

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ING. EN BIOTECNOLOGÍA DE LOS RECURSOS

NATURALES

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

Ingeniera en Biotecnología de los Recursos Naturales

TRABAJO EXPERIMENTAL:

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LOS RESIDUOS DE

LA INDUSTRIA DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) PARA REMOCIÓN DE

METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS.

AUTORA:

ALEJANDRA ESTHEFANÍA ORDÓÑEZ OCHOA

TUTOR:

PABLO WILSON ARÉVALO MOSCOSO, Ph. D.

Cuenca, diciembre del 2017.

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Alejandra Esthefanía Ordóñez Ochoa con documento de identificación N.º 0704634617, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación «DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS», mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Biotecnología de los Recursos Naturales, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad con la facultad para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2017.



Alejandra Esthefanía Ordóñez Ochoa

C. I. 0704634617

CERTIFICACIÓN

Declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación «DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS», realizado por Alejandra Esthefanía Ordóñez Ochoa, obteniendo un trabajo experimental que cumplen con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2017.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Pablo Wilson Arévalo Moscoso

0102156957

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Alejandra Esthefanía Ordóñez Ochoa, con número de cédula 0704634617, autora del trabajo de titulación «DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS» certifico que el total contenido del trabajo experimental es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre del 2017.



Alejandra Esthefanía Ordóñez Ochoa

0704634617

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que guía mi camino, gracias a él he logrado culminar mi carrera.

A mis padres, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, que con su amor y esfuerzo me educaron y apoyaron en toda mi formación profesional.

A mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo y trabajo todo lo que me proponga se consigue.

A mi madre, por enseñarme a confiar en mí misma y hacerme ver la vida de una forma distinta: siempre se debe hacer el bien.

En especial a mis abuelos, por haberme aportado su conocimiento y experiencias de vida.

A mis compañeros, con los que he compartido grandes momentos.

A todos mis familiares, por su apoyo.

A mi director de tesis, Pablo Arévalo, Ph. D., por ser una valiosa guía y asesor en la realización de este trabajo de investigación.

RESUMEN

En el presente trabajo se investigó la biosorción de Pb y Cr por biomasa de cáscara de papa. El objetivo general fue determinar la capacidad de biosorción de la cáscara de papa para la eliminación de metales pesados. Se usó 0.1 gramos de biosorbente variando el pH con un tamaño de partícula menor a 0.3 mm dando como resultado un pH ideal de 4.0 para Pb y Cr respectivamente. Mediante el estudio de los modelos isotérmicos se calculó la tasa máxima de retención de los metales, q_{max} : 14.59 mg/g para el Pb y 98.39 mg/g para el Cr obtenido mediante Langmuir y los valores de Freundlich fueron $K = 2.78$; $n = 1.77$ para el Pb y $K = 5.65$; $n = 2.55$ para el Cr; con respecto al tiempo de contacto; para la concentración de 10 ppm su tiempo óptimo es de 60 min, para la concentración de 25 ppm es de 90 min, para las concentraciones de 50 y 100 ppm el tiempo es de 120 min. Se concluye que el biosorbente tiene una buena capacidad de biosorción de Pb y Cr respectivamente; además, que el tiempo de contacto varía en función de la concentración inicial, es decir, a mayor concentración más tiempo tomara para llevar a cabo la remoción.

Palabras clave: Biosorción, plomo, cromo, cáscara de papa, biosorbente, Langmuir, Freundlich

ABSTRACT

In the present work, the biosorption of Pb and Cr by potato peel biomass was investigated. The general objective was to determine the biosorption capacity of the potato peel for the removal of heavy metals. 0.1 grams of biosorbent was used by varying the pH with a particle size smaller than 0.3 mm resulting in an ideal pH of 4.0 for Pb and Cr respectively; by means of the study of the isothermal models the maximum rate of retention of the metals was calculated, q_{max} : 14.59 mg/g for Pb and 98.39 mg/g for Cr obtained by Langmuir and Freundlich values were $K = 2.78$; $n = 1.77$ for Pb and $K = 5.65$; $n = 2.55$ for Cr; with respect to contact time; for the concentration of 10ppm its optimal time is 60 min, for the concentration of 25 ppm is 90 min, for the concentrations of 50 and 100 ppm the time is 120 min. It is concluded that the biosorbent has a good biosorption capacity of Pb and Cr respectively; in addition, that the time of contact varies as a function of the initial concentration, that is to say, the greater concentration the longer it will take to carry out the removal.

Keywords: Biosorption, lead, chromium, potato peel, biosorbent, Langmuir, Freundlich

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	1
CERTIFICACIÓN.....	2
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
CAPÍTULO 1	15
Introducción.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	17
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo general.	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	19
1.3. Hipótesis	19
1.4. Justificación	19
CAPÍTULO 2	20
Fundamento teórico y estado del arte	20
2.1. Fundamento teórico	20

2.1.1.	Manejo de residuos sólidos.	20
2.1.2.	Valorización y técnicas de aprovechamiento de los residuos.....	22
2.1.3.	Papa (<i>Solanum tuberosum</i>).	24
2.1.4.	Métodos para el tratamiento de aguas residuales.	30
2.1.5.	<i>Biosorción</i>	33
2.1.6.	Cinéticas de biosorción.	36
2.1.7.	Metales pesados.	45
2.2.	Estado del arte.....	51
CAPÍTULO 3		55
Materiales y métodos.....		55
3.1.	Fase 1. Caracterización	55
3.1.1.	Acondicionar los residuos de la papa a las características requeridas de un biosorbente.	55
3.2.	Fase 2. Laboratorio	61
3.2.1.	Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos.....	61
3.2.2.	Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote.	61
3.2.3.	Determinar la capacidad de biosorción del biosorbente de los metales. ...	63
3.2.4.	Determinar la capacidad de reutilización del biosorbente mediante procesos fisicoquímicos	64
3.3.	Fase 3: Análisis	65

	10
3.3.1. Primera fase: Caracterización.....	65
3.3.2. Segunda fase: Laboratorio.....	65
CAPÍTULO 4	67
Resultados y discusión	67
4.1. Fase 1. Caracterización	67
4.2. Fase 2. Laboratorio	73
4.2.1. Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos.....	73
4.2.2. Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote.	77
4.2.3. Determinar la capacidad de adsorción del biosorbente de los metales.....	84
4.2.4. Determinar la capacidad de reutilización de biosorbente mediante procesos fisicoquímicos.	86
CAPÍTULO 5	89
Conclusiones y recomendaciones.....	89
5.1. Conclusiones.....	89
5.2. Recomendaciones	89
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación para identificar a los residuos sólidos.....	22
Tabla 2. Técnicas de aprovechamiento, tratamiento o disposición para residuos.	24
Tabla 3. Clasificación taxonómica de la papa	24
Tabla 4. Requerimientos generales para la planta de papa.....	27
Tabla 5. Producción nacional de papa 2014-2015.....	28
Tabla 6. Producción de papa en el Azuay.	29
Tabla 7. Mecanismos de retención.	35
Tabla 8. Modelos de estudio de biosorción.	37
Tabla 9. Clasificación de biosorbentes con respecto a varias características.....	44
Tabla 10. Pruebas realizadas con el biosorbente.	67
Tabla 11. Identificación de grupos funcionales según la longitud de onda.....	70
Tabla 12. Comparación en parejas de Tukey para el Pb.	74
Tabla 13. Comparaciones en parejas de Tukey para el Cr.	76
Tabla 14. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir y cálculos de RI para el Pb.	77
Tabla 15. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Freundlich para el Pb.	79
Tabla 16. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir y cálculo del RL para el Cr.	80
Tabla 17. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Freundlich de Cr.	82
Tabla 18. Comparación de los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich.	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Producción nacional de papa.	28
Gráfico 2. Producción de papa distribuida por zonas del país.....	29
Gráfico 3. Distribución de cultivo de papa por provincia.	30
Gráfico 4. Espectro obtenido del IR de la cáscara de papa.	70
Gráfico 5. Intervalos de concentración vs. pH para el Pb.	74
Gráfico 6. Intervalos de concentración vs. pH para el Cr.....	75
Gráfico 7. Isoterma de Langmuir linealizada para el Pb.	78
Gráfico 8. Isoterma de biosorción linealizada de Freundlich para el Pb.	79
Gráfico 9. Isoterma de Langmuir linealizada para Cr.	81
Gráfico 10. Isoterma de biosorción linealizada de Freundlich para el Cr.	82
Gráfico 11. Relación de biosorción vs. tiempo de contacto para el Pb.	85
Gráfico 12. Relación de biosorción vs. tiempo de contacto para Cr.	86
Gráfico 13. Comparación de resultados a diferentes concentraciones. Reutilización del biosorbente.	87
Gráfico 14. Comparación de resultados a diferentes concentraciones. Reutilización del biosorbente.	87

