia* desorben en mayor proporción.

Los ciclos de adsorción presentaron variaciones dependiendo del metal y el número de ciclo. Aunque los biosorbentes pudieron ser utilizados varios ciclos, las fibras fueron desorbiendo el metal en mayor cantidad, por lo cual se podría inferir que estos biosorbentes podrían ser ocupados para la recuperación de metales pesados y podrían ser utilizadas las mismas fibras hasta un total de 4 veces en una columna.

Las isothermas de Langmuir y Freundlich se utilizaron para conocer la forma en que los biosorbentes adsorben los metales; siendo las fibras de *Opuntia fuliginosa* aquellas que absorben los metales en forma de multicapa; sin embargo, en el caso de Cu y Fe son adsorbidos por *Agave angustifolia* en forma de monocapa, mientras que Mn y Cr se absorben en forma de multicapa.

2.6 LITERATURA CONSULTADA

- Acharya J., Kumar U. & Rafi P.M. (2018) Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified agricultural waste material as potential adsorbent- A review. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 8(3): 526-530.
- Ahmad M., Ahmed S., Swami B.L. & Ikram S. (2015). Adsorption of heavy metal ions: role of chitosan and cellulose for water treatment. *International Journal of Pharmacognosy*. 2(6):280-289.
- Akram M., Khan B., Imran M., Ahmad I., Ajaz H., Tahir M. & Samad Shah N. (2019). Biosorption of lead by cotton shells powder: characterization and equilibrium modelling study. *International Journal of Phytopharmacy* 21:138–144.
- Alfarra R.S., Ali N.E. & Yusof M.M. (2014). Removal of heavy metals by natural adsorbent. *International Journal of Biosciences*. 4:130–139.
- Ali R.M., Hamad H.A., Hussein M.M. & Malash G.F. (2016). Potential of using green adsorbent of heavy metal removal from aqueous solutions: adsorption kinetics, isotherm, thermodynamic, mechanism and economic analysis. *Ecological Engineering*. 91:317–332.
- Anastopoulos I. & Kyzas G.Z. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*. 209: 77-86.
- Barka N., Abdennouri M., El Makhfouk M. & Qourzal S. (2013). Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. *Journal Environmental of Chemical Engineering*. 1:144–149.
- Barrera H., Ureña-Núñez F., Bilyeu B. & Barrera-Díaz C. (2006). Removal of chromium and toxic ions present in mine drainage by ectodermis of *Opuntia*. *Journal of Hazard Materials*. 236(3):846–853.
- Cholico- González D., Ortiz N., Fernández A.M. & Chavez J. (2020). Adsorption behavior of Pb(II), Cd(II), and Zn(II) onto Agave bagasse, characterization, and mechanism. *ACS Omega*. 5:3302–3314.

- Dionisio E. (2012). Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación de cobre presente en residuos acuosos mediante biosorción. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Granada. Granada, España.
- Dos-Santos W.N., Cavalcante D.D., Da-Silva E.G.P., Das-Virgens C.F. & De-Souza F. (2011). Biosorption of Pb(II) and Cd (II) ions by *Agave sisalana* (sisal fiber). *Microchemical Journal*. 97:269–273.
- Fernández-López J.A., Angosto J.M. & Avilés M. (2014). Biosorption of hexavalent chromium from aqueous medium with *Opuntia* biomass. *The Scientific World Journal*. 2014:670249
- Flores Trujillo A.K.I., Mussali-Galante P., De Hoces M., Blázquez-GarcíaG., Saldarriaga-Noreña H.A., Rodríguez-Solís A., Tovar-Sánchez E., Sánchez-Salinas E. & Ortiz-Hernández M.L. (2020). Biosorption of heavy metals on *Opuntia fuliginosa* and *Agave angustifolia* fibers for their elimination from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 1-14.
- Flores-Trujillo A.K.I. (2016). Remoción de metales pesados del agua a través de procesos de biosorción. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- García-Reyes R.B. & Rangel-Mendez J.R. (2010). Adsorption kinetics of chromium (III) ions on agro-waste materials. *Bioresource Technology*. 101:8099–8108.
- Gunatilake S.K. (2015). Methods of removing heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*. 1(1): 2912-1309.
- Hamissa A.M.B., Lodi A., Sefen M., Finocchio E., Botter R. & Converti A. (2010). Sorption of Cd (II) and Pb(II) from aqueous solution onto *Agave americana* fibers. *Chemical Engineering Journal*. 159:67–74.
- Iqbal M., Saeed A. & Akhtar N. (2002). Petiolar felt-sheath of palm: a new biosorbent for the removal of heavy metals from contaminated water. *Bioresource Technology*. 81:151-153.
- Jain C.K., Malik D.S. & Yadav A.K. (2016). Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environmental Process*. 3(2):495–523.

- Kyzas G.Z. (2012). Commercial coffee wastes as materials for adsorption of heavy metals from aqueous solutions. *Materials*. 5(10): 1826-1840.
- Lata S., Singh P.K. & Samadder S.R. (2014). Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12: 1461-1478.
- Li P.S. & Tao H.C. (2015). Cell Surface engineering of microorganisms towards adsorption of heavy metals. *Journal Critical Reviews in Microbiology*. 41(2): 140-149.
- Marín-Allende M.D.J., Romero-Guzmán E.T., Ramírez-García J.J. & Reyes-Gutiérrez L.R. (2016). Chromium (VI) removal from aqueous medium by maize cane and agave bagasse biomasses. *Particulate Science and Technology*. 35:704–711
- Nguyen T.A.H., Ngo H.H., Guo W.S., Zhang J., Liang S., Yue Q.Y., Li Q. & Nguyen T.V. (2013). Applicability of agricultural waste and by products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource and Technology*. 148:574–585.
- Nharingo T., Zivurawa M.T. & Guyo U. (2015). Exploring the use of cactus *Opuntia ficus indica* in the biocoagulation-foculation of Pb(II) ions from wastewaters. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12(12):3791– 3802.
- Nikolic M., Robert R.J. & Girish C.R. (2019). The adsorption of cadmium, nickel, zinc, copper and lead from wastewater using tea fiber waste. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 14(19):7272–7284
- Ozdes D., Gundogdu A., Keme B., Duran C., Kucuk M. & Soylak M. (2014). Assessment of kinetics, thermodynamics and equilibrium parameters of Cr(VI) biosorption onto *Pinus brutia* Ten. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 92(1):139–147.
- Paul E.D., Nwoken N.C. & Anumonye F.U. (2018). Biosorption of heavy metals (Cd²⁺, Cr³⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺) from aqueous solution onto Activated Carbon prepared from chicken feather. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*. 6(4): 194-205.
- Plaza Cazón J. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.

- Romero-González J., Parra-Vargas F., Cano-Rodríguez F., Rodríguez E., Ríos-Arana J., Fuentes-Hernández R. & Ramírez-Flores J. (2007). Biosorption of Pb(II) by *Agave tequilana* Weber (agave azul) biomass. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 6(3):295-300.
- Rosique M., Angosto J.M., Guibal E., Roca M.J. & Fernández-López J.A. (2016). Factorial design methodological approach for enhanced cadmium ions bioremoval by *Opuntia* biomass. *Clean-Soil Air Water*. 44:959–966.
- Salman M., Athar M. & Farooq U. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 14(2): 211- 228.
- Shafq M., Alazba A.A. & Amin M.T. (2018). Removal of heavy metals from wastewater using date palm as a biosorbent: a comparative review. *Sains Malays*. 47:35–49.
- Southichak B., Nakano K., Nomura M., Chiba N. & Nishimura O. (2006). *Phragmites australis*: A novel biosorbent for the removal of heavy metals from aqueous solution. *Water Research*. 40: 2295-2302.
- Vizcaíno L. & Fuentes N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 25(1):43–60
- Wang X., Pei Y., Lu M., Lu X. & Du X. (2015). Highly efficient adsorption of heavy metals from wastewaters by Graphene oxide-ordered mesoporous silica materials. *Journal of Materials Science*. 50(5): 2113-2121.
- Yeneneh A.M., Maitra S. & Eldemerdash V. (2011). Study on biosorption of heavy metals by modified lignocellulosic waste. *Journal of Applied Sciences*. 11:3555–3562

CAPÍTULO 3

**ESTUDIOS DE BIOSORCIÓN
EN CONTINUO**

CONTENIDO

3.1. INTRODUCCIÓN.....	94
3.2. OBJETIVOS	95
3.3 METODOLOGÍA	96
3.3.1 Biosorbentes	96
3.3.2 Preparación de las soluciones de metales	96
3.3.3 Ensayos de biosorción en continuo.....	96
3.3.4 Modelado mediante diseño factorial completo y optimización de las variables operacionales	99
3.3.5 Modelado de las curvas de ruptura	100
Modelo de Adams – Bohart	100
Modelo de Thomas	101
Modelo de Yoon y Nelson.....	101
Modelo Dosis- Respuesta	102
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	103
3.4.1 Estudio del efecto de los principales factores en la biosorción de metales pesados en columna de lecho fijo.....	103
3.4.1.1 Efecto del caudal.....	103
3.4.1.2 Efecto de la concentración inicial	107
3.4.1.3 Efecto de la masa	110
3.4.2 Modelado mediante diseño factorial completo y optimización usando las funciones obtenidas.....	114
3.4.2.1 Diagramas de Pareto	114
3.4.2.2 Diagrama de Efectos Principales.....	121
3.4.2.3 Análisis de regresión matemática para las respuestas de capacidad de biosorción y el porcentaje de metal retenido.....	125
3.4.2.4 Análisis de la varianza (ANOVA).....	125
3.4.3 Ajuste de los datos a modelos matemáticos.....	126
3.4.3.1 Modelo Adams Bohart	126
3.4.3.2 Modelo Thomas	126
3.4.3.3 Modelo Yoon Nelson	127
3.4.3.4 Modelo Dosis-Respuesta	128
3.5 CONCLUSIONES	129
3.6 LITERATURA CITADA.....	130

3.1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de agua por metales pesados ha sido un problema a nivel mundial de manera reciente, debido a su toxicidad, abundancia y persistencia en el ambiente (Islam *et al.*, 2015). A pesar de que algunos metales son esenciales para realizar procesos fisiológicos, una cantidad mayor de estos puede tener efectos negativos en los organismos (Chowdhury *et al.*, 2016).

El comportamiento de los metales en el agua se debe a diversos factores como es la composición del sustrato, del sedimento que se encuentra suspendido y la química del agua; ya que al transportarse los metales pesados pueden sufrir varios cambios en su especiación debido a fenómenos como disolución, precipitación, sorción y complejación (Wu *et al.*, 2016; Islam *et al.*, 2015).

En la remoción de iones metálicos del agua se han empleado diversas tecnologías. La biosorción es un método no convencional en el que se utilizan materiales biológicos, lo cual permite la disminución de costos; además de que es un método efectivo en la adsorción de metales presentes en agua que tengan niveles traza de metales sobre otros métodos como: la filtración por membrana, evaporación, adsorción con carbón activado e intercambio iónico (Loiacono *et al.*, 2018). Esta técnica hace uso de biosorbentes, los cuales están presentes en la naturaleza y son utilizados en diferentes formas, como lo son los residuos vegetales y forestales. Por lo general se utiliza biomasa inactivada para eliminar los iones metálicos del agua, aunque también emplea microorganismos debido a las propiedades que presentan como es su crecimiento a altas concentraciones, pH, temperatura y eficiencia en la captación de metales (Jain *et al.*, 2016).

Los materiales vegetales constituidos por celulosa son muy eficientes en la biosorción de metales pesados. En diferentes estudios han utilizados diversos materiales para la remoción de metales pesados entre los que se incluyen semillas, hojas, tallos y

cáscaras de diferentes frutos (Jain *et al.*, 2016; Rao & Rehman, 2012; Moghadam *et al.*, 2013; Feng *et al.*, 2011), los cuales son utilizados por su bajo costo, alta eficiencia y posibilidad de regeneración y reuso para recuperar iones metálicos, que podrían ser reutilizados (Srivastava *et al.*, 2015).

3.2. OBJETIVOS

- Realizar estudios de biosorción en continuo, evaluando dicho proceso a través de diferentes modelos y con los biosorbentes empacados en columnas.
- Seleccionar las mejores condiciones de operación de la columna, que incremente la eficiencia de remoción de metales pesados del agua por las fibras vegetales.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Biosorbentes

O. fuliginosa fue recolectada en Tlaquiltenango, Morelos. El material fue lavado y secado en una estufa a (30°C); posteriormente se prosiguió a su trituration y se eligió el tamaño 0.275 mm como el óptimo para los ensayos de biosorción en continuo.

Las fibras de *A. angustifolia* se obtuvieron de la recolección de pencas de ejemplares que se encuentra en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Este material se lavó y dispuso a su secado para continuar con su trituration a tamaños de 0.275 mm y ser utilizado en este proceso.

3.3.2 Preparación de las soluciones de metales

Se utilizaron dos concentraciones diferentes de Cd(II), Cr(III), Cu(II), Fe(II), Mn(II), Pb(II) y Zn(II) (50 y 100 mg/L), que fueron preparadas a partir de sales de nitrato de cadmio tetrahidratado ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), sulfato de cromo ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato de cobre (CuSO_4), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato de manganeso (MnSO_4), nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) y sulfato de zinc monohidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

3.3.3 Ensayos de biosorción en continuo

Los experimentos de biosorción en columna de lecho fijo, se realizaron de acuerdo con la metodología empleada por Almendros (2016) en donde se utilizó una columna de vidrio con un diámetro interno de 1 cm y una longitud de 23 cm. Dicha columna fue empaquetada con una cantidad conocida de biosorbentes (1 y 2 gramos). El relleno de biosorbente se sujetó entre dos algodones pequeños para evitar su posible arrastre. Para permitir la entrada de un flujo uniforme dentro de la columna, se colocaron perlas de vidrio de 5 mm de diámetro en el interior de esta.

Las soluciones preparadas de los metales se pasaron a través de la columna, se utilizó una bomba peristáltica en modo de flujo ascendente que garantizara el flujo (2 y 4

ml/min), a temperatura constante (25°C) (figura 25). A la salida de la columna, se tomaron muestras en diferentes intervalos de tiempo: durante la primera hora cada 5 minutos y posteriormente cada 15 min por un tiempo total de operación que varió dependiendo de la cantidad de biosorbente y flujo utilizado. Las muestras se analizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica, para obtener la concentración de metales. Estos ensayos se llevaron a cabo para cada metal, de manera independiente.



Figura 25. Preparación de la columna de lecho fijo con *Opuntia fuliginosa*.

A partir de los resultados, se construyeron curvas de ruptura experimentales. En la figura 26 se muestra una curva de ruptura teórica típica de un proceso de este tipo.

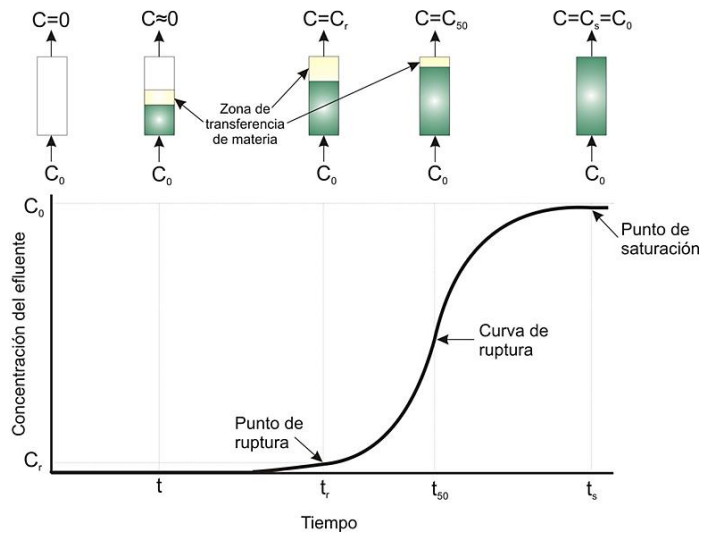


Figura 26. Representación teórica de una curva de ruptura típica (Almendros, 2016).

Cuando el volumen de la solución comienza a fluir a través de la columna, la zona de transferencia de masa varía desde el 0% de concentración de metal en la entrada, correspondiente al biosorbente libre de soluto, hasta el 100% de la concentración de metal, correspondiente a la saturación total (Calero *et al.*, 2010).

El análisis de los datos obtenidos en la columna y su evaluación se realizaron mediante las siguientes ecuaciones:

- **Volumen del efluente (Vef) en mL:**

$$V_{ef} = Q \cdot t_{total}$$

Q= caudal volumétrico en ml/min.

t_{total}= tiempo total en min.

- **Masa total de metal adsorbido (el área bajo la curva de ruptura) (q_{total}) en mg:**

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} CR dt$$

CR=concentración del metal retenido en mg/L.

- **Cantidad total de iones metálicos enviados a la columna m_{total} en mg:**

$$m_{total} = \frac{Ci \cdot Qt}{1000}$$

- **Metal total retenido (%R) en %:**

$$\% R = \frac{q_{total}}{m_{total}} 100$$

- **La cantidad de metal adsorbido en el equilibrio o capacidad de biosorción (q_e) en mg de metal biosorbido/g de biosorbente:**

$$q_e = \frac{q_{total}}{m}$$

m = masa del biosorbente en g.

- **Concentración de metal en el equilibrio (C_e) en mg/L:**

$$C_e = \frac{m_{total} - q_{total}}{V_{ef}} 1000$$

3.3.4 Modelado mediante diseño factorial completo y optimización de las variables operacionales

El diseño factorial permite identificar qué factor o factores tienen mayor peso, en un diseño experimental (Box *et al.*, 1978; citado por Almendros, 2016).

Se tomaron como variables independientes, el caudal, la concentración inicial de Cd(II), Cr(III), Cu(II), Fe(II), Mn(II), Pb(II) y Zn(II) y la masa de biosorbente, mientras que las

otras variables como el tamaño de partícula y la temperatura (25°C) permanecieron constates. Las respuestas examinadas fueron la capacidad de biosorción (q_e), concentración de metal en disolución al alcanzar el equilibrio (C_e), volumen del efluente (V_{ef}), porcentaje de metal retenido (R), masa total del metal adsorbido (q_{total}) y cantidad de iones enviados a la columna (m_{total}). Se estudiaron tres factores y dos niveles para cada factor, es decir, un total de 8 experimentos por metal. Los valores de los tres factores y de los dos niveles para *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* se muestran en la tabla 15.

Tabla 105. Valores y niveles de los parámetros operacionales para *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*

Factores	Niveles	
	-1	1
X₁: Caudal volumétrico, ml/min	2	4
X₂: Masa del biosorbente, g	1	2
X₃: Concentración inicial del metal, mg/L	50	100

3.3.5 Modelado de las curvas de ruptura

Las curvas de ruptura determinadas a partir del diseño factorial se modelaron mediante el uso de varios modelos matemáticos como: Adams-Bohart, Thomas, Yoon y Nelson y Dosis-Respuesta, con la finalidad de predecir el comportamiento dinámico de la columna y permitir la estimación de algunos coeficientes cinéticos (Tenorio-Rivas, 2006; Almendros, 2016); además de ser modelos ampliamente utilizados para el proceso de biosorción. A continuación, se muestran las ecuaciones que utilizan los modelos antes mencionados.