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Modelo de Langmuir.	37
Ecuación 2. Modelo de Freundlich.	37
Ecuación 3. Combinación Langmuir-Freundlich.	37
Ecuación 4. Redlich-Peterson.	37
Ecuación 5. Radke-Prausnitz.	37
Ecuación 6. Brunauer-Emmett-Teller (BET)	37
Ecuación 7. Cálculo de la tasa de biosorción del metal.	38
Ecuación 8; Isoterma de Langmuir linealizada.	40
Ecuación 9. Factor adimensional de la isoterma de Langmuir.	40
Ecuación 10. Isoterma de Freundlich linealizada.	41
Ecuación 11. Fórmula de la porosidad.	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Cáscara de la papa seca.	56
Ilustración 2. Cáscara de la papa pulverizada de 0.475 mm.	57
Ilustración 3. Vasos con agua contaminada de plomo de 10 ppm con tiempo de agitación de 10 min.	62
Ilustración 4. Microscopía electrónica de barrido de la cáscara de papa a 500x aumentos.	71
Ilustración 5. Microscopía electrónica de barrido de la cáscara de papa a 1000x aumentos.	72

CAPÍTULO 1

Introducción

En el Ecuador los residuos se manejan de diversas formas; según el último censo de Población y Vivienda (2010) se registra que el 77 % de los hogares y empresas elimina la basura en los carros recolectores, y el 23 % restante la desecha de otra manera (terrenos baldíos o quebradas, quema, entierro o depósito en ríos, acequias o canales). Solamente el 28 % de los residuos son colocados en los rellenos sanitarios, los cuales son constantemente monitoreados y controlados; pero por el limitado tiempo de vida útil se convierten en botaderos a cielo abierto. En la actualidad, la generación de residuos en el país es de 4.06 millones de toneladas métricas al año y con una tasa per cápita de 0.74 kg, se estima que para el año 2017 el país generará aproximadamente 5.4 millones de toneladas métricas anuales; por esta razón se requiere la aplicación de un manejo integral de los residuos (Ministerio del Ambiente, 2002).

La cadena de gestión integral de residuos sólidos implica un avance hacia una economía que aproveche sus desechos para generar nuevos proyectos productivos (PNGIDS, 2011).

La papa (*Solanum tuberosum*.) es una de las hortalizas de amplio uso en el mundo por su alto nivel nutritivo; según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, Food and Agriculture Organization), la mayoría de las papas producidas en Ecuador se consumen localmente teniendo como resultado una ingesta per cápita de 25 kg por año (FAO, 2008).

Cada vez la mayor utilización de productos industrializados de la papa genera restos, tanto sólidos como líquidos que generalmente son arrojados indiscriminadamente a los rellenos sanitarios, lo que nos muestra una deficiencia en la aplicación de un manejo integral de los residuos en las industrias (Ospina, 2012). Los desperdicios de los diferentes procesamientos de la papa no son aprovechados por las industrias, generando desechos orgánicos en mayor proporción. En el Ecuador desde el año 2010 al 2014 el porcentaje de residuos orgánicos de papa aumentó proporcionalmente en 7.61 % (INEC, 2014).

En la actualidad, se están aplicando métodos de aprovechamiento de los mismos, por ejemplo: en la industria farmacéutica, textil, maderera y de papel como adhesivo, aglutinante y masilla, también es utilizado por empresas de perforaciones de petróleo para lavar los pozos. La cáscara de la papa y otros residuos de la industria son ricos en almidón, que se pueden licuar y fermentar para producir etanol usado como un combustible (CIP (International Potato Center), 2014).

Pero las diferentes técnicas de gestión de residuos, aún no son suficientes, siguen llegando residuos de cáscara de papa a los diferentes rellenos sanitarios, por esta razón se pretende evaluar la capacidad de utilizar un residuo como un biosorbente natural.

Los biosorbentes naturales son utilizados en la biosorción, este proceso es otra alternativa para el tratamiento de las aguas residuales contaminadas por metales pesados.

Esto es un serio problema para el medioambiente, ocasionado por los desechos industriales de los diferentes procesos productivos; ya sea por la utilización de metales pesados y sus derivados en actividades como eliminación de plagas, combustión de productos petroquímicos, industria del caucho, industria papelera, industria maderera, metalmecánica, aerosoles, (Verdezoto & Fernández-Salvador, 2013). Los métodos

tradicionales para eliminación de metales pesados (ósmosis inversa, electrodiálisis, intercambio iónico, etc.), son costosos y poco efectivos para soluciones en concentraciones pequeñas (Andrago, 2011). Los problemas ambientales que se originan por la presencia de metales pesados son causa de muerte a especies de animales y vegetales del medio, además de provocar afecciones en la salud humana, son el propósito que nos lleva a realizar esta investigación.

La cáscara de la papa es un residuo, por esta razón se pretende utilizarlo como un biosorbente natural en el proceso de captación de metales en aguas contaminadas; se trata de dar un valor agregado a este desecho, disminuyendo así la llegada de residuos a los rellenos sanitarios y por ende ampliar la vida útil del mismo.

1.1. Planteamiento del problema

La mala gestión de residuos sólidos constituye un problema ambiental, económico y social a nivel mundial, debido al incremento constante de sus volúmenes, el manejo y la eliminación de estos, por lo general, el destino final es en los rellenos sanitarios; estos rellenos en la actualidad presentan problemas como es el inadecuado tratamiento o escape de los lixiviados (Noguera & Olivero, 2010).

En el Ecuador tenemos una generación de residuos de 4.06 millones de toneladas métricas al año, con una proyección de 5.04 millones para el año 2017 (Ministerio del Ambiente, 2002). La papa es uno de los alimentos más consumidos en el mundo, según la FAO (2008); en el Ecuador existe un consumo per cápita de 25 kg por año.

Los residuos generados por su consumo, ya sea por producto fresco o por productos industriales, generan desperdicios orgánicos en mayor proporción; desde el año 2010 al 2014 el porcentaje de residuos de la papa aumentó proporcionalmente en 7.61 % (INEC, 2014). Estos residuos tanto sólidos como líquidos son arrojados a los rellenos sanitarios

o a fuentes de agua, generando problemas sanitarios, lo cual nos muestra deficiencia en la aplicación de un manejo integral de los residuos (Ospina, 2012).

En los últimos años, una de las principales causas de contaminación del agua es el vertido indiscriminado de los efluentes, como resultado de las diferentes actividades humanas sobre todo las que provienen del área industrial; estas contienen cantidades de algunos metales pesados como cadmio, plomo, zinc y cobre, los cuales pueden ser perjudiciales para el medioambiente (Rodríguez & Contreras, 2006). Estos efluentes no reciben tratamientos previos antes de ser evacuadas a las vertientes, debido a que estos son costosos y en algunos casos poco eficientes.

La biosorción es una técnica para un mejor manejo de las aguas residuales que consiste en captar metales pesados utilizando biosorbentes, a través de procesos fisicoquímicos. La investigación y el desarrollo de la técnica de la biosorción utilizando biosorbentes naturales provenientes de residuos muestran ciertas ventajas: bajo costo, minimización de productos químicos y lodos biológicos, disponibilidad en el medio, no requiere nutrientes, recuperación de metales, reutilización de los biosorbentes (Bermejo, 2016).

Al implantar la técnica de la biosorción generaremos un impacto positivo porque se dará una valorización a un residuo, este servirá como materia prima para el proceso, así se reducirá la entrada de más desechos a los rellenos sanitarios y aumentando su vida útil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

Determinar la capacidad de los residuos generados en la industria de la papa (*Solanum tuberosum*) con la finalidad de utilizar como biosorbente para el tratamiento de aguas residuales que contienen metales pesados.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Acondicionar a los residuos de la papa a las características requeridas de un biosorbente.
- Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos.
- Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote.
- Determinar la capacidad de biosorción del biosorbente de los metales.
- Determinar la capacidad de reutilización del biosorbente mediante procesos fisicoquímicos.

1.3. Hipótesis

Si la cáscara de la papa tiene la capacidad de biosorción entonces puede ser utilizado como biosorbente para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados.

1.4. Justificación

Este trabajo de investigación se centra en dos problemas clave: primero, disminuir el ingreso de los desechos en los rellenos sanitarios, es decir, los volúmenes actuales que ingresan a los mismos cada vez se incrementan por la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de toda actividad humana. La finalidad de este trabajo de investigación es valorizar un residuo para que este sea considerado como materia prima; en consecuencia, se puede disminuir el volumen de ingreso a los rellenos sanitarios y aumentar la vida útil del mismo. El segundo punto importante es aplicar una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales cargadas de metales pesados, ya que muchas empresas descargan sus residuos directamente a las vertientes y al alcantarillado sin un tratamiento previo porque su costo es elevado. Esta investigación tiene la

finalidad de establecer una nueva técnica que utilizaría el residuo de la cáscara de la papa, considerando que el precio del proceso sería bajo con lo cual las industrias podrían usarlo.

CAPÍTULO 2

Fundamento teórico y estado del arte

2.1. Fundamento teórico

2.1.1. Manejo de residuos sólidos.

Para iniciar daremos una breve explicación sobre el concepto de residuo, según Mejía & Patarón (2014), un desecho sólido es todo sólido no peligroso, putrescible o no putrescible a excepción de los excrementos de origen animal o humano. Jiménez (2001) da a conocer que un residuo sólido es cualquier material desechado que pueda o no tener alguna utilidad, al hablar de residuo no hace referencia a la palabra desecho. Según la norma INEN 2841 (2014) de la Gestión Ambiental, Estandarización de colores para recipientes de depósitos y almacenamiento temporal de residuos sólidos, se define como:

«Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido o semisólido, resultante del consumo o uso de un bien tanto en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que no tiene valor para quien lo genera, pero que es susceptible de aprovechamiento y transformación en un nuevo bien con un valor económico agregado».

❖ *Clasificación de los residuos sólidos.*

La generación de residuos incluye actividades que van desde la generación hasta la disposición final, una de las más importantes es la identificación de los residuos con la

finalidad de clasificar para un mejor tratamiento de los mismos; En la Tabla 1 se especifica la clasificación para identificar a los residuos.

Tabla 1. Clasificación para identificar a los residuos sólidos.

Clasificación	Ejemplo
Por su naturaleza física	Seca o mojada
Por su composición química	Orgánica e inorgánica
Por sus riesgos potenciales	Peligrosos y no peligrosos
Por su origen de generación	Domiciliarios, de actividades de construcción, industriales, agrícolas, limpieza de espacios públicos, centros de salud, comerciales.

Fuente: (Mejía & Patarón, 2014); (PNGIDS, 2011).

2.1.2. Valorización y técnicas de aprovechamiento de los residuos.

La recolección de los residuos abarca diferentes etapas: almacenamiento, transporte y sistema de transferencia. Los residuos se toman de sus lugares de almacenamiento y se los deposita en el equipo propuesto a dirigirlos a las estaciones de transferencia, estas estaciones son los lugares de tratamiento o sitios destinados para su disposición final (Sánchez G. , 2007).

Mejía & Patarón (2014) dan a conocer que para aplicar una jerarquía en la gestión de residuos sólidos se debe clasificar la implementación de programas y actividades. Una jerarquía de GIRS presenta los siguientes elementos:

- **Reducción en el origen.**

La reducción en el origen hace referencia a la necesidad del tratamiento y de la disposición de los residuos, aquí se incluye el uso racional de los recursos, es decir, materias primas, residuos que puedan servir para dar energía, y el uso de materiales menos nocivos para el ambiente. En conclusión, la reducción en el origen es una de las alternativas menos costosas para solucionar problemas ambientales, mejorar los procedimientos y operaciones dentro de los rellenos sanitarios (Universidad Santo Tomás, 2013).

- ***Reutilización.***

La reutilización de los residuos es una técnica eficiente para reducir los residuos, sin pasar por procesos industriales, por lo general se puede utilizar partes o el residuo completo; por ejemplo: los envases de vidrio de diferentes productos pueden ser utilizados como contenedores. La finalidad de la reutilización es darle usos alternativos y así disminuir la contaminación por residuos sólidos (METROAMBIENTE, 2014).

El tratamiento y la transformación de los residuos sólidos se llevan a cabo fuera de la fuente de generación, y se clasifican en dos tipos; físicos y reducción; en donde la primera hace referencia que mediante los tratamientos físicos (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos , 1994), los residuos pueden ser reutilizables; en el caso del proceso de reducción este se realiza por medio de la trituración y la compactación (Sánchez G. , 2007). Luego de una compactación, se lleva a cabo la separación mecánica, en donde la separación se la realiza por el tamaño, densidad y campo eléctrico y magnético.

Terminados estos pasos se continúa con el proceso de incineración, en donde los gases producidos en la combustión son reservados como energía alternativa. Dentro de los diferentes procesos térmicos tenemos los siguientes: pirolisis, gasificación (Sánchez G. , 2007).

- ***Reciclaje.***

El reciclaje es la acción y efecto de reciclar, es decir, dar un nuevo uso al material o residuo, lo que ayuda a minimizar el consumo de recursos y a eliminar los desechos de forma deseada. El reciclaje es un tratamiento aplicado en los rellenos sanitarios; este puede llevarse de manera total o parcial, dependiendo del residuo. Con algunos materiales se puede obtener una materia prima, mientras que otros pueden generarse un producto nuevo (Porto & Gardey, 2013).

- **Técnicas de aprovechamiento.**

Tabla 2. Técnicas de aprovechamiento, tratamiento o disposición para residuos.

Residuos	Tratamiento o disposición final
Ordinarios	Relleno sanitario.
Biodegradables	Compostaje, lombricultura.
Reciclables: plásticos, vidrio, cartón y similares, chatarra	Reciclaje.
Peligrosos: con algunas restricciones dependiendo de sus características.	Aprovechamiento, incineración, rellenos de seguridad, otras tecnologías de tratamiento (como térmicos, fisicoquímicos, etc.).
Escombros	Escombreras autorizadas.

Fuente: (Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales); (Mejía & Patarón, 2014)

En el caso de los residuos biológicos se encuentran la técnica de composteo y los procesos anaerobios; luego de estos viene la disposición final de los residuos en un relleno sanitario de operación mecánica (instalación que protege la salud pública y el medioambiente), o en un relleno sanitario manual (que requiere equipo pesado para la adecuación del sitio y construcción de vías internas) (Sánchez G. , 2007).

Al hablar de un manejo integral de residuos sólidos, se hace referencia a un conjunto de diferentes actividades educativas, administrativas, operativas y técnicas las cuales se relacionan con la generación, separación, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los residuos (Mejía & Patarón, 2014).

2.1.3. Papa (*Solanum tuberosum*).

A continuación, se describe la información taxonómica de la papa (Tabla 3), la cual propone la siguiente información:

Tabla 3. Clasificación taxonómica de la papa

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Orden:	<i>Solanales</i>
Familia:	<i>Solanaceae</i>
Género:	<i>Solanum L</i>
Especie:	<i>Tuberosum L</i>

Fuente: (Rodríguez L. , 2009)

El origen de la papa se establece en Sudamérica, exactamente en Bolivia. La historia del tubérculo data desde hace unos 10 000 a 7000 años, aunque los primeros residuos se encontraron al sur de Lima (Perú). La diversificación de la especie corresponde en gran mayoría a la zona andina que empieza desde Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, hasta el norte de Chile y Argentina. Existen centros secundarios de diversificación y estos se encuentran en México, Guatemala y El Salvador; con respecto a la parte occidental están en Honduras y Nicaragua (Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM), 2014).