Modelo de Adams – Bohart

Este tipo de modelaje supone que la velocidad de sorción es proporcional a la capacidad de residual del sólido y a la concentración de la especie retenida, además es

utilizado para describir la parte inicial de la curva de ruptura. El desarrollo de dicho modelo se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{C_i} = e^{K_{AB} C_i t - \frac{K_{AB} N_0 Z}{V}}$$

k_{AB} = Constante cinética en L/mg·min

N_0 = Máxima capacidad de sorción volumétrica en mg/L

C = Concentración de soluto en la fase líquida en mg/L

C_i = Concentración inicial de metal en la disolución en mg/L

V = Velocidad lineal del fluido en cm/min

Z = altura de relleno en cm

Modelo de Thomas

El modelo es de los más empleados para describir de manera general el comportamiento de biosorción en columnas de lecho fijo. Dentro de sus limitaciones se encuentra que al ser derivado de una cinética de segundo orden puede conducir a errores cuando se es utilizado para modelar procesos de sorción en condiciones específicas.

$$\frac{C}{C_i} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{Th}}{Q}(q_0 m - C_i V_{ef})\right)}$$

K_{Th} = la constante cinética de Thomas en mL/min·mg

q_0 = concentración máxima de soluto en la fase sólida en mg/g

Modelo de Yoon y Nelson

El modelo asume que la velocidad que disminuye la probabilidad de adsorción de cada una de las moléculas del biosorbente es proporcional a la probabilidad de adsorción del biosorbente a la probabilidad de que no se adsorba. El modelaje es de los menos complicados ya que no requiere características específicas del sorbente o de las propiedades físicas de la columna de lecho fijo.

$$\frac{C_i}{C} = \frac{1}{1 + e^{K_{YN}(\tau - t)}}$$

K_{YN} = la constante de proporcionalidad de Yoon y Nelson en min⁻¹

τ = tiempo requerido para retener el 50% del adsorbato inicial en min

Modelo Dosis- Respuesta

Es utilizado para describir diferentes procesos en donde se representa la dosis – respuesta en porcentaje de la máxima respuesta posible. Para poder aplicar este tipo de modelo se debe de saber la respuesta esperada cuando se alcanza la saturación y la concentración indicada a la cual se produce la mitad de la respuesta máxima.

$$\frac{C}{C_i} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_i V_{ef}}{q_0 m}\right)^a}$$

a = constante del modelo

q_0 = concentración máxima del soluto en fase sólida, mg/g

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la metodología anteriormente descrita.

3.4.1 Estudio del efecto de los principales factores en la biosorción de metales pesados en columna de lecho fijo

Se ha estudiado el efecto de los principales factores que afectan al proceso de biosorción y se ha aplicado un diseño factorial completo para saber cuál es el factor o factores, que tienen más influencia en él.

3.4.1.1 Efecto del caudal

Primeramente, se analizó el efecto del caudal en las columnas. Los parámetros restantes se mantuvieron constantes y los valores fueron los siguientes: 2 concentraciones iniciales de los metales Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu (50 y 100 mg/L) y 2 masas de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* (1 g, equivalente a una altura de relleno de 4.5 cm y 2 g, con una altura de relleno de 10 cm, aproximadamente). Para los experimentos realizados, el t=0 se asignó a la salida de solución de la columna, con el objetivo de que todos ellos tengan el mismo punto de referencia.

Las curvas de ruptura para los dos caudales (2 y 4 mL/min) para los seis metales estudiados (Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu) utilizando *O. fuliginosa* con los parámetros antes descritos, se muestran en la figura 27.

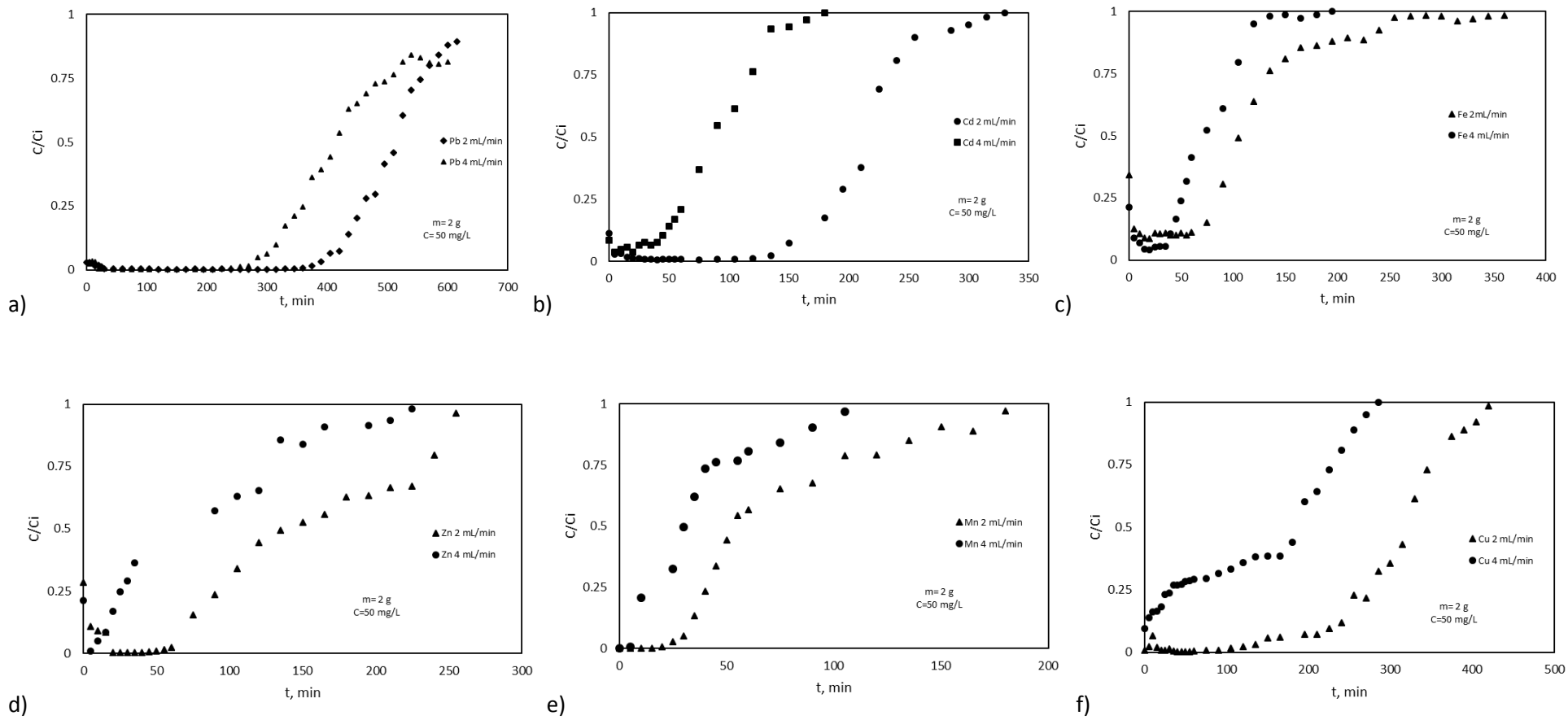


Figura 27. El efecto del caudal en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa*: a) columna de Pb masa 2 g y concentración 50 ppm, b) columna de Cd masa 2 g y concentración 50 ppm, c) columna de Fe masa 2 g y concentración 50 ppm, d) columna de Zn masa 2 g y concentración 50 ppm, e) columna de Mn masa 2 g y concentración 50 ppm y f) columna de Cu masa 2 g y concentración 50 ppm. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

En el caso de las columnas con los seis metales, se observó que la retención aumenta cuando el caudal disminuye, alcanzándose en las dos primeras columnas por parte de los metales Cd, Fe, Zn, Mn y Cu su saturación con los dos diferentes caudales. Además, las figuras muestran que las columnas de estos cinco metales son aquellas que se saturan antes a comparación del plomo, utilizando las mismas condiciones. Este comportamiento puede deberse a que cuando el caudal de efluente es bajo, los iones metálicos tienen más tiempo de contacto con el biosorbente, lo que conlleva una mayor retención de estos (Almendros, 2016).

Sin embargo, con un aumento del caudal, los resultados indican que la capacidad de adsorción alcanzaría el valor de equilibrio más rápido, lo cual causa un efecto negativo en la eficiencia de transferencia de los iones metálicos. Resultados similares fueron obtenidos por otros autores en la biosorción de metales sobre otros materiales biosorbentes (Farooq *et al.*, 2013, Han *et al.*, 2006, Hasan *et al.*, 2009).

La figura 28 muestran el comportamiento del caudal utilizando como biosorbente *A. angustifolia*, el cual es similar a lo dicho anteriormente, ya que al utilizar un caudal más pequeño se llega al equilibrio en un mayor tiempo y por lo tanto se tiene una mayor retención de los metales; sin embargo, en el caso de Zn y Cu se observó un efecto contrario, ya que esta fibra llega a la saturación de manera más pronta con un caudal más pequeño.

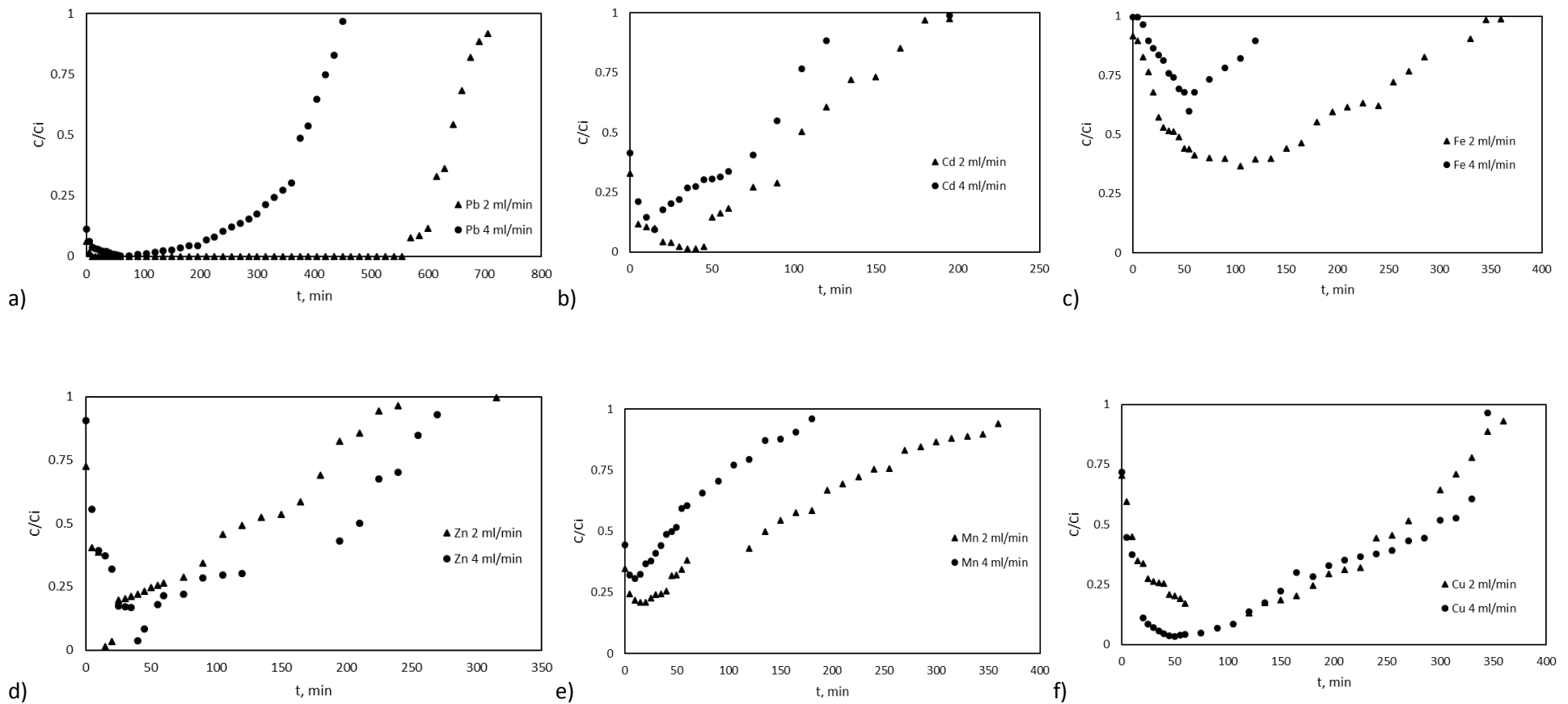


Figura 28. El efecto del caudal en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *A. angustifolia*; a) columna de Pb masa 2 g y concentración 50 ppm, b) columna de Cd masa 2 g y concentración 50 ppm, c) columna de Fe masa 2 g y concentración 50 ppm, d) columna de Zn masa 2 g y concentración 50 ppm, e) columna de Mn masa 2 g y concentración 50 ppm y f) columna de Cu masa 2 g y concentración 50 ppm. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

3.4.1.2 Efecto de la concentración inicial

El efecto de la concentración se analizó utilizando los mismos biosorbentes y los seis metales antes mencionados. Para ello, se realizaron experimentos manteniendo el resto de los parámetros de operación constantes (caudal y masa del biosorbente) y dos concentraciones iniciales de metal (50 y 100 mg/L). De acuerdo con lo visto en otros estudios se eligieron los valores de caudal 2 mL/ min y 4 mL/min y masa de biosorbente 1g y 2g. Los resultados obtenidos al utilizar *O. fuliginosa* se muestran en la figura 29.

Se observa que, cuando aumenta la concentración inicial los metales estudiados, el tiempo de ruptura es menor, y se alcanza antes la saturación de la columna. La figura muestra también que el proceso de saturación al utilizar Pb es más lento comparado con los demás metales.

En el caso de la figura 30, se muestran los resultados al utiliza las fibras de *Agave angustifolia*, en donde al utilizar los 6 metales se llega a la saturación del biosorbente; sin embargo, al igual que en las fibras de *O. fuliginosa*, el Pb es aquel que tarda más en saturarse, llegando casi a los 700 min (poco más de 11 horas).

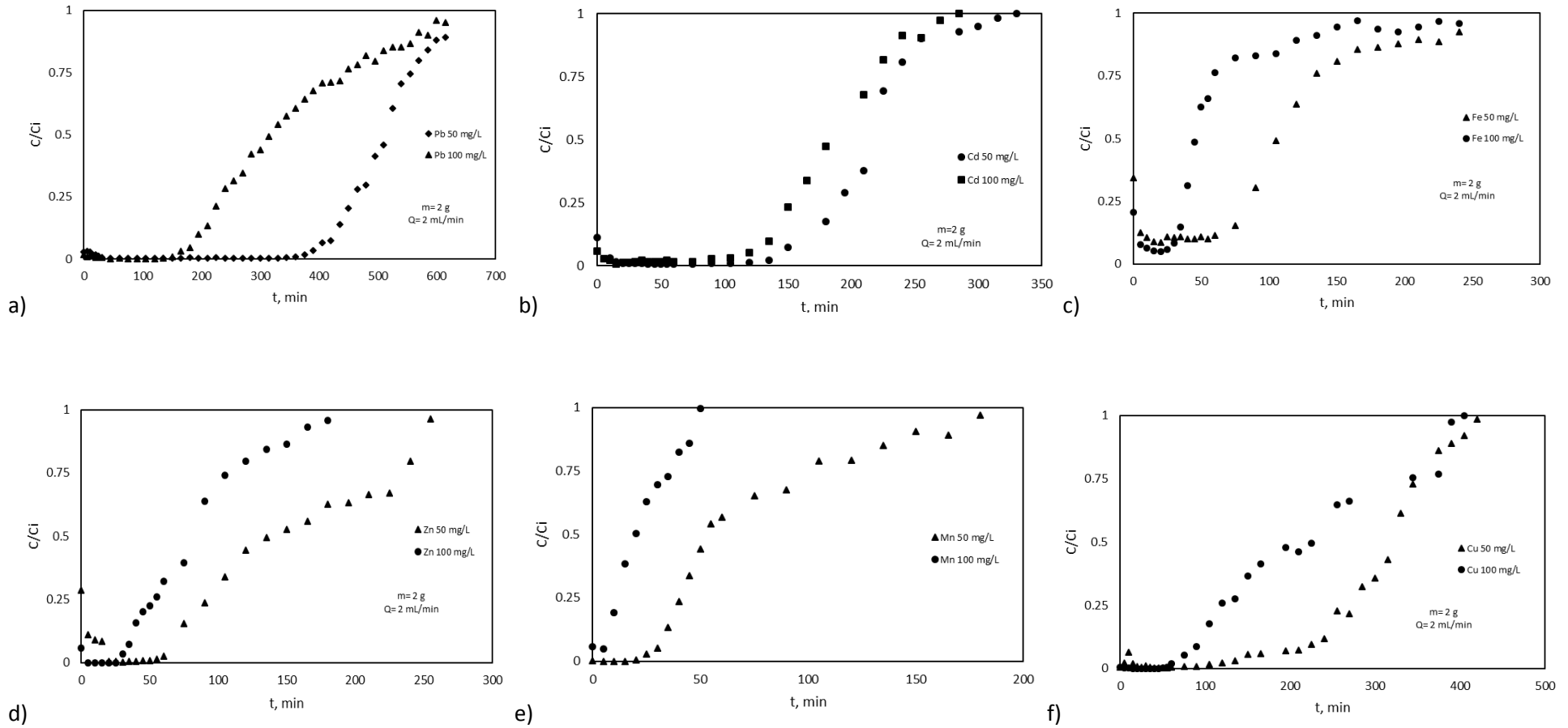


Figura 29. El efecto de la concentración en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa*; a) columna de Pb masa 2 g y caudal 2 mL/min, b) columna de Cd masa 2 g y caudal 2 mL/min, c) columna de Fe masa 2 g y caudal 2 mL/min, d) columna de Zn masa 2 g y caudal 2 mL/min, e) columna de Mn masa 2 g y caudal 2 mL/min y f) columna de Cu masa 2 g y caudal 2 mL/min. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

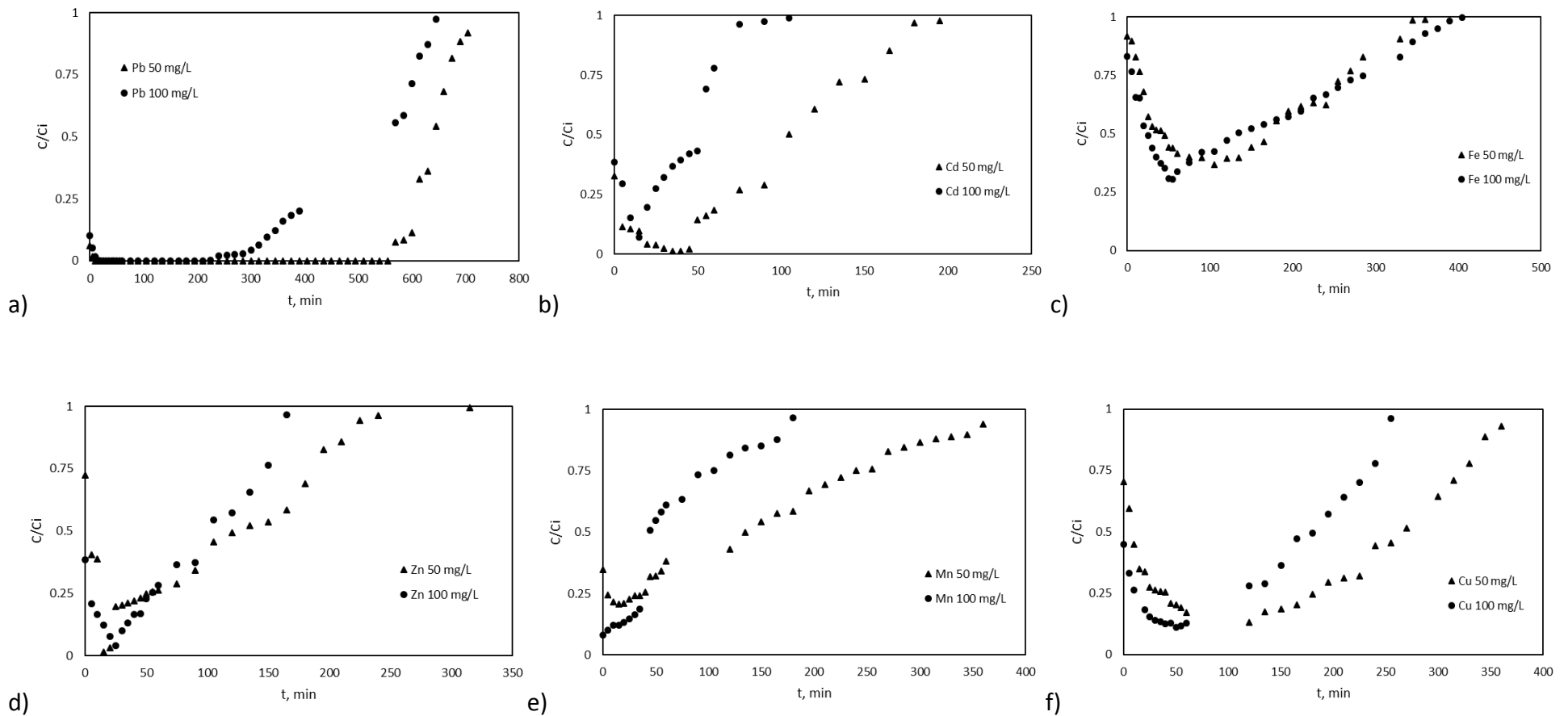


Figura 30. El efecto de la concentración en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *A. angustifolia*; a) columna de Pb masa 2 g y caudal 2 mL/min, b) columna de Cd masa 2 g y caudal 2 mL/min, c) columna de Fe masa 2 g y caudal 2 mL/min, d) columna de Zn masa 2 g y caudal 2 mL/min, e) columna de Mn masa 2 g y caudal 2 mL/min y f) columna de Cu masa 2 g y caudal 2 mL/min. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

3.4.1.3 Efecto de la masa

La retención de metales en la columna de relleno depende entre otros factores, de la cantidad de biosorbente usada (o altura de relleno de la columna).

Por lo tanto, se estudió el efecto que tiene la masa de biosorbente sobre el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu. Para ello, se realizaron experimentos con dos cantidades de biosorbente, equivalentes a dos alturas de relleno, 1 g y 2 g de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* (equivalentes a 4.5 cm y 10 cm respectivamente). De acuerdo con resultados previos, el resto de las condiciones experimentales se mantuvieron. Los resultados utilizando *O. fuliginosa* se muestran en la figura 31.

Por último, se observa también que la pendiente de las curvas de ruptura del biosorbente aumenta con el aumento de la concentración inicial de metal. Como la pendiente de la curva de ruptura es una medida de la eficiencia de la columna para alcanzar la saturación, de nuevo se pone de manifiesto que se consigue antes la saturación de la columna con concentraciones iniciales de metal más altas (100 mg/L). Observaciones similares han realizado algunos autores, que describen también una curva de ruptura más “empinada” para concentraciones iniciales más elevadas del metal estudiado (Calero *et al.*, 2013, Singh *et al.*, 2012).

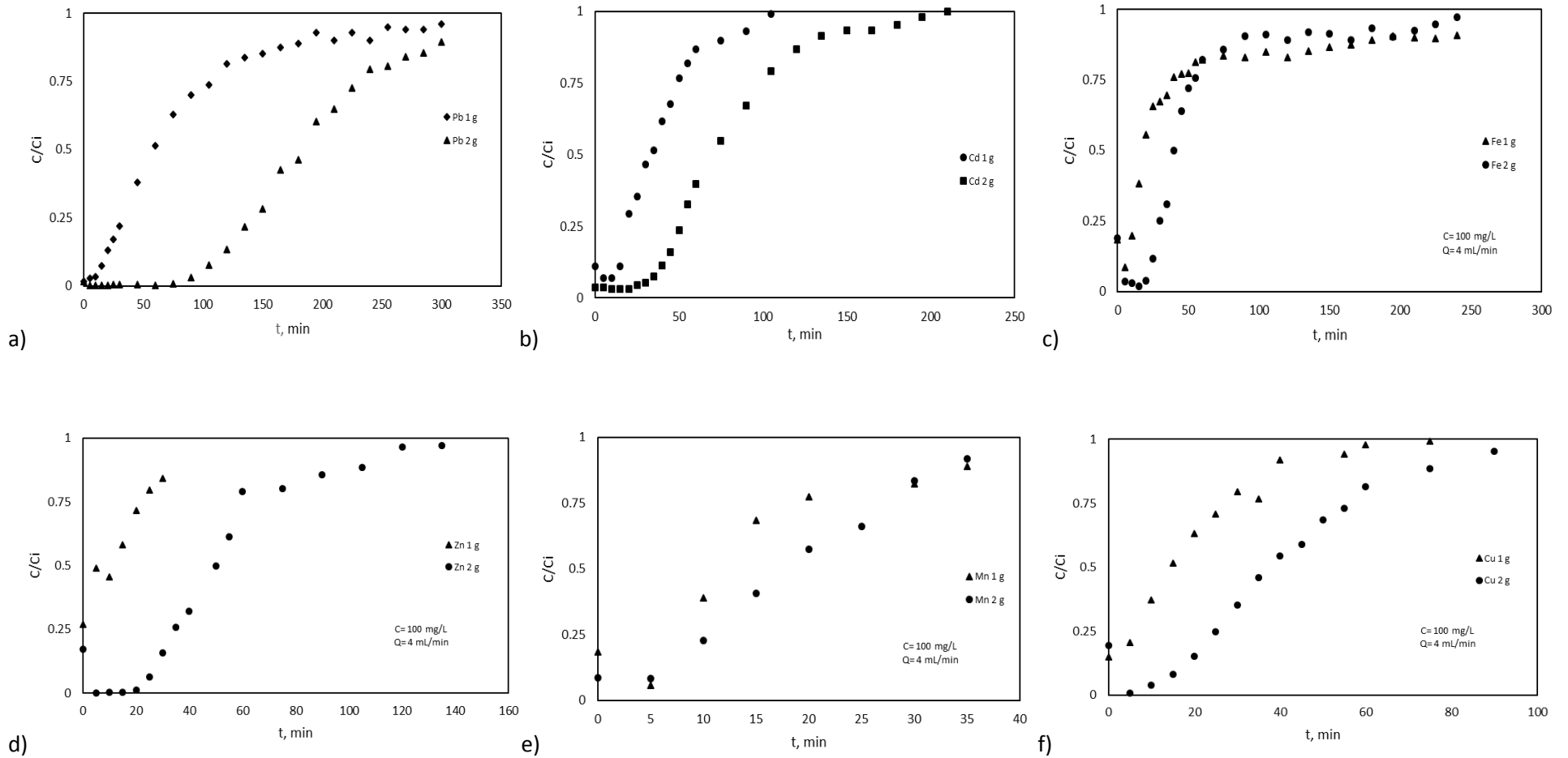


Figura 31. El efecto de la masa en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa*; a) columna de Pb concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, b) columna de Cd concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, c) columna de Fe concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, d) columna de Zn concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, e) columna de Mn concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min y f) columna de Cu concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

Los resultados obtenidos al emplear los seis metales teniendo como biosorbente las fibras de *A. angustifolia* se muestran en la figura 32. En las curvas de ruptura se puede observar que las concentraciones mayores llegan al equilibrio en un menor tiempo debido a que el punto de ruptura ocurre de manera más rápida. Además de que se puede inferir que al utilizar una concentración menor (50 mg/L), se cuenta con un menor número de iones que pueden ser retenidos por los grupos funcionales de la fibra.

La figura 32 muestra que un incremento en la altura de relleno supone un aumento de la retención de los metales por el biosorbente. Cuando la masa del biosorbente aumenta, los metales tienen más tiempo de contacto con el biosorbente, lo que conlleva una mayor eficiencia en la retención de iones en la columna. Además, el tiempo requerido para alcanzar la ruptura o la saturación aumenta también con el aumento de la altura de relleno en ambos biosorbentes.

Del mismo modo, el volumen tratado hasta la ruptura o la saturación aumenta cuando la altura de relleno es mayor. Esto se debe a que cuando la columna tiene una mayor altura de relleno, contiene más cantidad de biosorbente y, por tanto, más sitios para capturar a los iones metálicos. Sin embargo, cuando la columna tiene menos altura de relleno, se satura antes debido a la menor disponibilidad del sólido y que existen menos sitios para la unión del metal. Se han hecho observaciones similares por otros autores, en el estudio de la biosorción de diferentes metales en columna de relleno (Calero *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2007; Oguz & Ersoy, 2014; Singh *et al.*, 2012).

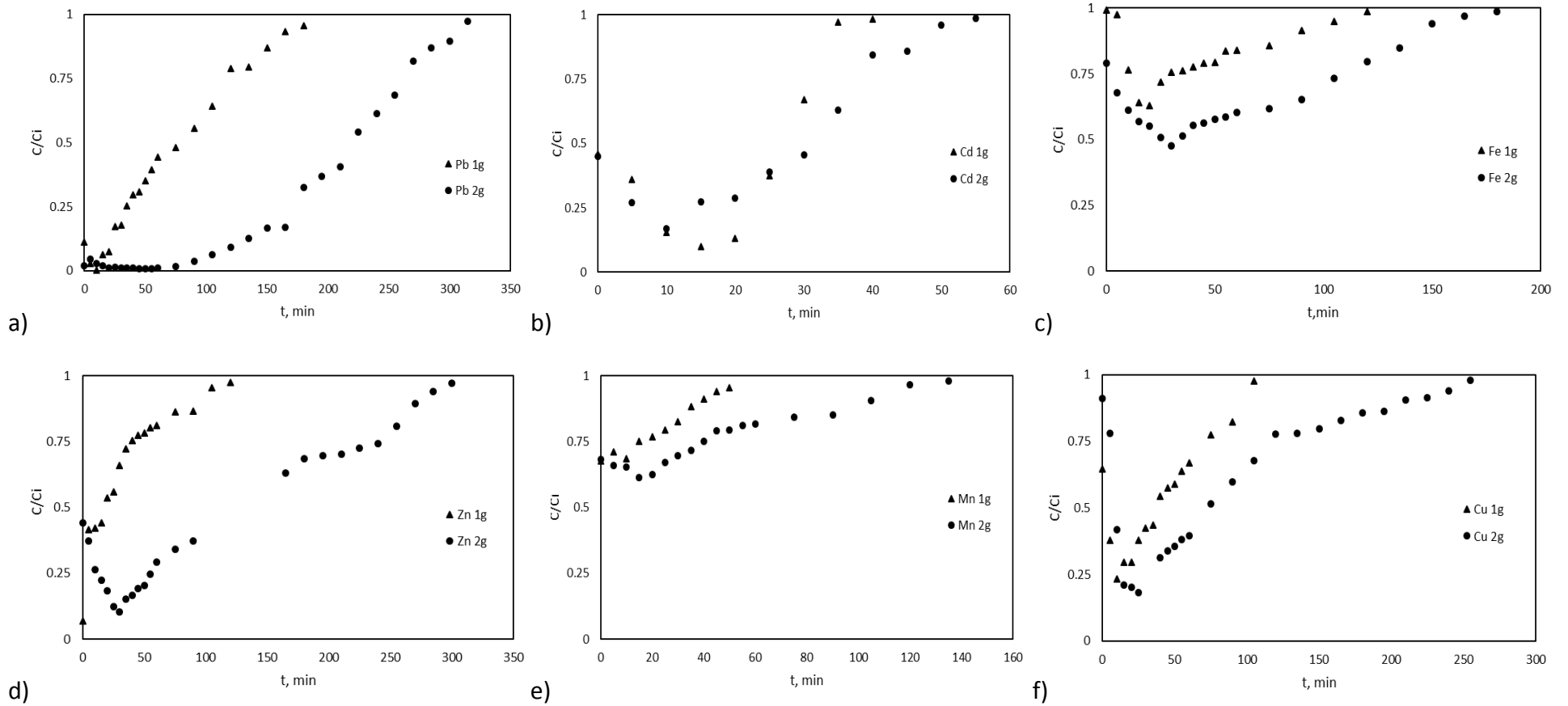


Figura 32. El efecto de la masa en la biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *A. angustifolia*; a) columna de Pb concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, b) columna de Cd concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, c) columna de Fe concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, d) columna de Zn concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min, e) columna de Mn concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min y f) columna de Cu concentración 100 mg/L y caudal 4 mL/min. C/C_i =concentración inicial del efluente sobre la concentración del efluente en el tiempo.

En la figura 32 se observa el mismo comportamiento antes descrito al utilizar *O. fuliginosa* para remover los seis metales. Además, se puede observar que el punto de ruptura ocurre en un menor tiempo al utilizar una cantidad de masa menor (1g) por lo cual la fibra llega al equilibrio más pronto. También se observa que, la pendiente de la curva de ruptura disminuye con el aumento de la altura de relleno. El valor de la pendiente de la curva de ruptura refleja la velocidad con que se alcanza la saturación de la columna y, en consecuencia, una menor pendiente supone una ampliación de la zona de transferencia de materia.

3.4.2 Modelado mediante diseño factorial completo y optimización usando las funciones obtenidas

Una vez analizado el efecto de todos los factores en el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu se aplicó el diseño factorial para obtener las condiciones óptimas de operación para *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Los valores naturales y los valores codificados de los distintos factores (caudal, masa de biosorbente y concentración inicial de los metales estudiados) con los valores de las dos respuestas estudiadas: capacidad de biosorción (q_{eq}) y porcentaje de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu retenido (R) (Tabla A1, ANEXO 1).

3.4.2.1 Diagramas de Pareto

El análisis de Pareto permite determinar la influencia de cada variable en el factor de respuesta y se determina calculando el porcentaje del efecto de cada término en la respuesta (Ponnusami *et al.*, 2007). Los resultados obtenidos para las dos respuestas estudiadas y para cada variable desde el análisis Pareto para Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu se muestran en la figura 33.

En el diagrama Pareto, la línea vertical indica estadísticamente la mínima magnitud del efecto significativo y la longitud de las columnas horizontales son proporcionales al grado de significancia de cada efecto (Almendros, 2016). Los factores negativos indican un efecto desfavorable o antagónico en la respuesta, mientras que los factores positivos

indican un efecto favorable o sinérgico en la misma (Liu *et al.*, 2011).

La figura 33 pone de manifiesto la importancia de los términos A, B y C (concentración, caudal y masa del biosorbente) en las dos respuestas (ambos lineal y cuadrático), indicando el alto efecto que tienen estos tres factores utilizando *O. fuliginosa* en el proceso de biosorción con Pb (II), Cd (II), Fe (II), Zn (II), Mn (II) y Cu (II). De este modo, para el plomo el caudal tiene un efecto positivo sobre la capacidad de biosorción y un efecto negativo en el porcentaje de retención del metal, en el caso de la concentración tiene un efecto negativo para ambas repuestas; mientras que la masa presenta un efecto positivo para la capacidad de biosorción y el porcentaje de plomo retenido. Las interacciones entre efectos tienen una contribución diferente, mientras que el término cuadrático AB tienen un alto efecto en la respuesta de la capacidad de biosorción presentando un efecto negativo y un efecto positivo en el porcentaje de retención, las interacciones BC y AC, no muestran influencia en el porcentaje de retención, sin embargo, dichas interacciones poseen un efecto positivo en cuanto a la capacidad de biosorción del plomo.

En el caso del Cd, se observó que los términos A y B (concentración y caudal) influyen de manera importante en la capacidad de biosorción; ya que la concentración influye de manera positiva y el caudal de manera negativa en el proceso. En el caso de las interacciones, solo AC mostró tener un efecto positivo en la biosorción del Cd. Con respecto al porcentaje de metal retenido se observó que los tres términos A, B y C (concentración, caudal y masa), influyen de manera importante en la retención del metal, ya que A y B tienen un efecto negativo, mientras que C influye de manera positiva. Por otra parte, interacciones como BC y AC también mostraron efectos importantes (negativo y positivo, respectivamente) en la retención del Cd.