El Ecuador se encuentra dentro del grupo de países latinoamericanos que son fuente de origen del cultivo de papa; existen más de 232 tipos silvestres y 161 tipos de especies nativas que han sido identificadas por el INIAP, con esto se demuestra la inmensa riqueza de diversidad genética que existe en todo el callejón interandino (Reinoso, 2014).

A continuación, se da a conocer la descripción botánica de la planta de la papa.

- ***Brote.***

Se da a conocer que el brote es un tallo que se origina en el centro del tubérculo, la apariencia del brote varía dependiendo de condiciones ambientales en donde se encuentra almacenado el tubérculo ya sea por lenticelas, pelos, yema terminal, nudo, yema lateral y primordios radiculares (Egusquiza, 2000).

- ***Planta.***

El INIAP (2011) la identifica como una planta vigorosa; presenta un crecimiento rápido, es de tamaño medio, los tallos exhiben una coloración morada con pigmentos verdes, y una presencia de entrenudos largos conjuntamente de ramificación basal.

- ***Raíz.***

La raíz es una estructura subterránea encargada de la absorción del agua, se origina en los nudos de los tallos subterráneos y en asociación forma un sistema fibroso; las raíces de la planta son débiles y de poca profundidad (Egusquiza, 2000).

- ***Hojas.***

Las hojas son compuestas, imparipinnadas, presentan un color verde intenso, abiertas, débilmente diseccionadas con tricomas en el haz y envés, tienen cuatro pares de folíolos primarios que se encuentran unidos por la presencia de un peciolo y se van alternando con un par de pequeñas hojas entre ellos (INIAP, 2011).

- ***Flor.***

Se encuentran de gran cantidad a moderada; existe una hoja en formación en la base del ramillete; el cáliz presenta cinco sépalos morados con pigmentos verdes, acuminados y pubescentes; la corola muestra cinco pétalos, morada y de un tamaño medio; en los estambres se puede visualizar anteras amarillas y largas; el pistilo es verde con un estigma más largo que las anteras, la fertilidad es alta tanto en hembras como machos (INIAP, 2011).

- ***Fruto y semilla.***

Según Egusquiza (2000) el fruto de la papa se origina por el desarrollo del ovario, es el óvulo fecundando, desarrollado y maduro; con respecto al número de semillas por fruto, puede variar desde cero hasta cuatrocientos. La formación del tubérculo es una consecuencia de la proliferación del tejido que incentiva el aumento de células.

- **Requerimientos del cultivo.**

Tabla 4. *Requerimientos generales para la planta de papa.*

Clima	Altitudes superiores a 2800 m s. n. m.
Humedad	La humedad relativa moderada es un factor importante para el éxito del cultivo; si la humedad es alta en el momento de la germinación, en el periodo desde la aparición de las flores hasta la maduración del tubérculo esta resulta nociva, además que, favorece el ataque de Mildiu.
Suelo	Suelos profundos y con excelente drenaje, de preferencia franco arenosos, fértiles y ricos en materia orgánica.
Temperatura	Diurnas de 20 a 25 °C y nocturnas de 8 a 13 °C
Luminosidad	La máxima asimilación ocurre a los 60 000 lux

Fuente: (PUNINA, 2013)

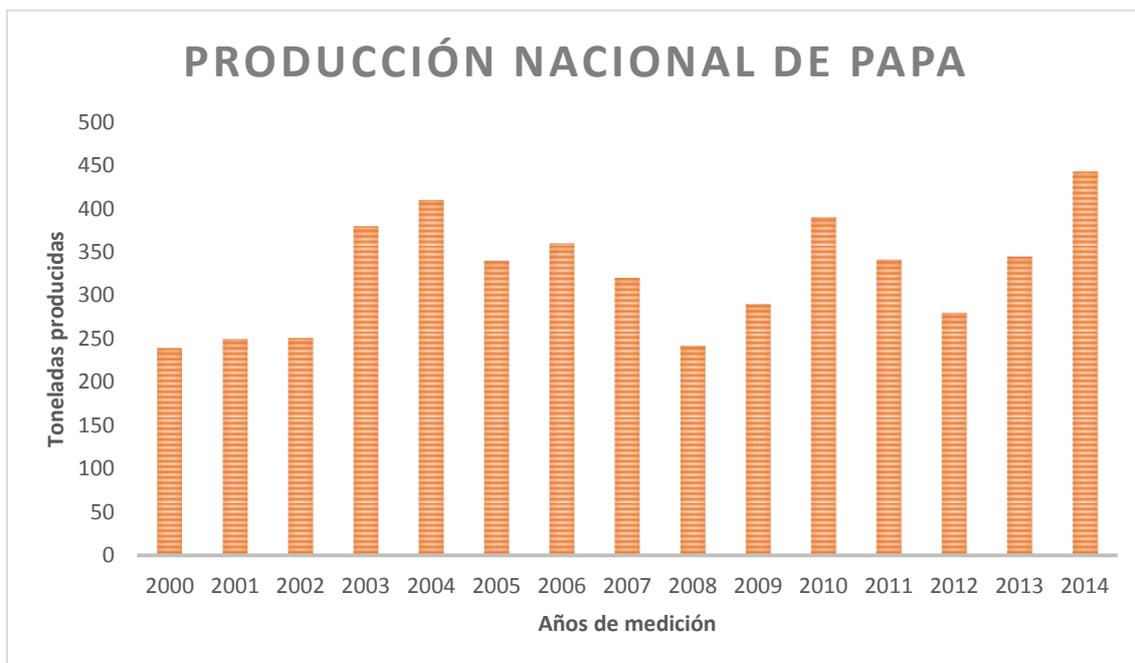
La industria y estadísticas en el Ecuador dan a conocer que en el año 2014, según el boletín situacional de la papa, se incrementó la producción en un 3,19 % con respecto al 2012, alcanzando el número más alto del periodo analizado 2000-2014, debido a las exportaciones que se incrementaron en un 31,18 %, no afectó a los precios locales, mostrando un aumento a nivel de producción de mayoristas. Con respecto a la superficie nacional cosechada se redujo en 26.69 con respecto al año 2013, sin embargo, sus niveles de rendimiento aumentaron en un 74.83 %, factor que contribuyó al incremento de producción (Ministerio de Agricultura, 2014).

El precio internacional de la papa en el mercado terminal de Los Ángeles en el 2014 disminuyó 21.81 % con respecto al 2013, esta reducción hace referencia al aumento de la producción mundial; el precio más alto se posesionó en el año 2013 con un valor de 890 USD/t, y el precio se redujo en el 2014 a 687 USD/t; considerándole el mayor al precio mínimo registrado en este periodo (548 USD/t). En el Ecuador el precio de la papa a nivel de productor y de mayoristas aumentaron en un 65.56 % y 54.39 % con respecto al 2013, el precio promedio para los productos en el 2014 fue de 16.49 USD/qq, mientras que en el año 2013 fue de 9.96 USD/qq. En cambio, a nivel

mayorista el precio en el 2014 fue de 24.78 USD/qq y para el 2013 de 16.05 USD/qq (Ministerio de Agricultura, 2014).

La producción nacional en el 2014, aumentó en un 8.79 % con respecto al 2013; en el 2014 alcanzó el nivel más alto de producción, 443,357 t, (Gráfico 1).

Gráfico 1. Producción nacional de papa.



Fuente: (Ministerio de Agricultura, 2014).