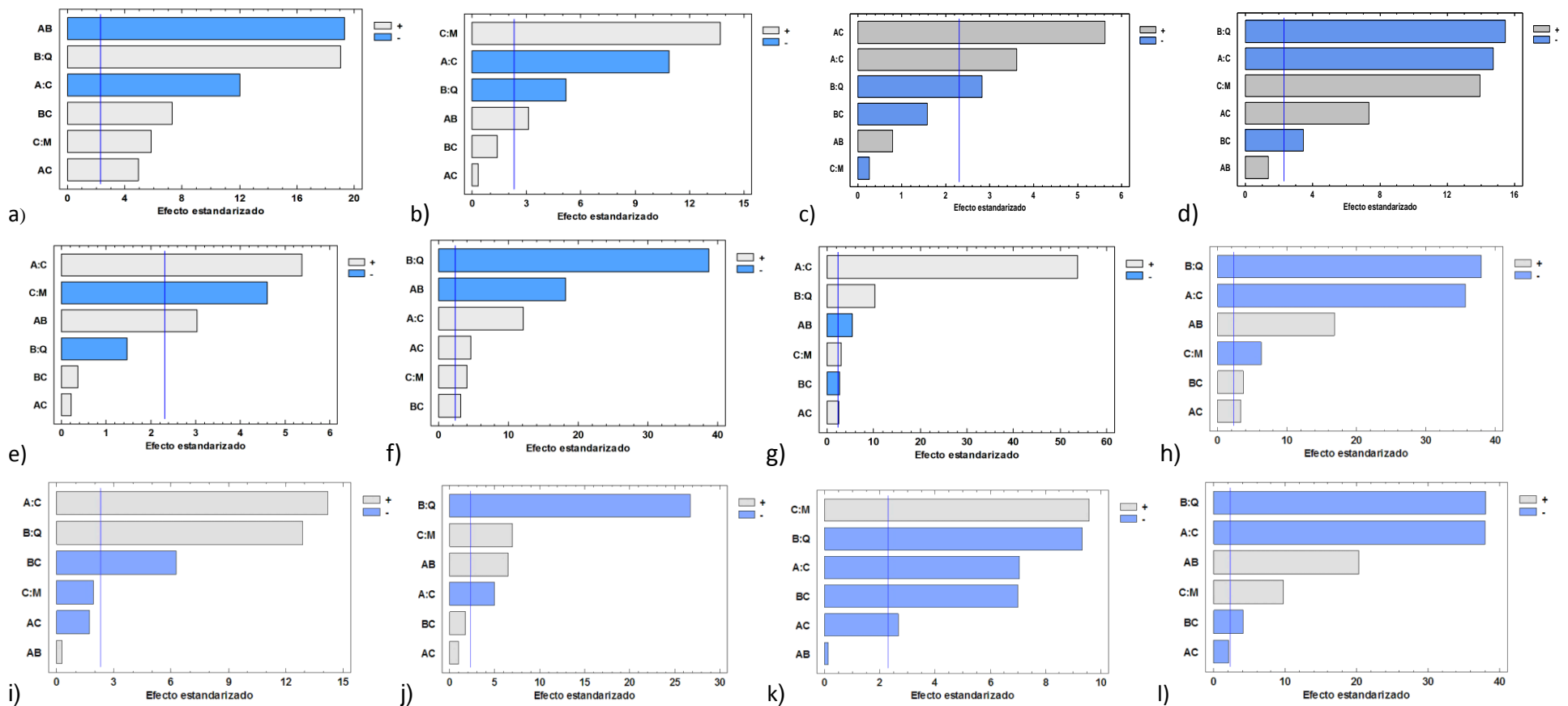


Figura 33. Diagramas de Pareto estandarizado de ambas respuestas en fibras de *O. fuliginosa*: a) capacidad biosorción de Pb (II), b) porcentaje de Pb (II) retenido, c) capacidad biosorción de Cd (II), d) porcentaje de Cd (II) retenido, e) capacidad biosorción de Fe(II), f) porcentaje de Fe (II) retenido, g) capacidad biosorción de Zn (II), h) porcentaje de Zn (II) retenido, i) capacidad biosorción de Mn (II), j) porcentaje de Mn (II) retenido, k) capacidad biosorción de Cu (II) y l) porcentaje de Cu (II) retenido.

A su vez, se puede visualizar que los términos A y C (concentración y masa) tienen un efecto importante en la capacidad de biosorción del Fe. En esta misma figura se puede observar que la concentración juega un efecto positivo, mientras que la masa tiene un efecto negativo. La única interacción que tuvo un efecto positivo fue AB. Para la retención de hierro los términos A, B y C (concentración, caudal y masa) tienen un papel importante; la concentración y la masa tienen un efecto positivo, en comparación del caudal que el efecto es negativo. Además, las interacciones también tienen diferentes efectos, ya que en BC y AC el efecto es positivo y en AB es negativo.

Por otra parte, se visualizó que los términos A, B y C (concentración, caudal y masa) tienen un efecto importante en la capacidad de biosorción del Zn. Se puede observar que los tres parámetros juegan un efecto positivo. La interacción AC tuvo un efecto positivo en esta respuesta, mientras que en las dos restantes el efecto es negativo. Para la retención de Zn los términos A, B y C (concentración, caudal y masa) tienen un papel importante; ya que tienen un efecto negativo significativo. Siendo todas las interacciones aquellas que tienen el efecto positivo.

Los términos A y B (concentración y caudal) que se observan en la figura 33 tienen un efecto positivo en la capacidad de biosorción del Mn, mientras que la masa no juega un papel importante en este tipo de respuesta. Sin embargo, la interacción BC tiene un efecto negativo estadísticamente significativo; mientras que el parámetro de la masa y las interacciones AC y AB no intervienen de manera significativa en esta respuesta. Para el porcentaje de retención se puede visualizar que los tres términos A, B y C (concentración, caudal y masa) tienen un efecto significativo en esta respuesta, siendo el caudal y la concentración quienes tienen un efecto negativo, mientras que, al incrementar la cantidad de masa, el efecto es positivo. En este caso solo la interacción AB interviene de manera positiva en la retención de manganeso.

En cuanto a la respuesta de capacidad de biosorción de Cu se observó que los términos A, B y C (concentración, caudal y masa) tienen un efecto significativo en esta respuesta, siendo la masa quien interviene de manera positiva, mientras que el caudal y la concentración lo hacen de manera negativa. En cuanto a las interacciones se visualizó que

las interacciones BC y AC tienen un efecto negativo significativo. La respuesta referente al porcentaje de retención del cobre señala que parámetros como concentración y caudal y la interacción BC juegan un papel negativo; en cambio la masa y la interacción AB lo hacen de manera positiva.

Por otra parte, la figura 34 muestra los comportamientos de los metales en las dos diferentes respuestas al utilizar como biosorbente *A. angustifolia*.

La capacidad de biosorción del Pb se vio afectada de manera negativa y significativa por el caudal al ser aumentado siendo la concentración inicial, la masa y sus interacciones, factores que no intervienen en el mejoramiento de esta respuesta. En cuanto a la respuesta del porcentaje de remoción de Pb por esta fibra se puede observar que tanto el caudal como la concentración inicial repercuten de manera negativa y significativa esta respuesta al ser aumentados, mientras que un aumento en la masa afecta de manera positiva la retención de este metal.

Además, se puede observar el comportamiento de los factores para la respuesta de la capacidad de biosorción de Cd. En ella se puede apreciar que los tres factores y que sus interacciones no intervienen en la capacidad de biosorción del metal. Por otra parte, para la respuesta del porcentaje de retención de Cd se observó que al aumentar el Caudal y la Concentración inicial se vio afectada esta respuesta, pues ambos factores influyeron de manera negativa y significativa, destacando que tanto la masa como las interacciones de estos tres factores no influyeron en dicha respuesta.

La capacidad de biosorción al utilizar Fe se vio afectada de manera negativa y significativa al aumentar el caudal; mientras que factores como la concentración inicial de Fe y la masa, así como sus interacciones, no intervinieron en esta respuesta. En cambio, al aumentar el caudal y la concentración de este metal se vio afectado el porcentaje de retención; la masa y las interacciones de estos tres factores no intervinieron en dicha respuesta.

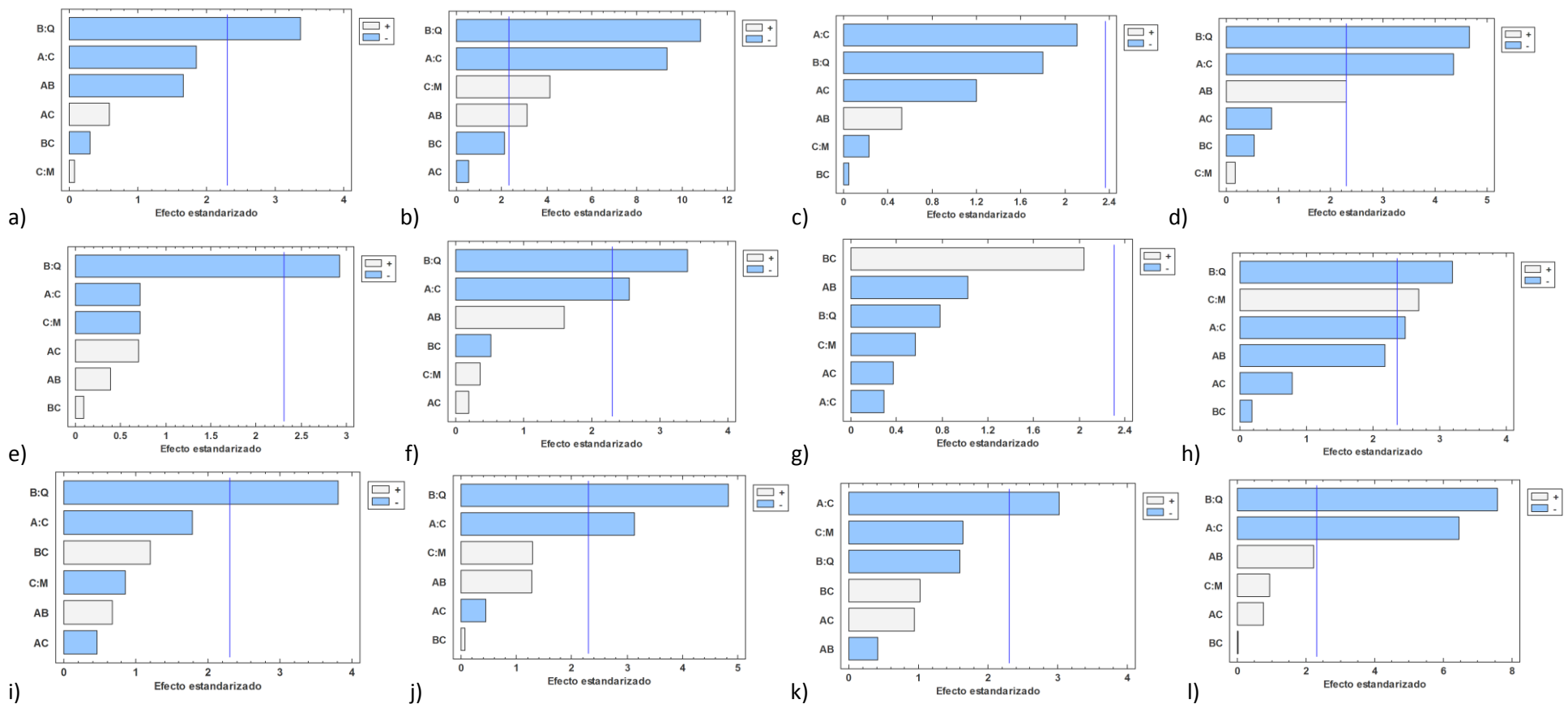


Figura 34. Diagramas de Pareto estandarizado de ambas respuestas en fibras de *A. angustifolia*: a) capacidad biosorción de Pb (II), b) porcentaje de Pb (II) retenido, c) capacidad biosorción de Cd (II), d) porcentaje de Cd (II) retenido, e) capacidad biosorción de Fe(II), f) porcentaje de Fe (II) retenido, g) capacidad biosorción de Zn (II), h) porcentaje de Zn (II) retenido, i) capacidad biosorción de Mn (II), j) porcentaje de Mn (II) retenido, k) capacidad biosorción de Cu (II) y l) porcentaje de Cu (II) retenido.

En el caso de la capacidad de biosorción para Zn no se encontró que alguno de los tres factores (concentración inicial, caudal y masa) al incrementarse, tenga algún efecto en esta respuesta, mientras que el porcentaje de retención se ve afectado de manera negativa y significativa por el caudal y la concentración inicial. Sin embargo, la masa afectó de manera significativa y positiva dicha respuesta al ser incrementada, mientras que las interacciones de estos factores no intervinieron ni afectaron la retención de Zn.

Para la capacidad de biosorción de Mn, esta respuesta se ve afectada de manera negativa y significativa al incrementar el caudal, mientras que los otros dos factores (concentración y masa), así como sus interacciones no intervienen en dicha respuesta. En cuanto a la retención de este metal se ve afectada de manera negativa y significativa por el caudal y la concentración inicial al ser incrementados, ya que disminuye el porcentaje retenido en la fibra.

Por último, se puede visualizar que al incrementar la concentración inicial del Cu se observa un efecto negativo y significativo en ambas respuestas (capacidad de biosorción y retención del metal), mientras que al incrementar el caudal la respuesta que se vio afectada es el porcentaje de retención. La masa y las interacciones no presentaron ningún efecto al incrementarse en ambas respuestas.

Existen trabajos en donde se han probado otros factores, uno de ellos es el realizado por Tejada-Tovar *et al.*, (2020) en donde evalúan la concentración de Ni (II), la temperatura y la masa (residuos de Ñame) para evaluar la capacidad de biosorción del biosorbente. Los resultados mostraron que un incremento en la masa y temperatura influían de manera negativa, es decir la capacidad de biosorción disminuía, mientras que un incremento en la masa favorecía a la respuesta. Otro ejemplo es lo reportado por Villabona-Ortiz *et al.*, (2020), en donde evalúan el efecto de la temperatura y la cantidad de biosorbente para la remoción de Cr (VI) utilizando residuos de plátano (*Dominico harton*), en donde se muestra que estos parámetros, al incrementarse, tienen un efecto positivo y significativo, ya que la respuesta se ve incrementada. Tejada-Tovar *et al.*, (2018), evaluaron también la cantidad de biosorbente (cáscara de cacao), el flujo y la concentración para la remoción de Cd, sus resultados muestran que el flujo y la concentración, al incrementarse, son afectados de

manera negativa y la cantidad de biosorbente de manera positiva, siendo los factores concentración y cantidad de biosorbente aquellos que influyen de manera significativa la remoción de Cd. La remoción de Ni y Pb utilizando la cáscara de limón fue evaluada por Tejada-Tovar *et al.*, (2020b), en donde emplearon factores como temperatura y cantidad de biosorbente. Este último factor, al incrementarse influyó de manera positiva para la remoción de Ni y Pb; sin embargo, la temperatura afecta de manera significativa y negativa a esta respuesta al remover Ni, mientras que al incrementarse este factor el Pb es removido en mayor proporción. Un último ejemplo es el realizado por Almendros *et al.*, (2015), en donde evaluaron la capacidad de biosorción y el porcentaje de Ni (II) removido al utilizar como biosorbentes la cáscara de piña y la poda de olivo. En este caso los factores a estudiar fueron la masa, concentración de metal y el caudal. En el caso de cáscara de piña, se observó que la concentración y el caudal influyen de manera positiva y significativa en la capacidad de biosorción, por otra parte, estos dos factores afectan de manera negativa y significativa el porcentaje de remoción del metal, mientras que la masa influye de manera positiva y significativa la misma respuesta. En el caso de la poda de olivo, se visualiza que para la capacidad de biosorción, factores como el caudal y la concentración influyen de manera positiva al aumentar esta respuesta, mientras que, por otra parte, estos dos factores, influyen de manera negativa. El factor masa influyó positivamente al porcentaje de remoción, es decir, un aumento en concentración y caudal disminuiría el porcentaje de remoción de Ni. Sin embargo, un aumento en la masa favorecía a esta respuesta. Estos resultados son comparables con lo reportado en este trabajo, ya que el proceso de biosorción es muy complejo e implica que, para muchos factores, dependiendo de cómo afecten otras variables el proceso, los parámetros pueden influenciar positiva o negativamente la respuesta de salida.

3.4.2.2 Diagrama de Efectos Principales

Los diagramas de efectos principales se usan para comparar los cambios en los principales niveles para ver qué factores influyen más en la respuesta. Un efecto principal se presenta cuando diferentes niveles de un factor afectan a la respuesta de forma distinta.

Se dibuja una línea para conectar los puntos para cada factor y una línea de referencia para el significado total. Cuando la línea es horizontal (paralela al eje x), no se presenta ningún efecto principal. Cada nivel del factor afecta a la respuesta de igual forma y la respuesta principal es la misma a lo largo de todos los niveles del factor. Cuando la línea no es horizontal, se presenta un efecto principal. Niveles diferentes de un factor afectan a la respuesta de forma distinta. Cuanto más grande es la diferencia en la posición vertical de los puntos dibujados (cuanta menos paralela sea la línea al eje x), mayor es la magnitud del efecto principal (Hasan *et al.*, 2010).

Los parámetros estudiados fueron los mismos en el diagrama de efectos principales sobre la capacidad de biosorción y el porcentaje de metal retenido en fibras de *O. fuliginosa* utilizando los metales Pb(II), Cd(II), Fe(II), Zn(II), Mn(II) y Cu(II), como muestra la figura 35. Se ha observado que los tres factores afectan a la respuesta de forma distinta, siendo para Pb que el caudal es aquel que tiene el papel más importante en la capacidad de biosorción con un efecto positivo, mientras que la masa influye más en la retención de este metal con un efecto negativo. En el caso del Cd, se observó que la concentración inicial influye más en la capacidad de biosorción de manera positiva, siendo la concentración inicial y el caudal aquellos términos que tienen un efecto negativo y presentan un mayor impacto en la retención del metal. La concentración influye de manera positiva y tiene un mayor impacto en la capacidad de biosorción utilizando Fe, mientras que el caudal impacta de manera negativa la retención de este metal. Para el Zn, la concentración afecta de manera positiva en la capacidad de biosorción; sin embargo, en cuanto al porcentaje de retención de este metal tanto el caudal como la concentración influyen de manera negativa. La capacidad de biosorción por parte del Mn se ve influenciada de manera positiva por la concentración y el caudal, mientras que el porcentaje de retención es influenciado de manera negativa principalmente por el caudal. Por último, la masa juega un papel más importante en la capacidad de biosorción de la fibra al adsorber cobre, lo cual influye de manera positiva, mientras que en cuanto al porcentaje de retención el caudal y la concentración influyen de manera negativa.

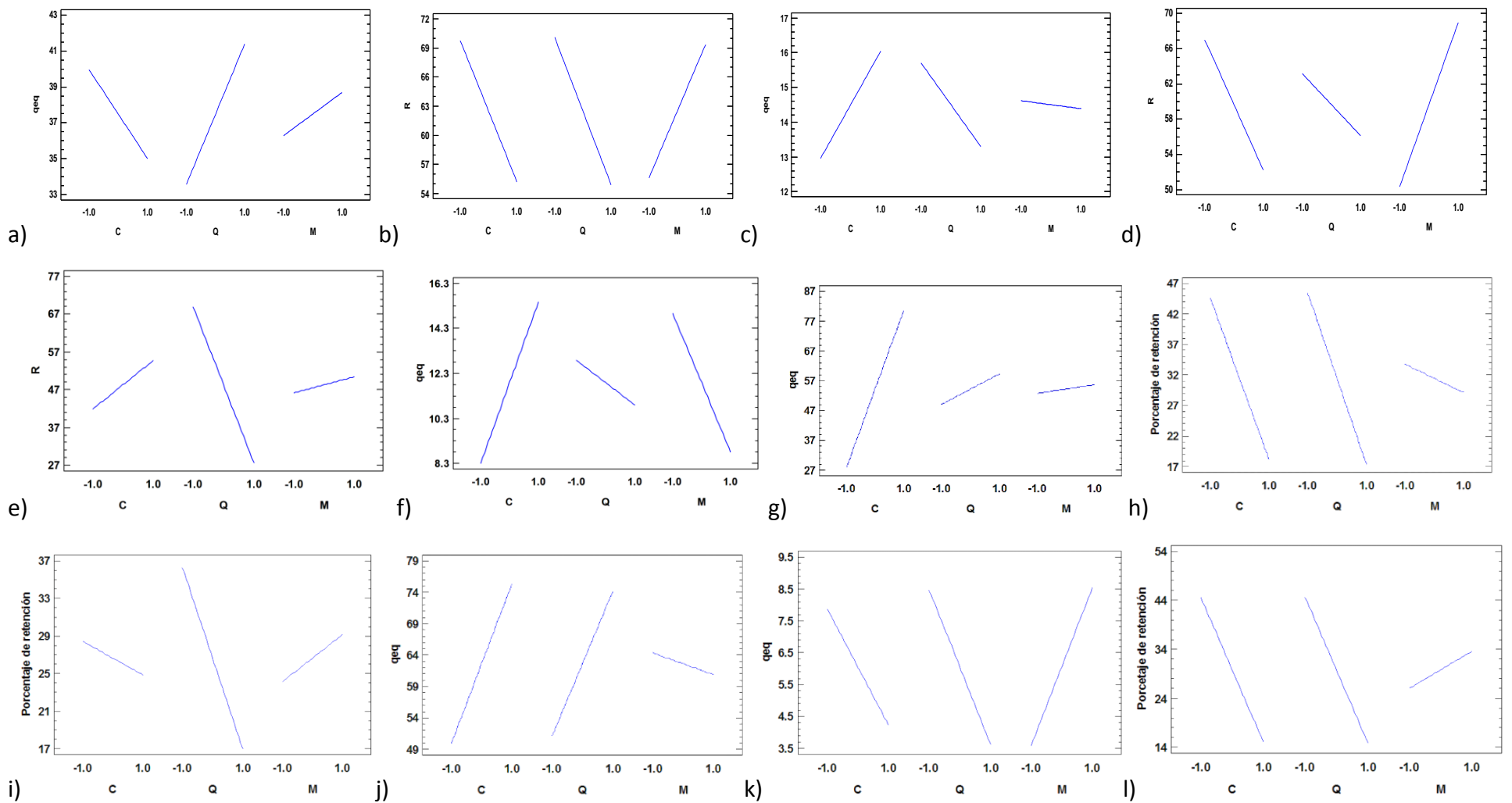


Figura 35. Efectos principales sobre las respuestas q_{eq} (capacidad de biosorción) y R (porcentaje de retención), en plomo (Pb), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) con *Opuntia fuliginosa*: a) diagrama de q_{eq} con Pb, b) diagrama de R con Pb, c) diagrama de q_{eq} con Cd, d) diagrama de R con Cd, e) diagrama de q_{eq} con Fe, f) diagrama de R con Fe, g) diagrama de q_{eq} con Zn, h) diagrama de R con Zn, i) diagrama de q_{eq} con Mn, j) diagrama de R con Mn, k) diagrama de q_{eq} con Cu y l) diagrama de R con Cu.

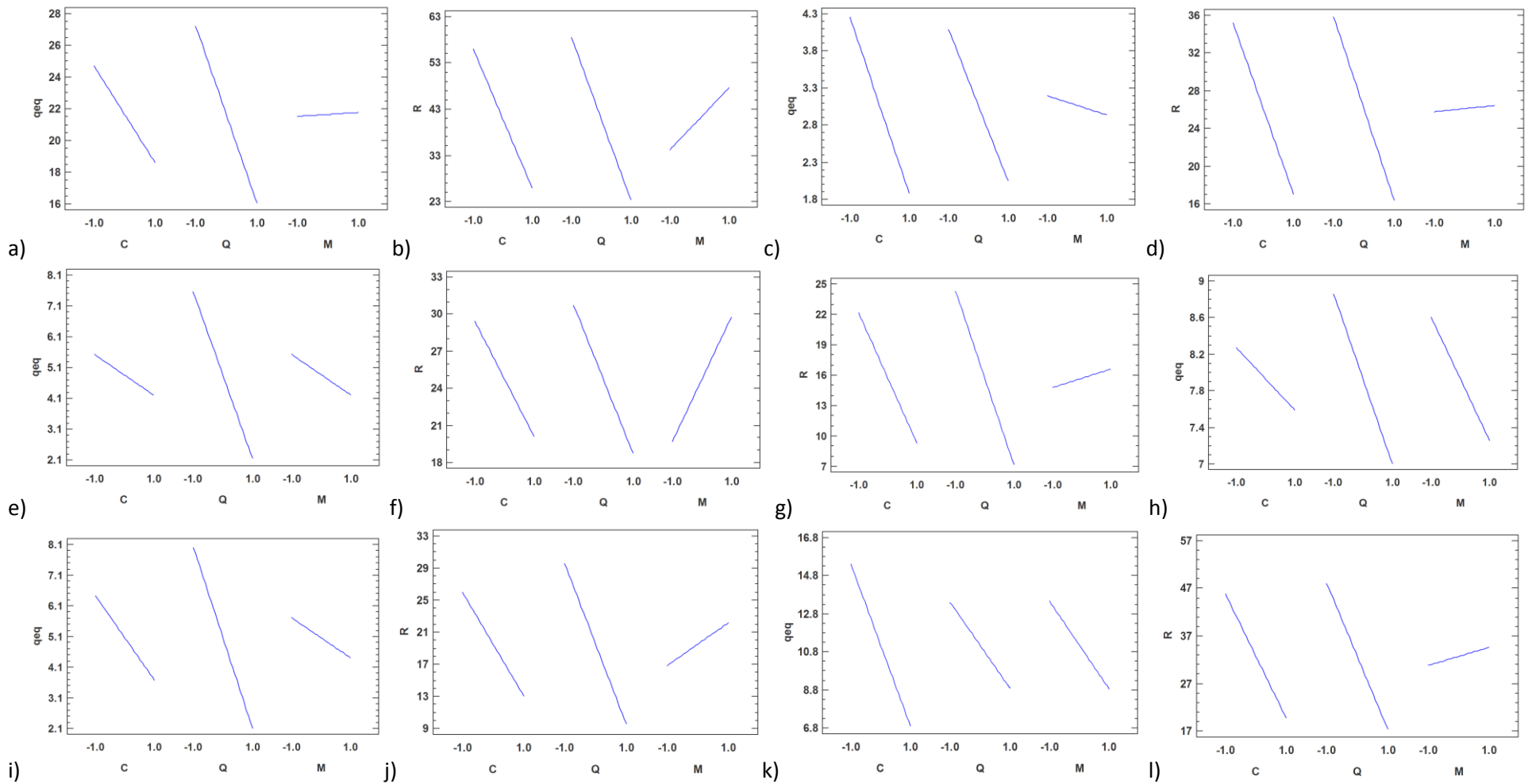


Figura 36. Efectos principales sobre las respuestas q_{eq} (capacidad de biosorción) y R (porcentaje de retención), en plomo (Pb), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) con *Agave angustifolia*: a) diagrama de q_{eq} con Pb, b) diagrama de R con Pb, c) diagrama de q_{eq} con Cd, d) diagrama de R con Cd, e) diagrama de q_{eq} con Fe, f) diagrama de R con Fe, g) diagrama de q_{eq} con Zn, h) diagrama de R con Zn, i) diagrama de q_{eq} con Mn, j) diagrama de R con Mn, k) diagrama de q_{eq} con Cu y l) diagrama de R con Cu.

En la figura 36 se observan ambas respuestas utilizando *A. angustifolia*. En ellas se puede apreciar que al incrementarse el caudal se tiene una influencia negativa y significativa en ambas respuestas para todos los metales, excepto en la capacidad de biosorción del Mn, donde si influye de manera negativa pero no en gran medida como la concentración, ya que este factor también presentó una influencia negativa y significativa en el porcentaje de retención y en la capacidad de biosorción.

Por otra parte, al incrementar la cantidad de biosorbente se observó que este factor influye de manera negativa en la capacidad de biosorción de Cd, Fe, Zn, Mn y Cu; mientras que para Pb y para la respuesta de porcentaje de metal retenido influyó de manera positiva.

3.4.2.3 Análisis de regresión matemática para las respuestas de capacidad de biosorción y el porcentaje de metal retenido

Los datos obtenidos fueron ajustados a la siguiente ecuación de segundo orden:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot A + a_2 \cdot B + a_3 \cdot C + a_4 \cdot A \cdot B + a_5 \cdot A \cdot C + a_6 \cdot B \cdot C$$

Donde Y es la respuesta estudiada (capacidad de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu y la otra respuesta es el porcentaje retenido), A, B y C son los factores estudiados, a_0 la media global y a_i los coeficientes de regresión. Las ecuaciones ajustadas para las dos respuestas se obtuvieron al sustituir los coeficientes a_i en la ecuación con los valores correspondientes de las tablas A2 y A3, (Anexo 2).

3.4.2.4 Análisis de la varianza (ANOVA)

Se realizó el análisis de la varianza para estudiar la significancia del modelo cuadrático para ambas respuestas. De este modo, con el ANOVA se obtuvo la suma de los cuadrados de las diferencias (SS), los grados de libertad (Df), cuadrados medios (MS), F-Ratio (F-R) y P-Valores (P-V) a través del ajuste de una ecuación polinómica de segundo orden de los datos experimentales. Los resultados de los coeficientes del modelo y el análisis de la varianza (ANOVA) se muestran en la tabla A4, Anexo 3.

En este análisis se observó que existen diferencias estadísticas entre los factores dependiendo la respuesta y el biosorbente utilizado. En el caso de *O. fuliginosa* se advierte que los factores caudal y concentración mostraron diferencias estadísticamente significativas en el caso de la capacidad de biosorción; para el porcentaje de metal retenido, los tres factores presentaron diferencias.

En el caso de *A. angustifolia* se observó que en Pb, Fe y Mn el caudal mostró diferencias significativas; mientras que en el porcentaje de metal retenido el caudal y la concentración mostraron diferencias estadísticamente significativas.

3.4.3 AJUSTE DE LOS DATOS A MODELOS MATEMÁTICOS

3.4.3.1 Modelo Adams Bohart

El modelo de adsorción de Adams–Bohart fue aplicado a los datos experimentales para la descripción de la parte inicial de la curva de ruptura. Los valores de los parámetros del modelo se han obtenido mediante regresión no lineal de acuerdo con la ecuación 7 y se presentan en la tabla A5 del Anexo 4, junto con los coeficientes de la correlación y desviación estándar. El modelo reproduce las curvas de ruptura adecuadamente. No obstante, los valores de la capacidad de biosorción volumétrica, N_0 , son más altos para las curvas realizadas con Pb al utilizar *O. fuliginosa*; mientras que, al emplear *A. angustifolia*, los valores r^2 cambian dependiendo del metal estudiado y los valores de N_0 , son más altos utilizando Pb.

Los resultados indican que la parte inicial de la curva de ruptura es adecuada para los dos biosorbentes; sin embargo, de acuerdo con los valores de r^2 obtenidos para ambas fibras se puede visualizar que *O. fuliginosa* presenta una mayor eficiencia en la primera parte de la columna, en comparación con los valores obtenidos por *A. angustifolia*.

3.4.3.2 Modelo Thomas

Los datos de las curvas de ruptura fueron ajustados al modelo Thomas, determinando la constante cinética (k_{Th}) y la concentración máxima de soluto en la fase sólida (q_0), mediante regresión no lineal, de acuerdo con la ecuación 8. Los resultados se muestran en la tabla A6 del Anexo 4. El modelo Thomas reproduce adecuadamente los

datos experimentales para *O. fuliginosa*, obteniéndose valores de $r^2 > 0.90$; mientras que al utilizar *A. angustifolia* se obtuvieron valores de $r^2 > 0.70$ para Fe.

El valor obtenido empleando *O. fuliginosa* para la concentración máxima de soluto en la fase sólida para Pb (49.10 mg/g) resultado similar al valor experimental (49.90 mg/g). Para las curvas utilizado Cd, los valores experimentales y calculados son más parecidos (21.27 mg/g y 20.90 mg/g); mientras que al utilizar Fe el valor obtenido fue de 15.88 mg/g, ligeramente menor al valor experimental que fue de 16.42 mg/g. En el caso del Zn el valor fue de 18.79 mg/g, para Mn fue de 9.72 mg/g y Cu de 21.25 mg/g. En el caso de *A. angustifolia*, la concentración máxima de soluto en fase sólida para Pb, resultó similar al valor experimental (640.79-638.94 mg/g), en el caso del Cd, el valor experimental (120.43 mg/g) es mayor al calculado (109.4 mg/g), para Fe el valor calculado es mayor al experimental (120.32 y 114.67, respectivamente); el valor de calculado de Cu y Mn (298.11 y 130.43 mg/g) es mayor al experimental (290.34 y 112.83 mg/g); mientras que el valor experimental de Zn (135.67 mg/g) es mayor al calculado (130.67 mg/g).

Esta diferencia en los valores de la capacidad máxima de biosorción puede explicarse al saber que los diferentes metales obtuvieron alcanzaron la saturación en diferentes tiempos, además de tener en cuenta que el modelo de Thomas, así como el resto de los modelos utilizados, tienen como consideración que la curva de ruptura es simétrica.

3.4.3.3 Modelo Yoon Nelson

Los parámetros del modelo Yoon-Nelson se han obtenido mediante regresión no lineal de los resultados obtenidos, mediante la ecuación 9. Los valores de k_{YN} y τ se presentan en la tabla A7 del Anexo 4. El modelo Yoon-Nelson es matemáticamente igual al modelo Thomas, por lo que este modelo reproduce adecuadamente los datos experimentales con *O. fuliginosa*, obteniendo valores de r^2 superiores a 0.90. Sin embargo, con *A. angustifolia* los valores de r^2 para Zn, Cu y Fe disminuyeron, encontrándose por encima de 0.70.

Estos resultados demuestran que en el caso de *O. fuliginosa* al tener coeficientes de determinación son mayores a los obtenidos por *A. angustifolia*.

Además, estos resultados demuestran que al utilizar las fibras con Pb el r^2 de ambas fibras fue mayor a 0.8003 en el caso de *O. fuliginosa* y 0.9231 para *A. angustifolia*, lo cual indica que la retención de este metal se está realizando de manera más eficiente.

3.4.3.4 Modelo Dosis-Respuesta

Los parámetros de este modelo se han obtenido mediante regresión no lineal de acuerdo con la ecuación 10 y los resultados se presentan en la tabla A8 del Anexo 4. Las curvas de ruptura previstas por el modelo de Dosis-Respuesta muestran razonablemente buena concordancia con las obtenidas experimentalmente para *O. fuliginosa* ($r^2 > 0,96$). Los valores de la concentración máxima de soluto en la fase sólida, q_0 , son similares a los obtenidos con el modelo Thomas; teniendo valores para Pb de 48.38 mg/g, Cd 20.97 mg/g, Fe de 15.09 mg/g, Zn de 16.98 mg/g, Mn de 9.78 mg/g y Cu con 19.63 mg/g; mientras que al utilizar *A. angustifolia* se observaron valores de r^2 de hasta 0.4175.

Comparando todos los modelos que se han usado, se podría concluir que el modelo Dosis-Respuesta es el que mejor reproduce la curva de ruptura completa. Los resultados obtenidos son similares a los encontrados con otros metales en estudios previos (Almendros, 2016; Calero *et al.*, 2010; Calero *et al.*, 2009). En la mayoría de los casos, el modelo Dosis-Respuesta fue el que mejor ajustó los resultados, especialmente a valores altos del tiempo de operación de la columna.

3.5 CONCLUSIONES

Los parámetros analizados no tuvieron el mismo efecto en la variable de salida, ya que se pudo observar que los parámetros como el caudal y la concentración inicial influyeron más en la biosorción en continuo, dependiendo del metal analizado. Además, se observaron porcentajes similares de retención del metal superiores al 50%, las fibras de *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*.

El porcentaje de retención de metales aumentó significativamente en función del aumento en la masa del biosorbente utilizado, debido a la presencia de un mayor número de grupos funcionales disponibles para la interacción con los metales.

El incremento del caudal influyó negativamente en la retención de los metales evaluados, debido a que un aumento en el flujo disminuye los tiempos de interacción entre la fibra y el metal.

La concentración influye de distintas formas dependiendo del metal, siendo el Fe el que presentó un porcentaje mayor de retención al incrementar la concentración para *O. fuliginosa*; mientras que para *A. angustifolia* influyó de manera negativa y significativa en ambas respuestas.

Por otra parte, Las curvas de *O. fuliginosa* se ajustaron de manera adecuada a los cuatro modelos matemáticos Adam-Bohart, Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-respuesta; siendo Adam-Bohart y Yoon-Nelson aquellos modelos que presentaron un ajuste más adecuado a las curvas de ruptura obtenidas por la biosorción de los metales en continuo. Sin embargo, los modelos de Adams-Bohart y Dosis-Respuesta no se ajustaron de manera tan eficiente a las curvas obtenidas de Cu, Zn y Fe al utilizar *A. angustifolia*.

3.6 LITERATURA CITADA

- Almendros Molina A.I. (2016). Biosorción de níquel con residuos vegetales. Valorización del biosorbente agotado mediante tratamientos termoquímicos. Tesis doctoral. Universidad de Granada, España
- Box G.E.P., Hunter W.G. & Hunter J.S. (1978). *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, New York: Wiley.
- Calero M., Blázquez G., Ronda A. & Martín-Lara M.A. (2010). Effect of the acid treatment of olive stone on the biosorption of lead in a packed-bed column. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 49: 12587–12595.
- Calero M., Blázquez G., Ronda A., Álvarez A.E. & Martín-Lara M.A. (2013). Biosorption of Cu^{2+} in a packed bed column by almond shell: optimization of process variables. *Desalination and Water Treatment*. 51: 1954–1965.
- Calero M., Hernáinz F., Blázquez G., Tenorio G. & Martín-Lara M.A. (2009). Study of Cr (III) biosorption in a fixed-bed column. *Journal Hazard Mater*. 171: 886–893.
- Calero M., Pérez A., Blázquez G., Ronda A. & Martín-Lara M.A. (2013). Characterization of chemically modified biosorbents from olive tree pruning for the biosorption of lead. *Ecological Engineering*. 58: 344–354.
- Chowdhury S., Mazumder M.A.J., Al-Attas O. & Husain T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of The Total Environment*. 569:476-488.
- Farooq U., Athar M., Khan M.A. & Kozinski J.A. (2013). Biosorption of Pb(II) and Cr(III) from aqueous solutions: breakthrough curves and modeling studies. *Environmental Monitoring Assessment*. 185: 845–54.
- Feng N., Guo X., Liang S., Zhu Y. & Liu J. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel. *Journal of Hazardous Materials*. 185:49-54.
- Han R., Wang Y., Yu W., Zou W., Shi J. & Liu H. (2007). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice husk in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*. 141: 713–718.

- Han R., Zhang J., Zou W., Xiao H., Shi J. & Liu H. (2006). Biosorption of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by chaff in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*.133: 262–268.
- Hasan S.H., Srivastava P. & Talat M. (2010). Biosorption of lead using immobilized *Aeromonas hydrophila* biomass in up flow column system: factorial design for process optimization. *Journal of Hazardous Materials*.177: 312–322.
- Hasan S.H., Srivastava P., Ranjan D. & Talat M. (2009). Biosorption of Cr(VI) from aqueous solution using *A. hydrophila* in up-flow column: optimization of process variables. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 83: 567–77.
- Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., HABibullah-Al-Mamun M. & Islam M.K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*. 48: 282-291.
- Jain C.K., Malik D.S. & Yadav A.K. (2016). Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environmental Processes*. 3(2):495-523.
- Liu J., Yang M., Zhang Y.K. & Du K.F. (2011). Study of Glutamate-Modified Cellulose Beads for Cr(III) Adsorption by Response Surface Methodology. *Industrial & Engineering Chemistry Ressearch*.50: 10784–10791.
- Loiacono S., Crini G., Chanet G., Raschetti M., Placet V. & Morin-Crini N. (2018). Metals in aqueous solutions and real effluents: biosorption behavior of hemp-based felt. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 93: 2592-2601.
- Moghadam M.R., Nasirizadeh N., Dashti Z. & Babanezhad E. (2013). Removal of Fe (II) from aqueous solution using pomegranate peel carbon: equilibrium and kinetic studies. *International Journal of Industrial Chemistry*. 4:19.
- Oguz E. & Ersoy M. (2014). Biosorption of cobalt(II) with sunflower biomass from aqueous solutions in a fixed bed column and neural networks modelling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 99: 54–60.
- Ponnusami V., Krithika V., Madhuran R. & Srivastava S.N. (2007). Biosorption of reactive dye using acid-treated rice husk: factorial design analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 142: 397–403.