Para el año 2015 tenemos los siguientes resultados sobre la producción nacional de la papa según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continúa (ESPAC)

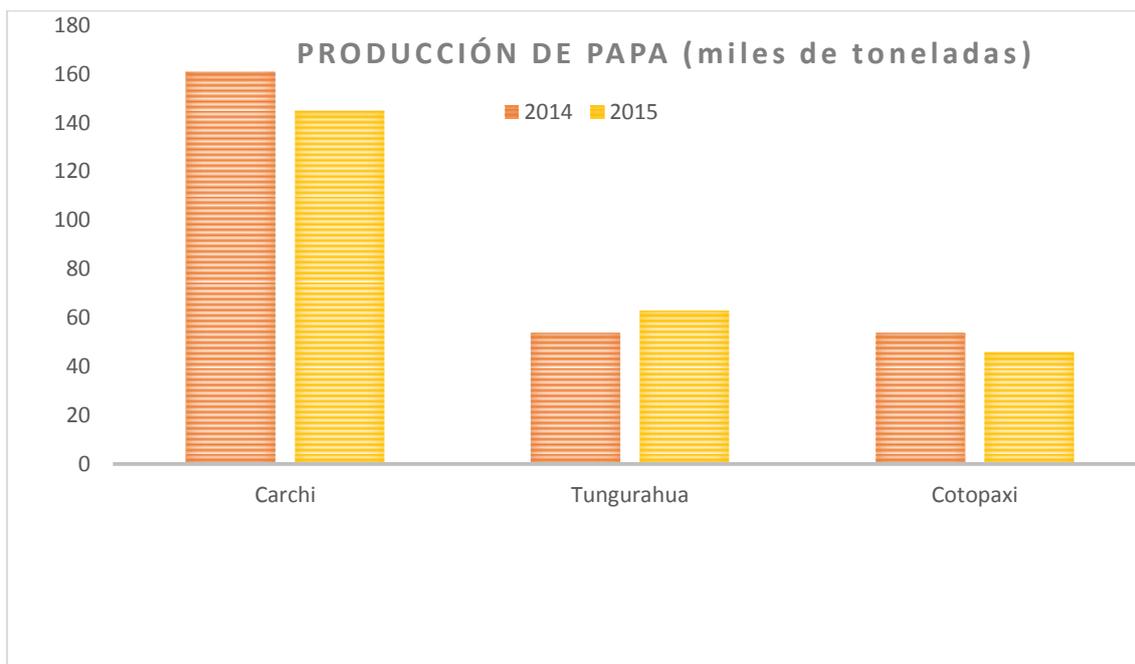
Tabla 5. Producción nacional de papa 2014-2015.

Año	Nacional		Producción (t)	Ventas (t)
	Superficie (ha)			
	Sembrada	Cosechada		
2014	34 014	33 208	421 061	371 238
2015	32 037	29 703	397 521	341 849

Fuente: (ESPAC, 2015)

La producción de la papa en el Ecuador está distribuida principalmente en tres zonas geográficas: norte, centro y sur (Gráfico 2), teniendo más acogida en la zona norte del país (ESPAC, 2015).

Gráfico 2. Producción de papa distribuida por zonas del país.



Fuente: La autora. Datos: (ESPAC, 2015)

En la provincia del Azuay se obtiene los siguientes resultados según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continúa ESPAC (2015), la producción anual representa el 1.66 % respecto a la producción nacional de este cultivo (Tabla 6).

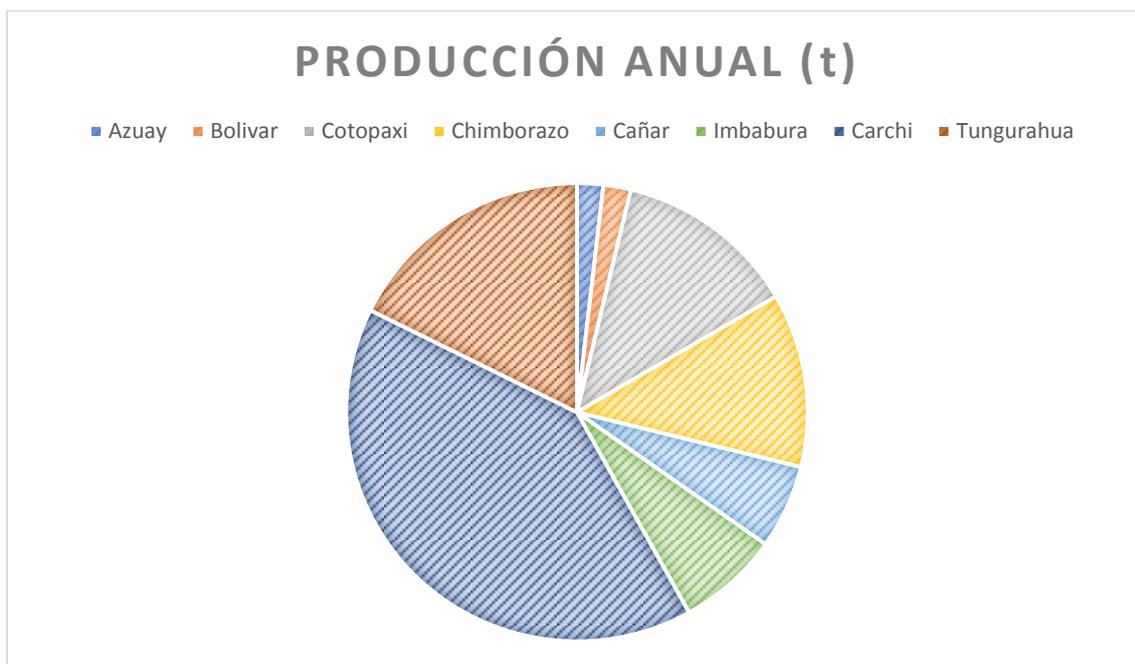
Tabla 6. Producción de papa en el Azuay.

Cultivos transitorios de mayor producción			
Cultivos transitorios	Superficie (ha)		Producción anual (t)
	Sembrada	Cosechada	
Papa	1223	992	6608
Tomate riñón	179	170	6528

Fuente: (ESPAC, 2015)

El Gráfico 3 muestra la distribución del cultivo de papa en las provincias de mayor producción.

Gráfico 3. Distribución de cultivo de papa por provincia.



Fuente: La autora; Datos: (ESPAC, 2015)

El residuo principal de esta industria es la cáscara de papa, que no es aprovechada y se deposita en el relleno sanitario; la producción anual en el Azuay es de 6608 toneladas de papa según la encuesta ENSANUT (2015), esto representa grandes volúmenes de residuos que no son aprovechados. Por lo tanto, la razón esta investigación presenta una alternativa al usar estos residuos y dar valorización al mismo.

2.1.4. Métodos para el tratamiento de aguas residuales.

Los diferentes tratamientos a los que se deben someter los efluentes deben garantizar la eliminación o la recuperación de los compuestos inorgánicos, se describen a continuación:

- **Electrodiálisis.**

La electrodiálisis o proceso de membrana se basa en una extracción selectiva de iones del agua y/o concentración de la misma, en otras palabras es la utilización de una película delgada que separa dos fases y puede actuar como una barrera selectiva al transporte de materia (AWWA, LdE, & WRC, 1996). En la actualidad, la utilización de

membranas ha sido un importante desarrollo investigativo en la aplicación para el tratamiento de aguas residuales (Judd, 2003), (Ures, Jácome, & Suárez, 2015).

❖ *Ósmosis inversa.*

La ósmosis es un proceso que se desarrolla cuando una membrana presenta una permeabilidad selectiva al agua, es decir, separa dos soluciones salinas acuosas que se presentan en distinta concentración, pero se encuentran a una misma presión y temperatura. El agua pasa de la solución más diluida a la más concentrada de forma natural a través de la membrana. Este fenómeno finaliza cuando aumenta la presión hidrostática en el lado de la membrana de la solución más concentrada (CITME, 2006).

Para la depuración de aguas residuales, la ósmosis inversa es efectiva en el momento de eliminar macromoléculas, así como iones metálicos, es decir, la finalidad es reducir el contaminante que se encuentra diluido; se basa en pasar el agua por una membrana semipermeable aplicando presión, pero este proceso no elimina todo el contaminante, lo que hace es condensarlo a pequeño volumen (Ordóñez & Moreno, 2013).