- Rao R.A.K & Rehman F. (2012). Use of *Polyalthia longifolia* seeds (Seeds of Indian Mast Tree) as adsorbent for the removal of Cd (II) from aqueous solution. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 33:472-481.
- Singh A., Kumar D. & Gaur J.P. (2012). Continuous metal removal from solution and industrial effluents using *Spirogyra* biomass-packed column reactor. *Water Research*. 46: 779–88.
- Tejada-Tovar C., Villabona-Ortíz A. & Osorio-García L. (2020). Estudio del efecto de la temperatura, concentración inicial de contaminante y dosis de adsorbente en la remoción de Níquel (II) usando residuos agroindustriales. *Prospectiva*. 18(1):24-31.
- Tejada-Tovar C., Villabona-Ortiz A., Sierra-Ardila C., Meza-Acuña M. & Ortega-Toro R. (2020). Adsorption in a binary system of Pb(II) and Ni (II) using lemon peels. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*. 1-23.
- Tejada-Tovar C., Villabona A., Cabarcas A., Benitez C. & Acevedo D. (2018). Optimization of variables in fixed-bed column using the response surface methodology. *Contemporary Engineering Sciences*. 11(23):1121-1133.
- Tenorio-Rivas G., Calero M., Blázquez G. & Bermúdez H. (2006). Equilibrium modeling of removal of cadmium ions by olives stones. *Environmental Progress*. 25(3):261-267.
- Villabona-Ortiz A., Tejada-Tovar C., Ruiz-Paternina E., Frías-González J.D. & Blanco-García G.D. (2020). Optimization of the effect of temperature and bed height on Cr (VI) bioadsorption in continuous system. *Revista Facultad de Ingeniería*. 29(54):e10477.
- Wu Q., Zhou H., Tam N.F.Y., Tian Y., Tan Y., Zhou S., Li Q., Chen Y. & Leung J.Y.S. (2016). Contamination, toxicity and speciation of heavy metals in an industrialized urban river: Implications for the dispersal of heavy metals. *Marine Pollution Bulletin*. 104(1): 153-161.

CONCLUSIONES GENERALES

- La caracterización fisicoquímica de las fibras de *O. fuliginosa* y *A. angustifolia* muestran que las fibras poseen características morfológicas y estructurales distintas, pero ambas fibras retienen metales pesados en su superficie. Además, están compuestas principalmente por carbono y oxígeno, lo cual favorece la presencia de grupos funcionales como hidroxilo, carbonilo y carboxilo, los cuales forman parte de la composición de la celulosa y la hemicelulosa.
- El proceso de biosorción por lotes mostró que el tamaño de partícula de las fibras es importante para el proceso de adsorción, siendo los tamaños pequeños aquellos que mostraron un mayor porcentaje de remoción de metales. Las fibras de *O. fuliginosa* removieron de forma más eficiente el Fe, obteniendo porcentajes de hasta 90% en tamaños <0.297m; mientras que *A. angustifolia* adsorbió hasta un 85% el Mn en tamaños de 0.85 mm. En cuanto al porcentaje de desorción, se observó que las fibras de *O. fuliginosa* son aquellas que desorbieron en menor proporción los metales, indicando una interacción más fuerte con los grupos funcionales presentes en la fibra.
- Los ensayos de remoción empleando la mezcla de metales permitieron observar que existe una competencia de metales por unirse a los grupos funcionales de las fibras, siendo *O. fuliginosa* aquella fibra que remueve de manera más eficiente el Mn con un 22% de adsorción; sin embargo, *A. angustifolia* adsorbe en un mayor porcentaje el Fe con 50%, seguido Cu y Cr, no obstante, esta fibra es la que desorbe en una mayor proporción los cuatro metales.
- Las isotermas de Langmuir y Freundlich nos permitieron conocer que las fibras de *O. fuliginosa* absorben Fe, Cu, Mn y Cr en forma de multicapa; mientras que *A. angustifolia* lo hace por dos mecanismos, ya que adsorbe Mn y Fe en forma de multicapa, y Cu y Cr en forma de monocapa.

- Al realizar los estudios de biosorción en continuo se observó que el porcentaje de remoción de metales como Pb, Cr, Zn, Cu, Fe y Mn se ve aumentado al utilizar una mayor cantidad de ambos biosorbentes; mientras que el caudal y la concentración inicial de metal, al incrementarse, afectan de manera negativa la remoción, disminuyendo los porcentajes de retención de los metales antes mencionados.
- Los modelos matemáticos Adam-Bohart, Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-Respuesta fueron ajustados a los datos de ambas fibras; sin embargo, la fibra de *O. fuliginosa* es aquella que se ajustó de forma más eficiente a los cuatro modelos.
- Con base en todo lo anterior, podemos deducir que la fibra de *Opuntia fuliginosa* es aquella que podría emplearse para el diseño de un filtro para remover metales pesados del agua, ya que cuenta con las características necesarias para la adsorción de diferentes metales, sin que la fibra los desorba en cantidades grandes.

PERSPECTIVAS

- Realizar pruebas de biosorción en continuo utilizando metales como Cr y As.
- Probar la operación de la columna empacada con fibras vegetales, utilizando agua contaminada con Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb y Zn de la comunidad de Huautla, Morelos.

ANEXO 1

VALORES UTILIZADOS PARA OBTENER LA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN (q_{eq}) Y PORCENTAJE DE METAL RETENIDO (R).

Tabla A1. Valores naturales y codificados, con los valores obtenidos para ambas respuestas utilizando Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu; empleando ambos biosorbentes.

<i>Opuntia fuliginosa</i>																		
EXP.	Valores codificados			Valores naturales			Respuestas											
							Plomo		Cadmio		Hierro		Cobre		Zinc		Manganeso	
	X ₁	X ₂	X ₃	Caudal (mL/min)	Masa de biosorbente (g)	Concentración inicial (mg/L)	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %
1	1	1	-1	4	2	50	49.4	69.78	8.36	64.96	4.91	34.33	9.10	26.48	37.89	26.57	58.39	21.08
2	-1	1	1	2	2	100	36.94	61.23	20.06	75.24	14.55	90.75	12.53	30.00	83.42	26.00	68.77	37.05
3	-1	-1	1	2	1	100	33.50	46.48	12.49	48.12	16.59	81.88	20.54	20.54	77.79	31.23	65.17	31.96
4	-1	1	-1	2	2	50	30.89	83.29	11.88	81.95	7.05	51.13	17.71	75.49	26.36	62.54	41.30	43.92
5	1	-1	-1	4	1	50	46.33	53.87	14.27	59.26	7.10	30.70	6.60	21.96	40.14	29.11	65.17	16.62
6	1	-1	1	4	1	100	32.08	39.42	13.92	41.57	21.84	20.36	2.22	8.31	84.03	14.62	98.80	15.66
7	1	1	1	4	2	100	37.83	63.74	16.44	54.97	12.65	30.89	2.77	12.58	89.07	15.52	81.84	23.09
8	-1	-1	-1	2	1	50	33.24	63.36	18.16	73.61	16.98	56.92	7.52	62.69	21.02	74.07	32.62	43.69
9	1	-1	1	4	1	100	31.08	37.64	15.22	40.19	19.88	17.42	1.17	3.60	76.91	5.50	94.10	13.19
10	-1	1	-1	2	2	50	29.89	81.99	11.42	81.25	5.31	49.41	13.00	73.13	19.24	57.42	45.83	39.20
11	1	1	1	4	2	100	38.83	62.62	15.14	56.41	11.67	29.71	0.98	7.87	81.95	6.40	73.33	18.38
12	-1	-1	1	2	1	100	34.50	47.38	13.39	49.06	15.29	80.90	1.84	15.83	73.07	26.11	56.05	27.25
13	-1	1	1	2	2	100	35.34	59.58	21.74	76.22	11.29	85.85	7.82	21.48	78.52	20.88	64.07	32.34
14	1	1	-1	4	2	50	50.40	69.28	10.08	63.84	3.13	31.39	4.39	21.77	28.77	17.45	53.48	18.17
15	1	-1	-1	4	1	50	45.33	52.57	12.93	57.8	6.12	27.40	1.89	17.25	35.43	24.40	67.68	10.11
16	-1	-1	-1	2	1	50	34.24	62.02	16.56	75.35	15.86	53.66	2.81	57.98	13.72	64.95	35.09	34.67
<i>Agave angustifolia</i>																		
EXP.	Valores codificados			Valores naturales			Respuestas											
							Plomo		Cadmio		Hierro		Cobre		Zinc		Manganeso	
	X ₁	X ₂	X ₃	Caudal (mL/min)	Masa de biosorbente (g)	Concentración inicial (mg/L)	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %	Y ₁ mg/g	Y ₂ %
1	1	1	-1	4	2	50	25.33	41.34	3.12	15.47	0.48	13.08	6.39	24.66	7.64	28.12	1.99	28.9
2	-1	1	1	2	2	100	31.89	40.16	1.48	14.36	3.0	19.51	10.17	33.38	4.18	39.06	3.26	18.35
3	-1	-1	1	2	1	100	28.47	27.84	2.02	27.83	5.47	18.41	7.11	27.43	6.16	19.53	5.93	12.57
4	-1	1	-1	2	2	50	33.21	95.29	3.58	63.57	1.75	26.49	5.6	58.11	8.43	43.51	4.56	47.58
5	1	-1	-1	4	1	50	29.8	35.3	0.15	30.14	2.72	19.23	10.65	26.87	8.7	18.81	4.95	5.31
6	1	-1	1	4	1	100	13.68	8.29	1.76	20.97	1.83	5.84	7.96	7.37	3.91	10.44	1.63	3.13
7	1	1	1	4	2	100	14.02	14.15	0.36	6.97	3.17	11.17	2.46	5.98	6.64	7.9	0.69	4.3
8	-1	-1	-1	2	1	50	20.73	60.81	2.87	46.59	13.34	44.09	16.42	63.46	7.04	25.04	8.23	43.03
9	1	-1	1	4	1	100	4.12	11.41	2.66	4.51	1.35	0.94	0.26	11.15	2.79	3.44	0.55	8.41
10	-1	1	-1	2	2	50	22.73	86.13	8.26	46.19	13.03	48.73	17.38	65.67	3.73	32.53	13.26	32.62
11	1	1	1	4	2	100	9.34	19.71	2.14	16.09	1.11	0.89	5.58	10.76	8.43	18.38	2.18	6.98
12	-1	-1	1	2	1	100	23.79	32.96	4.28	20.71	8.21	6.58	16.11	18.97	21.94	32.71	10.63	21.03
13	-1	1	1	2	2	100	23.43	52.62	2.6	24.82	9.5	11.11	5.45	42.1	6.64	29.28	4.56	29.63
14	1	1	-1	4	2	50	14.13	31.38	4.25	23.93	1.61	1.88	17.67	35.94	12.32	39.5	4.69	9.47
15	1	-1	-1	4	1	50	18.2	25.74	4.24	13.06	5.06	4.05	20.21	16.41	5.58	23.57	0.25	9.99
16	-1	-1	-1	2	1	50	33.35	72.09	7.57	42.27	6.18	19.39	28.88	74.74	12.72	40.16	13.51	31.25

ANEXO 2

COEFICIENTES a_i DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN PARA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN (q_{eq}) Y PORCENTAJE DE RETENCIÓN DEL METAL (R)

Tabla A2. Valores de las constantes para el ajuste del modelo de las respuestas para *O. fuliginosa* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu para las respuestas estudiadas.

Plomo									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	37.4887	0.205995			a ₀	59.6406	0.678044	
	a ₁	-2.47625	0.411989	0.0000		a ₁	-7.37937	1.35609	0.0000
	a ₂	3.92125	0.411989	0.0000		a ₂	-3.52562	1.35609	0.0008
	a ₃	1.20125	0.411989	0.0004		a ₃	9.29812	1.35609	0.0000
	a ₄	-3.97875	0.411989	0.0000		a ₄	2.11938	1.35609	0.0141
	a ₅	1.02125	0.411989	0.0011		a ₅	0.233125	1.35609	0.7398
	a ₆	1.50375	0.411989	0.0001		a ₆	0.941875	1.35609	0.2022
R ² = 99.2014% R ² (ajustado para g.l.) =98.5026% Error estándar de est = 0.823979					R ² = 97.7383% R ² (ajustado para g.l.) =95.7594% Error estándar de est = 2.71218				
Cadmio									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	14.5037	0.428196			a ₀	62.4875	0.492925	
	a ₁	1.54625	0.856391	0.0069		a ₁	-7.265	0.98585	0.0000
	a ₂	-1.20875	0.856391	0.0224		a ₂	-7.6125	0.98585	0.0000
	a ₃	-0.11375	0.856391	0.7972		a ₃	6.8675	0.98585	0.0000
	a ₄	0.33875	0.856391	0.4517		a ₄	0.675	0.98585	0.2081
	a ₅	2.40875	0.856391	0.0005		a ₅	3.62	0.98585	0.0001
	a ₆	-0.67625	0.856391	0.1529		a ₆	-1.6975	0.98585	0.0088
R ² = 87.4748% R ² (ajustado para g.l.) =76.5153% Error estándar de est = 1.71278					R ² = 98.8996% R ² (ajustado para g.l.) =97.9368% Error estándar de est = 1.9717				
Hierro									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	11.8888	0.666306			a ₀	48.2931	0.528561	
	a ₁	7.1625	1.33261	0.1810		a ₁	12.8537	1.05712	0.0000
	a ₂	-1.9525	1.33261	0.0017		a ₂	-41.0388	1.05712	0.0000
	a ₃	-6.1375	1.33261	0.0164		a ₃	4.27625	1.05712	0.0037
	a ₄	4.0325	1.33261	0.8402		a ₄	-19.2113	1.05712	0.0000
	a ₅	0.2775	1.33261	0.7213		a ₅	4.88375	1.05712	0.0017
	a ₆	0.4925	1.33261	0.8275		a ₆	3.33125	1.05712	0.0136
R ² = 88.5114% R ² (ajustado para g.l.) = 78.4588% Error estándar de est = 2.66523					R ² = 99.6081% R ² (ajustado para g.l.) =99.2652% Error estándar de est = 2.11424				
Cobre									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	6.06106	0.258788			a ₀	29.815	0.3889	
	a ₁	-3.64483	0.517577	0.0001		a ₁	-29.5681	0.7778	0.0000
	a ₂	-4.83273	0.517577	0.0000		a ₂	-29.6644	0.7778	0.0000
	a ₃	4.95943	0.517577	0.0000		a ₃	7.58138	0.7778	0.0000
	a ₄	-0.06837	0.517577	0.8982		a ₄	15.7925	0.7778	0.0647
	a ₅	-1.38242	0.517577	0.0283		a ₅	-1.66533	0.7778	0.0035
	a ₆	-3.62303	0.517577	0.0001		a ₆	-3.18257	0.7778	0.0002
R ² = 97.662 % R ² (ajustado para g.l.) = 95.6162 % Error estándar de est = 1.03515					R ² = 99.7698 % R ² (ajustado para g.l.) = 99.5685% Error estándar de est = 1.5556				

Continuación de la **Tabla A2**. Valores de las constantes para el ajuste del modelo de las respuestas para *O. fuliginosa* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu para las respuestas estudiadas.

Zinc										
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	
	a ₀	54.2134	0.491047			a ₀	31.4299	0.368072		
	a ₁	52.7704	0.982093	0.0000		a ₁	-26.2803	0.736145	0.0000	
	a ₂	10.1309	0.982093	0.0000		a ₂	-27.952	0.736145	0.0000	
	a ₃	2.88992	0.982093	0.0186		a ₃	-4.6525	0.736145	0.0002	
	a ₄	-5.33933	0.982093	0.0006		a ₄	12.4055	0.736145	0.0000	
	a ₅	2.40013	0.982093	0.0403		a ₅	2.48525	0.736145	0.0097	
	a ₆	-2.59398	0.982093	0.0297		a ₆	2.7299	0.736145	0.0060	
R ² = 99.7417 % R ² (ajustado para g.l.) = 99.5156 % Error estándar de est = 1.96419					R ² = 99.7473 % R ² (ajustado para g.l.) = 99.5261% Error estándar de est = 1.47229					
Manganeso										
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	
	a ₀	62.6133	0.891337			a ₀	26.6532	0.359393		
	a ₁	25.3281	1.78267	0.0000		a ₁	-3.56773	0.718786	0.0011	
	a ₂	22.9886	1.78267	0.0000		a ₂	-19.2223	0.718786	0.0000	
	a ₃	-3.4546	1.78267	0.0886		a ₃	5.00948	0.718786	0.0001	
	a ₄	0.52155	1.78267	0.7773		a ₄	4.65228	0.718786	0.0002	
	a ₅	-3.06315	1.78267	0.1241		a ₅	0.689475	0.718786	0.3655	
	a ₆	-11.212	1.78267	0.0002		a ₆	1.27647	0.718786	0.1137	
R ² = 98.1175 % R ² (ajustado para g.l.) = 96.4703 % Error estándar de est = 3.56535					R ² = 99.1013 % R ² (ajustado para g.l.) = 98.3149 % Error estándar de est = 1.43757					

Tabla A3. Valores de las constantes para el ajuste del modelo de las respuestas para *A. angustifolia* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu.

Plomo										
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	
	a ₀	21.6387	1.64643			a ₀	40.9131	1.61663		
	a ₁	-6.0925	3.29286	0.1014		a ₁	-30.1812	3.23326	0.0000	
	a ₂	-11.1225	3.29286	0.0097		a ₂	-34.9963	3.23326	0.0000	
	a ₃	0.2425	3.29286	0.9431		a ₃	13.3562	3.23326	0.0033	
	a ₄	-5.4825	3.29286	0.1345		a ₄	10.1313	3.23326	0.0139	
	a ₅	1.9125	3.29286	0.5774		a ₅	-1.68125	3.23326	0.6172	
	a ₆	-0.9875	3.29286	0.7719		a ₆	-6.89625	3.23326	0.0655	
R ² = 70.1052 % R ² (ajustado para g.l.) = 43.9472 % Error estándar de est = 6.58571					R ² = 96.7216% R ² (ajustado para g.l.) = 93.853 % Error estándar de est = 6.46652					
Cadmio										
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Stnd.Error	P-Valor	
	a ₀	3.06469	0.56462			a ₀	26.0925	2.08147		
	a ₁	-2.38063	1.12924	0.0730		a ₁	-18.12	4.16295	0.0024	
	a ₂	-2.03562	1.12924	0.1144		a ₂	-19.4	4.16295	0.0016	
	a ₃	-0.258125	1.12924	0.8257		a ₃	0.665	4.16295	0.8770	
	a ₄	0.594375	1.12924	0.6149		a ₄	9.605	4.16295	0.0499	
	a ₅	-1.35312	1.12924	0.2698		a ₅	-3.61	4.16295	0.4111	
	a ₆	-0.053125	1.12924	0.9638		a ₆	-2.22	4.16295	0.6083	
R ² = 56.3193 % R ² (ajustado para g.l.) = 12.6386 % Error estándar de est = 2.12932					R ² = 85.8641 % R ² (ajustado para g.l.) = 73.4953 % Error estándar de est = 8.32589					

Continuación de la **tabla A3**. Valores de las constantes para el ajuste del modelo de las respuestas para *A. angustifolia* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu.

Hierro									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	4.86312	0.921166			a ₀	15.695	2.5134	
	a ₁	-1.31625	1.84233	0.4953		a ₁	-12.845	5.02679	0.0339
	a ₂	-5.39375	1.84233	0.0191		a ₂	-17.12	5.02679	0.0093
	a ₃	-1.31375	1.84233	0.4961		a ₃	1.825	5.02679	0.7260
	a ₄	0.71375	1.84233	0.7086		a ₄	7.995	5.02679	0.1504
	a ₅	1.29375	1.84233	0.5024		a ₅	0.97	5.02679	0.8518
	a ₆	0.16625	1.84233	0.9303		a ₆	-2.585	5.02679	0.6210
R ² = 58.1358 % R ² (ajustado para g.l.) = 21.5046 % Error estándar de est = 3.68467					R ² =73.5121 % R ² (ajustado para g.l.) = 50.3351 % Error estándar de est = 10.0536				
Cobre									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	11.1437	1.40797			a ₀	32.6875	2.01906	
	a ₁	-8.5125	2.81594	0.0165		a ₁	-26.09	4.03813	0.0002
	a ₂	-4.4925	2.81594	0.1493		a ₂	-30.59	4.03813	0.0001
	a ₃	-4.6125	2.81594	0.1401		a ₃	3.775	4.03813	0.3772
	a ₄	-1.1525	2.81594	0.6931		a ₄	8.935	4.03813	0.0578
	a ₅	2.6675	2.81594	0.3712		a ₅	3.05	4.03813	0.4717
	a ₆	2.8675	2.81594	0.3383		a ₆	0.11	4.03813	0.9789
R ² = 70.7978 % R ² (ajustado para g.l.) = 45.246 % Error estándar de est = 5.63188					R ² = 92.9743 % R ² (ajustado para g.l.) = 86.8269% Error estándar de est = 8.07625				
Zinc									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	7.92813	1.19111			a ₀	24.7458	1.87326	
	a ₁	-0.68375	2.38222	0.7814		a ₁	-9.30656	3.74651	0.0420
	a ₂	-1.85375	2.38222	0.4589		a ₂	-11.9516	3.74651	0.0153
	a ₃	-1.35375	2.38222	0.5854		a ₃	10.0784	3.74651	0.0311
	a ₄	-2.43375	2.38222	0.3369		a ₄	-8.15344	3.74651	0.0660
	a ₅	-0.87375	2.38222	0.7233		a ₅	-2.95344	3.74651	0.4564
	a ₆	4.86625	2.38222	0.0754		a ₆	-0.668438	3.74651	0.8635
R ² = 44.4194 % R ² (ajustado para g.l.) = 0.0 % Error estándar de est = 4.76444					R ² = 82.2331 % R ² (ajustado para g.l.) = 64.6662 % Error estándar de est = 7.06449				
Manganeso									
Y ₁ mg/g	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor	Y ₂ %	Constante	Estimación	Std.Error	P-Valor
	a ₀	5.05438	0.77145			a ₀	19.515	2.06826	
	a ₁	-2.75125	1.5429	0.1124		a ₁	-12.93	4.13652	0.0141
	a ₂	-5.87625	1.5429	0.0052		a ₂	-19.985	4.13652	0.0013
	a ₃	-1.31125	1.5429	0.4201		a ₃	5.35	4.13652	0.2320
	a ₄	1.04375	1.5429	0.5178		a ₄	5.295	4.13652	0.2364
	a ₅	-0.70125	1.5429	0.6615		a ₅	-1.82	4.13652	0.6716
	a ₆	1.85375	1.5429	0.2639		a ₆	0.275	4.13652	0.9486
R ² = 72.4413 % R ² (ajustado para g.l.) = 48.3275 % Error estándar de est = 3.0858					R ² = 82.1089 % R ² (ajustado para g.l.) = 66.4541 % Error estándar de est = 8.27304				

ANEXO 3

ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS RESPUESTAS ESTUDIADAS: CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN (q_{eq}) Y PORCENTAJE DE METAL RETENIDO (R).
Tabla A4. Análisis de Varianza (ANOVA) para *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu.

Opuntia fuliginosa										
Plomo (Pb)										
Factor	Y_1, q_{eq}					Y_3, R				
	SS	Df	MS	F-R	P-V	SS	Df	MS	F-R	P-V
A:C	98.10	1	98.109	144.50	0.0000	871.28	1	871.283	118.45	0.0000
B:Q	246.01	1	246.019	362.36	0.0000	198.88	1	198.881	27.04	0.0008
C:M	23.08	1	23.088	34.01	0.0004	1383.28	1	1383.28	188.05	0.0000
AB	253.28	1	253.287	373.06	0.0000	71.86	1	71.868	9.77	0.0141
AC	16.68	1	16.687	24.58	0.0011	0.86	1	0.869	0.12	0.7398
BC	36.18	1	36.180	53.29	0.0001	14.19	1	14.194	1.93	0.2022
Bloques	1.32	1	1.322	1.95	0.2003	2.71	1	2.714	0.37	0.5604
Error total	5.43	8	0.678			58.84	8	7.355		
Total (corr)	680.12	15				2601.94	15			
Cadmio (Cd)										
A:C	38.25	1	38.2542	13.04	0.0069	844.48	1	844.484	217.22	0.0000
B:Q	23.37	1	23.3772	7.97	0.0224	927.20	1	927.203	238.50	0.0000
C:M	0.20	1	0.20702	0.07	0.7972	754.60	1	754.601	194.10	0.0000
AB	1.83	1	1.83603	0.63	0.4517	7.29	1	7.29	1.88	0.2081
AC	92.83	1	92.8332	31.64	0.0005	209.67	1	209.67	53.93	0.0001
BC	7.31	1	7.31702	2.49	0.1529	46.10	1	46.1041	11.86	0.0088
Bloques	0.081	1	0.08122	0.03	0.8720	5.95	1	5.9536	1.53	0.2510
Error total	23.46	8	2.93363			31.10	8	3.8876		
Total (corr)	187.37	15				2826.41	15			
Hierro (Fe)										
A:C	205.206	1	205.206	28.89	0.0007	660.876	1	660.876	147.85	0.0000
B:Q	15.249	1	15.249	2.15	0.1810	6736.72	1	6736.72	1507.08	0.0000
C:M	150.676	1	150.676	21.21	0.0017	73.1453	1	73.1453	16.36	0.0037
AB	65.0442	1	65.0442	9.16	0.0164	1476.29	1	1476.29	330.26	0.0000
AC	0.308025	1	0.308025	0.04	0.8402	95.4041	1	95.4041	21.34	0.0017
BC	0.970225	1	0.970225	0.14	0.7213	44.3889	1	44.3889	9.93	0.0136
Bloques	0.36	1	0.36	0.05	0.8275	2.94981	1	2.94981	0.66	0.4401
Error total	56.8274	8	7.10343			35.7603	8	4.47003		
Total (corr)	494.64	15				9125.53	15			
Cobre (Cu)										
A:C	53.139	1	53.139	49.59	0.0001	3497.1	1	3497.1	1445.14	0.0000
B:Q	93.4209	1	93.4209	87.18	0.0000	3519.9	1	3519.9	1454.57	0.0000
C:M	98.3836	1	98.3836	91.81	0.0000	229.909	1	229.909	95.01	0.0000
AB	0.0187006	1	0.0187006	0.02	0.8982	997.615	1	997.615	412.26	0.0000
AC	7.6444	1	7.6444	7.13	0.0283	11.0932	1	11.0932	4.58	0.0647
BC	52.5052	1	52.5052	49.00	0.0001	40.5151	1	40.5151	16.74	0.0035
Bloques	52.962	1	52.962	49.43	0.0001	95.7462	1	95.7462	39.57	0.0002
Error total	8.57234	8	1.07154			19.3591	8	2.41989		
Total (corr)	366.646	15				8411.23	15			

Continuación de la **tabla A4**. Análisis de Varianza (ANOVA) para *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu.

Zinc (Zn)										
A:C	11138.8	1	11138.8	2887.19	0.0000	2762.62	1	2762.62	1274.48	0.0000
B:Q	410.539	1	410.539	106.41	0.0000	3125.25	1	3125.25	1441.78	0.0000
C:M	33.4067	1	33.4067	8.66	0.0186	86.583	1	86.583	39.94	0.0002
AB	114.034	1	114.034	29.56	0.0006	615.586	1	615.586	283.99	0.0000
AC	23.0424	1	23.0424	5.97	0.0403	24.7059	1	24.7059	11.40	0.0097
BC	26.9148	1	26.9148	6.98	0.0297	29.8094	1	29.8094	13.75	0.0060
Bloques	169.729	1	169.729	43.99	0.0002	199.883	1	199.883	92.21	0.0000
Error total	30.8642	8	3.85803			17.3411	8	2.16764		
Total (corr)	11947.4	15				6861.77	15			
Manganeso (Mn)										
A:C	2566.04	1	2566.04	201.86	0.0000	50.9146	1	50.9146	24.64	0.0011
B:Q	2113.9	1	2113.9	166.30	0.0000	1477.99	1	1477.99	715.18	0.0000
C:M	47.737	1	47.737	3.76	0.0886	100.379	1	100.379	48.57	0.0001
AB	1.08806	1	1.08806	0.09	0.7773	86.5747	1	86.5747	41.89	0.0002
AC	37.5316	1	37.5316	2.95	0.1241	1.9015	1	1.9015	0.92	0.3655
BC	502.836	1	502.836	39.56	0.0002	6.51755	1	6.51755	3.15	0.1137
Bloques	31.2649	1	31.2649	2.46	0.1555	98.8434	1	98.8434	47.83	0.0001
Error total	101.694	8	12.7117			16.5329	8	2.06661		
Total (corr)	5402.09	15				1839.66	15			
Agave angustifolia										
Plomo (Pb)										
Factor	Y ₁ , q _{eq}					Y ₃ , R				
	SS	Df	MS	F-R	P-V	SS	Df	MS	F-R	P-V
A:C	148.474	1	148.474	3.42	0.1014	3643.63	1	3643.63	87.14	0.0000
B:Q	494.84	1	494.84	11.41	0.0097	4898.95	1	4898.95	117.16	0.0000
C:M	0.235225	1	0.235225	0.01	0.9431	713.558	1	713.558	17.06	0.0033
AB	120.231	1	120.231	2.77	0.1345	410.569	1	410.569	9.82	0.0139
AC	14.6306	1	14.6306	0.34	0.5774	11.3064	1	11.3064	0.27	0.6172
BC	3.90062	1	3.90062	0.09	0.7719	190.233	1	190.233	4.55	0.0655
Bloques	31.36	1	31.36	0.72	0.4199	1.15026	1	1.15026	0.03	0.8724
Error total	346.973	8	43.3716			334.527	8	41.8158		
Total (corr)	1160.64	15				10203.9	15			
Cadmio (Cd)										
A:C	20.1507	1	20.1507	4.44	0.0730	1313.34	1	1313.34	18.95	0.0024
B:Q	14.7334	1	14.7334	3.25	0.1144	1505.44	1	1505.44	21.72	0.0016
C:M	0.236901	1	0.236901	0.05	0.8257	1.7689	1	1.7689	0.03	0.8770
AB	1.25611	1	1.25611	0.28	0.6149	369.024	1	369.024	5.32	0.0499
AC	6.51003	1	6.51003	1.44	0.2698	52.1284	1	52.1284	0.75	0.4111
BC	0.0100347	1	0.0100347	0.00	0.9638	19.7136	1	19.7136	0.28	0.6083
Bloques	3.36701	1	3.36701	0.74	0.4174	107.122	1	107.122	1.55	0.2490
Error total	31.7379	7	4.53398			554.564	8	69.3205		
Total (corr)	72.6588	14				3923.1	15			
Hierro (Fe)										
A:C	6.93006	1	6.93006	0.51	0.4953	659.976	1	659.976	6.53	0.0339
B:Q	116.37	1	116.37	8.57	0.0191	1172.38	1	1172.38	11.60	0.0093
C:M	6.90376	1	6.90376	0.51	0.4961	13.3225	1	13.3225	0.13	0.7260
AB	2.03776	1	2.03776	0.15	0.7086	255.68	1	255.68	2.53	0.1504
AC	6.69516	1	6.69516	0.49	0.5024	3.7636	1	3.7636	0.04	0.8518
BC	0.110556	1	0.110556	0.01	0.9303	26.7289	1	26.7289	0.26	0.6210
Bloques	11.7821	1	11.7821	0.87	0.3788	112.254	1	112.254	1.11	0.3227
Error total	108.614	8	13.5768			808.597	8	101.075		
Total (corr)	259.444	15				3052.7	15			

Continuación de la **tabla A4**. Análisis de Varianza (ANOVA) para *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia* con Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu.

Cobre (Cu)										
A:C	289.851	1	289.851	9.14	0.0165	2722.75	1	2722.75	41.74	0.0002
B:Q	80.7302	1	80.7302	2.55	0.1493	3742.99	1	3742.99	57.39	0.0001
C:M	85.1006	1	85.1006	2.68	0.1401	57.0025	1	57.0025	0.87	0.3772
AB	5.31302	1	5.31302	0.17	0.6931	319.337	1	319.337	4.90	0.0578
AC	28.4622	1	28.4622	0.90	0.3712	37.21	1	37.21	0.57	0.4717
BC	32.8902	1	32.8902	1.04	0.3383	0.0484	1	0.0484	0.00	0.9789
Bloques	92.8332	1	92.8332	2.93	0.1255	26.01	1	26.01	0.40	0.5453
Error total	253.745	8	31.7181			521.807	8	65.2259		
Total (corr)	868.925	15				7427.16	15			
Zinc (Zn)										
A:C	1.87006	1	1.87006	0.08	0.7814	307.954	1	307.954	6.17	0.0420
B:Q	13.7456	1	13.7456	0.61	0.4589	507.875	1	507.875	10.18	0.0153
C:M	7.33056	1	7.33056	0.32	0.5854	361.155	1	361.155	7.24	0.0311
AB	23.6926	1	23.6926	1.04	0.3369	236.368	1	236.368	4.74	0.0660
AC	3.05376	1	3.05376	0.13	0.7233	31.0144	1	31.0144	0.62	0.4564
BC	94.7216	1	94.7216	4.17	0.0754	1.58865	1	1.58865	0.03	0.8635
Bloques	0.718256	1	0.718256	0.03	0.8632	1.60056	1	1.60056	0.03	0.8629
Error total	181.599	8	22.6999			349.35	7	49.9071		
Total (corr)	326.731	15				1977.42	14			
Manganeso (Mn)										
A:C	30.2775	1	30.2775	3.18	0.1124	668.74	1	668.74	9.77	0.0141
B:Q	138.121	1	138.121	14.51	0.0052	1597.6	1	1597.6	23.34	0.0013
C:M	6.87751	1	6.87751	0.72	0.4201	114.49	1	114.49	1.67	0.2320
AB	4.35766	1	4.35766	0.46	0.5178	112.148	1	112.148	1.64	0.2364
AC	1.96701	1	1.96701	0.21	0.6615	13.2496	1	13.2496	0.19	0.6716
BC	13.7456	1	13.7456	1.44	0.2639	0.3025	1	0.3025	0.00	0.9486
Bloques	4.89516	1	4.89516	0.51	0.4938	6.3504	1	6.3504	0.09	0.7684
Error total	76.1773	8	9.52217			547.545	8	68.4432		
Total (corr)	276.419	15				3060.43	15			

ANEXO 4

RESULTADOS DEL AJUSTE DE DATOS A MODELOS MATEMÁTICOS

Tabla A5. Valores de los parámetros estimados para el modelo Adams-Bohart para biosorción de Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

<i>Opuntia fuliginosa</i>												
Características de las columnas	Plomo				Cadmio				Hierro			
	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00043	8648.92	0.9207	0.0012	0.00047	6574.80	0.9799	0.0001	0.0272	4853.18	0.9825	0.0001
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00056	8355.37	0.9798	0.0003	0.00075	2919.07	0.9639	0.0007	0.00012	5153.50	0.8616	0.0010
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00054	10107.92	0.9396	0.0010	0.00234	3320.84	0.9570	0.0006	0.00344	2332.50	0.9375	0.0022
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00056	12619.14	0.9340	0.0000	0.00091	2406.23	0.9885	0.0001	0.00190	1582.85	0.9828	0.0004
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00047	5329.74	0.8049	0.0038	0.00061	3619.92	1.00	0.0000	0.00125	1856.62	0.7143	0.0152
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00046	7272.46	0.8003	0.0026	0.00023	6061.42	0.9465	0.0002	0.00066	1656.98	0.9631	0.0003
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00092	5050.85	0.9688	0.0006	0.00143	3276.74	0.9622	0.0010	0.00131	2633.92	0.9927	0.0003
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00041	9679.03	0.9727	0.0005	0.00063	3700.06	0.9907	0.0003	0.00169	1894.76	0.9824	0.0004

Continuación de la **tabla A5**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Adams-Bohart para biosorción de Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

<i>Opuntia fuliginosa</i>												
Características de las columnas	Cobre				Zinc				Manganeso			
	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00246	1396.29	0.9527	0.0004	0.00185	2716.23	0.9958	0.0000	0.00398	1199.03	0.9637	0.0004
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00031	5230.41	0.8797	0.0013	0.00200	1474.34	0.9988	0.0000	0.00292	930.10	0.9803	0.0001
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00217	1888.57	0.9868	0.0001	0.00042	6980.29	0.8866	0.0002	0.01062	1088.05	1.0000	0.0000
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00066	1888.57	0.9738	0.3919	0.00426	762.43	0.9077	0.0013	0.01028	480.87	1.0000	0.0000
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00108	2285.54	0.9945	0.0000	0.00111	1843.11	0.8598	0.0022	0.00644	381.73	1.0000	0.0000
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00072	3520.27	1.2714	0.0017	0.00115	1708.66	0.8836	0.0020	0.00161	597.02	0.9793	0.0011
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00095	2304.72	0.9698	0.0008	0.00130	1108.35	1.0000	0.0000	0.00143	2174.51	0.9332	0.0131
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00129	2049.23	0.9857	0.0003	0.00276	1995.86	0.9625	0.0004	0.00164	1116.95	0.9643	0.0018