❖ *Microfiltración y ultrafiltración*

La microfiltración es una aplicación para el tratamiento de aguas residuales, la finalidad es eliminar las partículas que se encuentran en suspensión, se emplea principalmente en la aplicación de un sistema de pretratamiento de aguas residuales (Dasgupta, Sikder, Chakraborty, Cursio, & Drioli, 2015). Estas dos tecnologías las membranas funcionan como tamices, la relación que existe entre el tamaño de sustancias, contaminantes y la distribución del tamaño de los poros permite la exclusión de los contaminantes en el permeado. Las sustancias de mayor tamaño que los poros serán rechazados por la membrana, los procesos de ultrafiltración y microfiltración se basan en el mismo principio que la filtración clásica: es decir, separación mecánica mediante un tamiz, mientras que la microfiltración y la ultrafiltración, la exclusión de

partículas por la membrana tiene lugar en el caso de dispersiones coloidales y soluciones (Ures, Jácome, & Suárez, 2015).

❖ *Electrooxidación.*

La técnica de electrooxidación es un proceso de oxidación que utiliza energía eléctrica, la finalidad del proceso es que mediante el uso de electrodos especiales se obtienen compuestos capaces de oxidar fuertemente las aguas residuales, la oxidación de estas aguas produce una reducción de su DBO y su contenido en NH_4 (PROCONTROL, 2009).

La idea principal de este proceso es la oxidación total o parcial de la materia orgánica para convertirlo en un compuesto más sencillo y fácil de degradar utilizando la corriente eléctrica, se relacionan con procesos anódicos y se divide en dos; directos e indirectos (Remtavares, 2010).

❖ *Electrodeposición.*

Es un proceso electroquímico cuya finalidad es recubrir una pieza con un sistema de ánodo y cátodo, es decir, introduciendo dicha pieza en un baño químico aplicando cargas eléctricas debidamente calculadas para realizar este recubrimiento. El agua contaminada por metales proveniente de procesos industriales (Hoyos, Martínez, & Salazar, 2007).

❖ *Precipitación química.*

La precipitación química en el tratamiento de aguas residuales se basa en la adición de productos químicos con la finalidad de alterar el estado de los sólidos que se encuentra disueltos y en suspensión para así poder facilitar su eliminación por sedimentación. Otro resultado de adicionar químicos es el incremento en los constituyentes disueltos en el agua residual; los procesos químicos junto a operaciones físicas se han desarrollado para proporcionar un tratamiento secundario a las aguas

residuales no tratadas, por ejemplo: eliminación de nitrógeno, fósforo o de ambos a la vez (Oyarzo, 2007).

❖ *Biorremediación.*

La aplicación de la biorremediación se basa en usar seres vivos capaces de metabolizar, es decir, transformar, degradar, disminuir o eliminar de un ecosistema a sus contaminantes. La finalidad es reproducir lo que ocurre en los suelos cuando existe depuración de manera natural, sin necesidad de técnicas costosas ni grandes gastos o impactos al ambiente (Olmedo, 2013).

❖ *Fitorremediación.*

Se caracteriza por ser un sistema de limpieza que tienen las plantas; esta técnica se basa en utilizar plantas que actúan como trampas o filtros que descomponen los contaminantes o estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo o agua y los fijan a sus raíces, tallos o metabolizan tal como lo hacen los microorganismos para al final convertirlos en compuestos menos peligrosos y más estables (Arias, Betancur, Gómez, Salazar, & Hernández, 2010).

2.1.5. Biosorción.

La biosorción es una técnica que describe la eliminación de metales pesados por la intervención de una biomasa no viva a partir de soluciones acuosas; la metodología de remoción no está controlada por el metabolismo. La bioacumulación indica el proceso activo por el cual los metales son eliminados por la actividad metabólica de un organismo vivo (Sala L. , y otros, 2010). La contaminación del agua producida por metales pesados es un problema de gran importancia a nivel mundial, debido a que estos tienen un alto índice de toxicidad (Vera, 2015).

La biosorción describe la eliminación o reducción de metales pesados en el agua; este proceso es más económico ya que utiliza biosorbentes de origen natural y son

fuentes de energía limpia como por ejemplo los diferentes desechos de la agricultura (Sala L. , y otros, 2010).

En la actualidad, los estudios realizados en el proceso de biosorción se han incrementado por la necesidad de eliminar los metales pesados que provienen de los diferentes efluentes industriales, como los que derivan de la minería y demás procesos industriales; por lo que estos estudios se basan en ocupar materia prima de bajo costo y con potencial de ser utilizados en el proceso (Bermejo, 2016). El proceso de biosorción es aplicable como técnica de refinamiento en aguas, en concentraciones con rangos de 1 a 100 ppm (Sala L. , y otros, 2010).

El proceso de biosorción presenta varias ventajas entre ellas tenemos que las plantas para tratamiento de aguas residuales incluyen técnicas sencillas para el uso de residuos, la captación de iones metálicos pesados es selectiva, de bajo costo, disponibles y de fácil regeneración (Fadzil & Ibrahim S, 2016). Según Sala y otros (2010), los biomateriales utilizados en este tipo de procesos actúan en tiempos cortos de contacto, generan efluentes de alta calidad, con la posibilidad de trabajar en un amplio rango de condiciones y se minimiza el volumen de sedimento químico y/o biológico a ser desechado, se logra alta eficiencia en la detoxificación de efluentes muy diluidos.

Con respecto a las desventajas del proceso de biosorción tenemos que existen materiales que necesitan un previo tratamiento para activarse y ser así un buenos biosorbentes. En el caso de no contar con dicho tratamiento pueden presentar varios inconvenientes como por ejemplo: baja capacidad de adsorción, altos niveles de DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda biológica de oxígeno), así como también la liberación de compuestos orgánicos solubles a partir de materiales de plantas, es decir, debido al agotamiento del oxígeno presente en el agua, por esta razón amenazan la vida acuática (Fadzil & Ibrahim S, 2016).

La utilización de algunas biomásas o biomateriales como biosorbentes se encuentran limitados por la inestabilidad química y estructural (Mendoza & Molina, 2015); por esta razón, es necesario probar técnicas de laboratorio que permitan evaluar la eficiencia del biosorbente sobre la captación de los metales de las diversas biomásas.

2.1.5.1. Mecanismos del proceso de biosorción.

Debido a los diferentes tipos de biomasa que existen para la eliminación de metales pesados, los mecanismos que existen se describen en dos sentidos: la captación pasiva de iones metálicos y la captación de iones a través de una membrana celular (Ordóñez & Moreno, 2013). La retención o captación del metal en diferentes partes del biosorbente se explica en la Tabla 7.

Tabla 7. Mecanismos de retención.

Mecanismos	Definición
Complejación	El metal se une a los centros activos de la pared celular mediante enlaces químicos formando determinados complejos.
Adsorción física	La unión entre la superficie del sorbente y el metal se produce por fuerzas de atracción electrostática o de Van der Waals. En este caso, la biosorción es rápida y reversible.
Intercambio iónico	Propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con iones propios de los polisacáridos ya que gran parte de los sorbentes contienen sales de Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} en sus estructuras.
Quimiosorción	La unión entre el sorbente y el metal se produce por enlaces químicos mediante el intercambio de electrones.
Precipitación	Se asocia a un mecanismo de defensa de algunos microorganismos, los cuales pueden producir sustancias que precipitan los elementos tóxicos acumulados en su interior o en el medio que los rodea.

Fuente: (Karna, 2013), (Muñoz, 2007), (Bermejo, 2016)

Por lo general son difíciles de explicar los mecanismos del proceso de biosorción de metales pesados, aunque existen investigaciones que indicarían que el intercambio

iónico es el principal mecanismo de captación del metal por la biomasa (Sala L. , y otros, 2010).

La biosorción de metales pesados hace referencia a la captación de metales pesados a través de mecanismos físicos químicos (adsorción o intercambio iónico) se lleva a cabo con la utilización de un biomaterial completo, en este proceso intervienen dos fases: la sólida (biosorbente) y una líquida (solvente, que generalmente es agua) que contiene a los materiales disueltos que van a ser sorbidos (iones metálicos). Debido a la afinidad que tiene el biosorbente con los iones metálicos, este último es atraído y se enlaza por diferentes mecanismos: intercambio iónico, quelación, quimiosorción, fisiosorción (Inga, 2012).

El proceso de biosorción se caracteriza por la retención del metal mediante una correlación fisicoquímica del metal con la superficie celular del biosorbente (celulosa, lignina, compuestos pécticos y demás) (Muñoz, 2007).

2.1.6. Cinéticas de biosorción.

Existen diferentes modelos físicos y químicos para estudiar los equilibrios de adsorción; estos modelos relacionan la cantidad de metal adsorbido por unidad de masa del biosorbente (q) con la concentración del metal en solución (C_{eq}) (Sánchez A., 2016).

Este fenómeno pertenece a un sistema bajo de energía y se caracteriza por la relación que existe entre el soluto-soporte, se presentan de dos formas: la adsorción física (fisiosorción) que se basa en las fuerzas intermoleculares débiles (Van der Waals o fuerza electrostática), estos efectos son reversibles, y la segunda forma es la adsorción química o quimiosorción, esta se basa en las fuerzas de naturaleza covalente, cuyos efectos son por lo general irreversibles (Red temática de Ciencias de la Tierra, 2011).

La captación de una molécula específica depende de la cinética de adsorción; es decir, depende de la velocidad en función del tiempo con la cual la molécula específica pasa de la fase líquida a la fase sólida; la cinética de biosorción se basa en las leyes de transferencia de masa (Flores, M, & Tapia, 2001).

A continuación (Tabla 8) se presentan las ecuaciones que describen los modelos más empleados en los estudios de biosorción.

Tabla 8. Modelos de estudio de biosorción.

Modelos	Ecuación	Referencia
Langmuir	<i>Ecuación 1. Modelo de Langmuir.</i> $q = \frac{bq_m C_{eq}}{1 + bC_{eq}}$	(Langmuir, 1918)
Freundlich	<i>Ecuación 2. Modelo de Freundlich.</i> $q = K_f C_{eq}^{1/n}$	(Freundlich, 1906)
Combinación Langmuir-Freundlich	<i>Ecuación 3. Combinación Langmuir-Freundlich.</i> $q = \frac{q_m b C_{eq}^{1/n}}{1 + b C_{eq}^{1/n}}$	(Sips, 1948)
Redlich-Peterson	<i>Ecuación 4. Redlich-Peterson.</i> $q = \frac{K_{Rp} C_{eq}}{1 + a_{Rp} C_{eq}^\beta}$	(Redlich & Peterson, 1959)
Radke-Prausnitz	<i>Ecuación 5. Radke-Prausnitz.</i> $q = \frac{\alpha \tau C_{eq}^\rho}{\alpha + \tau C_{eq}^{\rho-1}}$	(Radke & Prausnitz, 1972)
Brunauer-Emmett-Teller (BET)	<i>Ecuación 6. Brunauer-Emmett-Teller (BET)</i> $q = \frac{BQ^0 C_{eq}}{(C_s - C_{eq})1 + (B - 1)C_{eq}/C_s}$	(Brunauer, Emmett, & Teller, 1938)

Fuente: (Sánchez A. , 2016)

Según los estudios de Selatnia y otros (2004) los modelos matemáticos más aplicados en el proceso de biosorción son los de Freundlich y Langmuir debido a su sencillez y capacidad predictiva. Freundlich supone que adsorbe una monocapa de soluto sobre la superficie del biosorbente estableciendo interacciones entre las moléculas que están siendo adsorbidas y una distribución heterogénea de los sitios de adsorción debido a que existen varios sitios de unión. El modelo de Langmuir supone

que tiene una monocapa de adsorción con distribución homogénea tanto de los sitios de captación y las energías de adsorción sin correlación entre las moléculas adsorbidas.

Las isothermas de biosorción son ecuaciones que se obtuvieron de pruebas racionales o empíricas, estas permiten cuantificar la adsorción, considerando a la temperatura constante. Estas ecuaciones definen puntos de equilibrio de adsorción relacionando así la cantidad de soluto adsorbida por unidad de adsorbente con la concentración residual del adsorbato o biosorbente (Andrago, 2011).

Las isothermas de biosorción más conocidas son:

- Isotherma de Langmuir.
- Isotherma de Freundlich.

Las isothermas de adsorción definen la capacidad de biosorción de la solución, la isotherma de adsorción es la relación que depende de la temperatura constante, de la cantidad del elemento adsorbido por el peso de adsorbente (Muñoz, 2007).

Larenas, Andrago & Inga (2008) consideran que la utilización de los modelos Langmuir y Freundlich se aplica en relaciones de las concentraciones iniciales y finales de los ensayos, así también como la masa de la muestra empleada, determinándose la tasa máxima de retención según los modelos (Ecuación 1), que se propone que:

Ecuación 7. Cálculo de la tasa de biosorción del metal.

$$q = \frac{(C_i - C_e) * V}{X_o}$$

Donde:

q = Tasa de biosorción del metal (mg del metal /g de biosorbente)

C_i = Concentración inicial del metal en la solución (mg/l)

C_e = Concentración final del metal (en equilibrio) en solución (mg/l)

X_o = Cantidad de biosorbente agregada (g)

V = Volumen de solución (l)

❖ Isoterma de Langmuir

Langmuir (1918) utilizó este modelo para la adsorción de un gas sobre carbón activo, formándose una monocapa, en el cual los dos principales parámetros manifiestan la capacidad máxima de adsorción del sólido y la atracción del mismo por el gas. En este modelo la afinidad entre los iones del metal y la superficie del biosorbente se basa en la fuerza física (fuerzas de Van der Waals), no se tiene en cuenta las agrupaciones moleculares ni las variaciones de energía que se forman de la interacción con el material. Para poder aplicar esta isoterma hay que considerar las siguientes suposiciones:

- La superficie de adsorción debe ser uniforme.
- Se forma una monocapa de moléculas adsorbidas.
- No hay correlación entre las moléculas captadas por el sorbente, es decir, la velocidad de adsorción por el centro activo es uniforme.
- Todas las moléculas del sorbato¹ se adsorben siguiendo el mismo mecanismo.

Al hablar de «superficie ideal», se caracteriza por una adsorción constante e independiente del recubrimiento u ocupación de la superficie. Langmuir consideró que en un sistema formado por una superficie maciza y un gas, las moléculas del gas chocarían con la superficie constantemente, y una porción de ellas quedaría adjunta al sólido, pero debido a la energía cinética y vibracional, estas moléculas con más energía se separarían de la superficie, por ende cuando se encuentran en estado estacionario se alcanza un equilibrio: la velocidad con que las moléculas se adsorben (chocan y adhieren) es igual a la velocidad a la que se separan de la superficie. El desarrollo puede

¹ Entiéndase por los metales pesados de estudio.

asemejarse a una reacción reversible entre el sorbato y los centros activos de la superficie sólida (Lara M. A., 2008)

Para la isoterma de Langmuir se puede expresar la ecuación graficando l/q vs. l/Ce (realizándose así una regresión lineal con lo que se obtiene la ecuación $y = mx + b$), obteniéndose la siguiente relación (Larenas, Andrango, & Inga, 2008):

Ecuación 8; Isotherma de Langmuir linealizada.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{b * q_{max} * C_e}$$

Donde:

$Q_{máx}$ = Tasa máxima de retención del metal (mg de metal/g biosorbente)

b = Constante relacionada con la afinidad del biosorbente por los iones del metal, siendo b la ordenada y su recíproco la tasa máxima de retención del metal.

Pudiendo evaluarse la isoterma a partir de un factor adimensional RL . Así:

Ecuación 9. Factor adimensional de la isoterma de Langmuir.

$$RL = \frac{1}{1 + b * C_i}$$

Donde los valores de RL indican:

$RL = 0$ Sistema isotérmico irreversible.

$0 < RL < 1$ Sistema isotérmico favorable, siendo $R = 1$ lineal

$RL > 1$ Desfavorable, debido a que se observa que la sorción del metal no es significativa.