Continuación de la **tabla A5**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Adams-Bohart para biosorción de Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Agave angustifolia												
Características de las columnas	Plomo				Cadmio				Hierro			
	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00027	1382.83	0.9231	0.0082	0.00034	1291.28	0.9038	0.0012	0.01283	645.9	0.7438	0.0123
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00089	1283.31	0.9345	0.0034	0.00234	1453.38	0.8839	0.0006	0.00030	923.99	0.90232	0.0231
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00167	1128.21	0.9768	0.0093	0.00473	1384.93	0.9128	0.0011	0.00193	1323.48	0.7943	0.2381
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00727	1849.73	0.9645	0.0032	0.00633	834.45	0.9283	0.0004	0.00643	1583.58	0.8932	0.0232
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00102	1283.83	0.9573	0.0009	0.00048	755.69	0.8743	0.0023	0.00748	782.54	0.6478	0.0128
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00046	1129.32	0.9463	0.0004	0.00059	894.38	0.8937	0.0056	0.00832	683.43	0.8849	0.0093
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00192	1372.43	0.9283	0.0028	0.00239	943.34	0.9039	0.0128	0.00283	932.34	0.8458	0.0183
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00130	1723.83	0.9593	0.0007	0.00384	1023.43	0.9126	0.0002	0.00328	539.49	0.8273	0.0045

Continuación de la **tabla A5**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Adams-Bohart para biosorción de Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Características de las columnas	<i>Agave angustifolia</i>											
	Cobre				Zinc				Manganeso			
	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	k_{AB} , L/mg·min	N_0 , mg/L	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00637	1829.34	0.8348	0.0074	0.00784	834.84	0.8834	0.0283	0.00083	1283.43	0.9004	0.0184
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00563	1124.54	0.9238	0.0122	0.00839	648.34	0.8034	0.0347	0.00194	1473.48	0.8473	0.0045
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00849	834.82	0.7348	0.0584	0.00937	658.38	0.7934	0.0126	0.00255	1432.48	0.8894	0.0099
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00039	738.83	0.9234	0.7343	0.00934	748.49	0.7438	0.0184	0.00048	1573.5	0.9302	0.0112
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.00969	748.94	0.7342	0.1232	0.00583	736.23	0.8734	0.0287	0.00199	473.58	0.8932	0.0093
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.00074	593.78	0.9463	0.0231	0.00384	849.62	0.8348	0.0194	0.00245	683.68	0.8573	0.0165
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.00848	693.58	0.6433	0.0675	0.00326	1323.38	0.8332	0.0199	0.00136	893.55	0.9043	0.0286
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.00138	1213.12	0.9128	0.0023	0.00483	1483.90	0.8384	0.0038	0.00330	938.44	0.8433	0.0097

Tabla A6. Valores de los parámetros estimados para el modelo Thomas para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Características de las columnas	<i>Opuntia fuliginosa</i>											
	Plomo				Cadmio				Hierro			
	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.2520	31.08	0.9689	0.1194	0.8195	17.63	0.9937	0.0229	0.4366	15.88	0.9653	0.1221
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.4043	30.56	0.9969	0.0121	0.9217	11.94	0.9919	0.0264	0.5760	5.61	0.9761	0.1625
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.2457	45.10	0.9704	0.0887	1.3568	13.38	0.9899	0.0166	1.1794	11.17	0.9859	0.1197
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2558	49.10	0.9782	0.1089	0.8296	9.49	0.9915	0.0155	0.9468	7.62	0.9749	0.0675
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1346	32.28	0.9242	0.2050	0.5255	12.51	0.9869	0.0367	0.6711	6.83	0.9710	0.0445
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1142	35.36	0.9799	0.0994	0.3268	21.27	0.9952	0.0116	0.8422	5.22	0.9488	0.1441
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.3199	28.95	0.9665	0.0762	0.7631	13.59	0.9845	0.0238	0.5024	10.76	0.8063	0.2510
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2476	37.85	0.9906	0.0272	0.4787	15.58	0.9872	0.0224	0.8850	9.31	0.9770	0.0673

Continuación de la **tabla A6**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Thomas para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

<i>Opuntia fuliginosa</i>												
	Cobre				Zinc				Manganeso			
	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	1.8223	5.52	0.9903	0.0111	1.6025	9.62	0.9919	0.0224	1.0367	6.03	0.9520	0.1165
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.5339	15.73	0.9920	0.0264	0.3507	8.92	0.9384	0.1995	0.6347	4.80	0.9349	0.1754
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	1.1928	7.59	0.9705	0.0797	0.4411	18.69	0.9656	0.2549	0.6862	9.72	0.8954	0.2073
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2477	14.86	0.9116	0.1578	0.5739	6.84	0.9672	0.0730	1.0847	4.42	0.9502	0.0739
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.9016	8.15	0.9907	0.0349	1.0631	5.81	0.9827	0.0474	1.0015	3.86	0.9840	0.0322
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1564	21.25	0.9596	0.1211	0.4039	8.75	0.9829	0.0456	1.0203	2.23	0.9714	0.0320
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.9983	6.11	0.9829	0.0172	1.0826	3.46	0.9085	0.0424	1.5152	5.74	0.9162	0.0620
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.7295	8.09	0.9861	0.0405	0.8564	9.55	0.9766	0.0783	1.4240	3.64	0.9912	0.0067

Continuación de la **tabla A6**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Thomas para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Características de las columnas	<i>Agave angustifolia</i>											
	Plomo				Cadmio				Hierro			
	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.2468	28.58	0.9695	0.0870	0.6732	5.05	0.9442	0.1800	0.1575	5.73	0.9230	0.0464
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.9397	28.02	0.9963	0.0143	0.5960	6.03	0.9779	0.1423	0.1101	5.72	0.7182	0.2778
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.3259	48.63	0.9744	0.0746	1.6734	3.65	0.9426	0.0667	0.2941	-0.27	0.9000	0.0229
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.3738	45.46	0.9735	0.0758	0.5501	7.28	0.9534	0.1384	0.5008	2.99	0.8902	0.0182
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1129	53.56	0.9732	0.1834	0.7893	7.47	0.9190	0.2572	0.0758	9.56	0.8650	0.0981
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1369	47.93	0.9786	0.0721	0.5137	4.37	0.9187	0.1938	0.0718	12.12	0.9135	0.1565
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.2351	39.14	0.9726	0.0536	2.1658	11.53	0.8297	0.3674	0.2528	-3.46	0.9667	0.0056
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2320	47.77	0.9950	0.0152	0.7548	5.17	0.9167	0.1859	0.1732	6.65	0.9489	0.0249

Continuación de la **tabla A6**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Thomas para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

<i>Agave angustifolia</i>												
	Cobre				Zinc				Manganeso			
	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$	K_{Th} , mL/mg·min	q_0 , mg/g	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.6187	27.15	0.9233	0.0962	0.1985	6.61	0.9667	0.0549	0.1987	8.42	0.9771	0.0306
Concentración 50 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.3152	13.18	0.9749	0.0273	0.3121	6.10	0.9280	0.2148	0.1641	8.05	0.9913	0.0353
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.1486	27.07	0.8918	0.2743	0.2329	11.13	0.7269	0.1954	0.3366	-5.74	0.9750	0.0096
Concentración 50 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.1494	32.37	0.7500	0.8127	2.8369	5.84	1.0458	0.0470	0.3939	4.24	0.9888	0.0301
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1372	25.64	0.9566	0.0642	0.1228	24.35	0.8891	0.3068	0.1086	7.30	0.9761	0.0167
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1571	13.58	0.8708	0.2860	0.2473	9.70	0.9458	0.1563	0.3864	5.38	0.9282	0.1408
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.2444	14.75	0.9094	0.1873	0.4576	8.01	0.9619	0.0807	0.3979	-5.96	0.9310	0.0081
Concentración 100 ppm Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2036	14.28	0.9815	0.0674	0.1302	25.00	0.9434	0.1891	0.1808	-4.70	0.9330	0.0203

Tabla A7. Valores de los parámetros estimados para el modelo Yoon-Nelson para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

<i>Opuntia fuliginosa</i>					
Plomo					
Características de las columnas	K_{YN}, min^{-1}	τ_{cal}	τ_{exp}	r^2	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.2520	276.82	285.00	0.9689	0.1194
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.4043	511.12	523.50	0.9969	0.0121
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.2457	188.54	161.65	0.9704	0.0887
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2558	410.54	403.50	0.9782	0.1089
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1346	153.75	173.55	0.9242	0.2050
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1142	336.78	305.65	0.9799	0.0994
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.3199	68.78	60.05	0.9665	0.0762
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.2476	187.22	185.45	0.9906	0.0272
Cadmio					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0454	158.82	155.50	0.9937	0.0229
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0516	213.35	220.50	0.9919	0.0264
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0753	60.28	57.65	0.9899	0.0166
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0439	89.58	85.45	0.9915	0.0155
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0583	56.36	53.55	0.9869	0.0367
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0375	184.96	180.00	0.9952	0.0116
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0755	34.34	30.55	0.9845	0.0238
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0502	74.21	68.75	0.9872	0.0224
Hierro					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0240	144.38	127.55	0.9797	0.1221
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0294	109.74	105.05	0.9761	0.1625
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0559	58.92	56.50	0.9859	0.1197
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0482	74.76	68.55	0.9749	0.0675
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0730	31.41	27.55	0.9710	0.0445
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0913	48.15	45.00	0.9488	0.1441
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0577	23.40	18.55	0.8063	0.2510
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0986	41.75	39.55	0.9770	0.0673

Continuación de la **tabla A7**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Yoon-Nelson para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Cobre					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0867	58.02	60.54	0.9903	0.0116
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0266	314.67	315.50	0.9920	0.0264
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0539	42.00	40.51	0.9705	0.0797
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0121	151.50	150.49	0.9116	0.1578
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1057	34.76	35.50	0.9907	0.0349
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0152	217.70	210.46	0.9596	0.1211
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0949	16.08	15.51	0.9829	0.0172
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0743	39.72	40.50	0.9861	0.0405
Zinc					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0913	84.40	85.30	0.9919	0.0224
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0199	156.61	155.45	0.9384	0.1995
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0227	90.59	88.30	0.9656	0.2549
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0245	80.07	75.45	0.9672	0.0730
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.1124	27.47	30.15	0.9827	0.0474
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0427	82.79	75.90	0.9829	0.0456
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0968	9.67	10.50	0.9085	0.0424
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0822	49.74	49.85	0.9766	0.0783
Manganeso					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0577	54.21	50.48	0.9520	0.1165
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0473	64.38	55.75	0.9349	0.1754
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0526	31.71	30.47	0.8954	0.2073
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0754	31.77	30.49	0.9502	0.0739
Concentración 100 ppm Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0862	22.43	21.25	0.9840	0.0322
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.1037	21.95	20.44	0.9714	0.0320
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.1690	12.88	15.58	0.9162	0.0620
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.1394	18.59	20.54	0.9912	0.0067

Continuación de la **tabla A7**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Yoon-Nelson para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Agave angustifolia					
Plomo					
Características de las columnas	K_{YN}, min^{-1}	τ_{cal}	τ_{exp}	r^2	$\sum \left[\left(\frac{c}{c_i} \right)_{exp} - \left(\frac{c}{c_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0119	295.15	290.47	0.9695	0.0870
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0411	640.79	638.94	0.9963	0.0143
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0177	222.65	229.43	0.9744	0.0746
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0225	376.91	390.27	0.9735	0.0758
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0124	242.99	230.56	0.9732	0.1834
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0126	518.33	522.37	0.9786	0.0721
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0295	77.98	60.48	0.9726	0.0536
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0254	218.11	220.89	0.9950	0.0152
Cadmio					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0329	51.57	45.67	0.9442	0.1800
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0329	109.04	120.43	0.9779	0.1423
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0819	18.66	23.89	0.9426	0.0667
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0264	75.80	76.38	0.9534	0.1384
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0856	34.46	30.58	0.9190	0.2572
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0509	44.03	45.68	0.9187	0.1938
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.2348	26.58	33.95	0.8297	0.3674
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0749	26.08	20.29	0.9167	0.1859
Hierro					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0089	50.35	56.38	0.9230	0.0464
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0060	104.85	110.8	0.7182	0.2778
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0125	-1.63	-2.15	0.9000	0.0229
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0244	30.62	33.28	0.8902	0.0182
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0087	41.48	45.69	0.8650	0.0981
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0072	120.32	114.67	0.9135	0.1565
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0171	33.60	40.37	0.9489	0.0249
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0247	-8.84	-10.74	0.9667	0.0056

Continuación de la **tabla A7**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Yoon-Nelson para el proceso de biosorción de Pb, Cd, Fe, Zn, Mn y Cu sobre *O. fuliginosa* y *A. angustifolia*.

Cobre					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0281	298.11	290.34	0.9233	0.0962
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0162	255.50	240.68	0.9749	0.0273
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0073	136.67	150.38	0.8918	0.2743
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0085	281.29	267.85	0.7500	0.8127
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0134	130.71	143.82	0.9566	0.0642
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0127	167.20	158.46	0.8708	0.2860
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0260	34.58	37.48	0.9094	0.1873
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0192	75.71	80.15	0.9815	0.0674
Zinc					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.111	58.96	67.49	0.9667	0.0549
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0158	120.20	100.49	0.9280	0.2148
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0130	49.56	56.39	0.7269	0.1954
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.1895	59.45	45.67	1.0458	0.0470
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0122	122.26	120.82	0.8891	0.3068
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0237	101.03	110.49	0.9458	0.1563
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0460	19.91	24.58	0.9619	0.0807
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0124	130.67	135.67	0.9434	0.1891
Manganeso					
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0097	86.30	90.48	0.9771	0.0306
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0101	130.43	112.83	0.9913	0.0353
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0191	-25.27	-20.44	0.9750	0.0096
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0192	43.57	45.40	0.9888	0.0301
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	0.0111	35.59	40.29	0.9761	0.0167
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	0.0350	59.37	68.34	0.9282	0.1408
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.0375	-15.78	-22.37	0.9310	0.0081
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	0.0171	-24.78	-30.42	0.9330	0.0203

Tabla A8. Valores de los parámetros estimados para el modelo Dosis-Respuesta para el proceso de biosorción de Pb, Cd y Fe sobre *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*.

Opuntia fuliginosa												
Características de la columna	Plomo				Cadmio				Hierro			
	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{exp} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{cal} \right]^2$
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	3.895	31.99	0.9883	0.0515	7.192	17.44	0.9877	0.0224	3.239	15.09	0.9797	0.0506
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	12.12	30.44	0.9972	0.0100	11.06	11.90	0.9818	0.0307	3.434	5.38	0.9662	0.0975
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	2.360	40.94	0.9938	0.0184	4.249	12.98	0.9921	0.0128	3.216	10.61	0.9930	0.0115
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	5.983	48.38	0.9891	0.0540	3.528	9.07	0.9733	0.0355	3.394	7.22	0.9722	0.0358
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	1.748	27.51	0.9906	0.0246	3.114	11.98	0.9738	0.0423	2.301	6.30	0.9841	0.0211
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	3.795	33.90	0.9958	0.0242	6.818	20.97	0.9922	0.0133	3.765	5.17	0.9556	0.0704
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	1.866	24.29	0.9987	0.0038	2.458	12.59	0.9825	0.0250	1.250	9.01	0.9551	0.0580
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	4.412	36.76	0.9983	0.0047	3.373	14.75	0.9952	0.0079	3.883	9.05	0.9913	0.0142
	Cobre				Zinc				Manganeso			
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	4.653	5.42	0.8188	0.2113	7.431	9.46	0.9899	0.0167	2.596	5.77	0.9886	0.0217
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	8.473	15.62	0.9871	0.0425	2.672	8.27	0.9625	0.0851	2.609	4.48	0.9781	0.0519
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	2.233	7.04	0.9968	0.0045	1.973	16.98	0.9324	0.0870	1.513	7.98	1.3098	0.0422
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	1.163	12.32	0.7663	0.4127	1.569	4.89	0.9718	0.0557	2.033	3.99	0.7864	0.0334
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	3.635	7.87	0.9883	0.0157	3.280	5.61	0.9687	0.0259	1.891	3.36	0.9785	0.0260
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	2.633	19.63	0.9785	0.0637	3.067	8.15	0.9944	0.0145	2.194	1.98	0.9819	0.0195
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	1.700	5.23	0.9816	0.0177	1.220	2.85	0.8064	0.0903	2.343	5.38	0.9294	0.0465
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	2.802	7.64	0.9973	0.0038	3.558	9.27	0.9929	0.0208	2.487	3.36	0.9750	0.184

Continuación de la **tabla A8**. Valores de los parámetros estimados para el modelo Dosis-Respuesta para el proceso de biosorción de Pb, Cd y Fe sobre *Opuntia fuliginosa* y *Agave angustifolia*.

Características de la columna	Agave angustifolia											
	Plomo				Cadmio				Hierro			
	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{cal}} \right]^2$	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{cal}} \right]^2$	a	q ₀ , mg/g	r ²	$\sum \left[\left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{C}{C_i} \right)_{\text{cal}} \right]^2$
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	3.302	27.73	0.9338	0.1661	1.797	4.59	0.9012	0.1094	0.732	4.54	0.7392	0.1499
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	26.156	28.00	0.9964	0.0102	3.482	5.71	0.9669	0.0767	0.773	4.91	0.5175	0.4138
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	4.404	46.19	0.9667	0.0960	1.895	3.46	0.8439	0.1046	0.738	2.78	0.8449	0.0462
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	8.459	45.24	0.9617	0.0914	1.853	6.70	0.8588	0.1567	1.540	3.95	0.7299	0.0373
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	2.923	51.03	0.9416	0.1429	4.060	7.49	0.8817	0.1422	0.856	10.83	0.7676	0.1201
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	5.758	46.25	0.9750	0.0725	2.688	4.22	0.8494	0.2049	0.929	9.37	0.7289	0.3545
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	1.969	33.94	0.9804	0.0381	7.713	11.52	0.8155	0.1716	0.938	3.95	0.9117	0.0127
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	5.428	46.90	0.9882	0.0352	2.881	5.27	0.8472	0.1465	0.820	4.94	0.6979	0.1948
	Cobre				Zinc				Manganeso			
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	10.191	27.26	0.9157	0.0782	0.817	4.80	0.8399	0.1719	0.789	5.78	0.8146	0.2172
Concentración 50 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	4.007	12.87	0.9447	0.0585	1.747	5.38	0.8439	0.3122	1.086	5.68	0.9072	0.1813
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	0.862	20.86	0.7081	0.4282	0.545	8.61	0.4175	0.3262	1.004	3.42	0.8914	0.0982
Concentración 50 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	2.361	31.24	0.6906	0.5038	1.953	15.53	0.8908	0.1192	0.609	0.86	0.8193	0.0421
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 1 g	1.498	22.76	0.8707	0.1299	1.534	21.15	0.8997	0.1701	0.614	4.89	0.8531	0.0919
Concentración 100 ppm, Caudal 2 ml/min Masa 2 g	2.229	13.21	0.7257	0.3559	2.151	8.95	0.9221	0.0937	1.937	4.76	0.9652	0.0677
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 1 g	1.167	13.76	0.7958	0.1336	0.975	5.55	0.9433	0.0504	0.645	0.74	0.7757	0.0228
Concentración 100 ppm, Caudal 4 ml/min Masa 2 g	1.697	12.49	0.9711	0.0454	1.518	20.16	0.8541	0.2881	0.533	0.71	0.7108	0.0620