❖ Isotherma de Freundlich

Freundlich (1906) supone que la superficie del sorbente es heterogénea y que las posiciones de sorción tienen distintas afinidades; en primera instancia se encuentran las posiciones de mayor afinidad y posteriormente se van ocupando el resto. Para aplicar este método hay que tener en cuenta las siguientes suposiciones:

- No hay agrupación de moléculas después de ser adsorbidas en la superficie del material.
- No hay quimiosorción.

La isoterma de Freundlich será válida cuando la adsorción sea solamente un proceso físico y no exista un cambio en la disposición de las moléculas cuando han sido adsorbidas (Sánchez A. , 2016). Este modelo es una curva que relaciona la concentración del metal que se encuentra en la superficie del sorbente con la concentración del metal en la solución acuosa con la que se encuentra en contacto.

Para esta isoterma se grafica $\log Ce$ vs. $\log q$ (realizándose una regresión lineal con lo que se obtiene la ecuación $y = mx + b$) y se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Isotherma de Freundlich linealizada.

$$\log q = \left(\frac{1}{n}\right) \log Ce + \log K$$

Donde:

n = Constante relacionada con la intensidad de sorción del biosorbente en función de su grado heterogéneo. Siendo n recíproco de la pendiente m .

K = Constante de Freundlich relacionada con la capacidad de sorción del biosorbente.

Siendo $\log K = b$

$n > 1$ = Afinidad significativa de biosorbente por el metal.

$K > 1$ = Capacidad significativa de sorción del biosorbente.

2.1.6.1. Factores que afectan al proceso de biosorción.

El estudio de los factores que afectan el proceso de biosorción es importante, para así poder obtener resultados favorables en la captación de metales pesados, en todos los procesos de biosorción se necesita analizar diferentes parámetros del biosorbente; pH, concentración inicial del metal, el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la

temperatura (Sánchez A. , 2016). En el trabajo de Prado (1987) se menciona como principales factores que afectan a las isotermas a:

❖ *Tiempo de equilibrio.*

Según, Blázquez, Hernainz, Calera, & Ruiz (2005) el tiempo de equilibrio es el tiempo en el cual el biosorbente se encuentra saturado y no aumenta la captación del metal, por esta razón se debe realizar un estudio del tiempo de contacto para llegar a determinar el tiempo de equilibrio y se complementa con la aplicación de un modelo cinético para conocer la naturaleza del proceso. En varias investigaciones indican que la técnica de biosorción es un proceso rápido que por lo general se da entre 15 y 30 minutos donde se remueve la mayoría de metales presentes.

❖ *Temperatura.*

La temperatura es un factor importante que afecta doblemente a la adsorción: produce efecto sobre la tasa de adsorción y sobre la concentración del equilibrio. Por ejemplo: según Doyurum & Celik (2006) al aumentar la temperatura en el proceso de biosorción de plomo aumenta utilizando orujo como sólido sorbente, Ahuja, Gupta, & Saxena (1999); De Rome & Gadd (1987); Ho, Chiu, Hsu, & Hung (2004) y Dal Bosco, Sarti Jiménez, & Alves Carvalho (2005) establecen que no existe relación entre la capacidad de biosorción de Cd y la temperatura, observándose también este mismo comportamiento en la captación de Cu^{+2} , Zn^{+2} y Ni^{+2} mediante corcho (Chubar, Carvalho, & Correia, 2004). Por el contrario, Cruz, Costa, Henriques, & Luna (2004) y Aksu (2001) lograron que la capacidad de biosorción de Cd disminuya con la temperatura. Khormaei, Nasernejad, Edrisi, & Eslamzadeh (2007) hallaron resultados parecidos para el caso de biosorción de Cu utilizando residuos de naranja.

Por lo general, los procesos de biosorción se realizan a temperatura ambiente, por esta razón es una técnica económica.

❖ *pH.*

El pH es un factor importante en el proceso de biosorción, debido a que determina la especiación del metal, el grado de desprotonación y protonación de los grupos funcionales, por ejemplo, Krishnan & Anirudhan (2003) localizan capacidades de biosorción bajas para el Cd usando como biosorbente carbón proveniente de la caña de azúcar cuando se trabaja a valores de pH inferiores a 5. Gupta & Ali (2004) experimentaron la capacidad de eliminación de Cu^{+2} y Ni^{+2} en turba dentro de un intervalo de pH entre 2 y 8, sus resultados mostraron que el incremento más importante se produjo al aumentar el pH de la disolución de 2.0 a 3.5 y también por encima de un valor de pH igual a 4.5, la disminución de Ni^{+2} no sufría grandes cambios, mientras que para el Cu^{+2} se producía un aumento hasta un pH de 6.0. Tiene incidencia sobre las características de la biosorción, comúnmente, los mejores resultados se obtienen con bajos valores de pH. Se considera tres mecanismos que influyen el pH en el proceso de biosorción: a) El estado químico del sitio activo podría cambiar con el valor del pH. b) Valores extremos de pH, como los empleados para la regeneración (desorción) del sorbente. c) La especiación del metal en solución depende del pH (Sánchez A. , 2016).

❖ *Interferencia de sustancias.*

Cuando una solución tiene la presencia de una o más sustancias, puede cambiar el equilibrio de la adsorción. (Sánchez A. , 2016).

2.1.6.2. Biosorbentes.

En la actualidad, las diferentes investigaciones sobre la biosorción dan a conocer principalmente el aprovechamiento de los materiales residuales y de los subproductos que se derivan de diferentes procesos industriales (ALAMI, 2010).

Según Volesky (2003), los biosorbentes se clasifican según su origen:

- Biomasa microbial.

- Biomasa muerta.

La primera hace referencia a la biomasa obtenida a partir de microorganismos, esta engloba todo tipo de algas, hongos, bacterias y levaduras; se localiza disponible en grandes cantidades presente en el medio. La biomasa muerta considera a los residuos vegetales que proceden de procesos industriales o agrícolas, estos se pueden obtener a bajo precio. El biosorbente que se utilizará en este estudio es el residuo vegetal de la industria de la papa, propiamente la cáscara.

Debido a lo diversa que es la técnica de biosorción, existe una gran cantidad de biosorbentes que se consideran factibles para la remoción de metales. En la Tabla 9 se muestra una clasificación de biosorbentes con respecto a sus características fisicoquímicas:

Tabla 9. Clasificación de biosorbentes con respecto a varias características.

Cortezas y materiales ricos en taninos:	La corteza de un árbol es un residuo de madera y resulta efectivo como biosorbente debido a que presenta su alto contenido en taninos. El principal componente de los taninos es el ácido gálico y los demás constituyentes presentan grupos polihidroxipolifenol que son especies activas en un proceso de biosorción, pero un efecto secundario de este tipo de biosorbentes es que proporciona una coloración debido a los fenoles solubles presentes.
Lignina:	Este residuo proviene de la industria papelera, su capacidad adsorción se debe a la presencia de fenoles y otros grupos funcionales que se encuentra en la superficie de este material. El intercambio iónico es uno de los mecanismos más importantes en el proceso de biosorción por lignina.
Quitósán:	El quitósán es un desacetilado de la quitina, este se encuentra formando parte del exoesqueleto de los crustáceos, es un polisacárido y forma parte del polímero natural más abundante después de la celulosa.
Turba (carbón):	Es un material complejo con materia orgánica en descomposición que contiene lignina y celulosa; además, contiene grupos funcionales polares, como alcoholes, aldehídos, ácidos, hidróxidos fenólicos y ésteres lo que lo convierten en un adsorbente práctico.
Algas:	Debido a las diferentes propiedades del mecanismo de intercambio iónico, las algas constituyen una importante fuente de biosorbentes, debido a que estas tienen una alta afinidad de unión con metales pesados, sus paredes celulares

	<p>tienen grupos funcionales como carboxilos, fosfato hidroxilo o aminas, que se pueden unir a iones metálicos, y dependiendo del pH estos grupos son protonados o desprotonados (Murphy, Hughes, & Mcloughlin, 2009) (Saeed, Iqbal, & Akhtar, 2005).</p>
Hongos y levaduras:	<p>Presentan una alta eficiencia en la remoción de metales pesados presentes en soluciones acuosas, muchas especies de hongos como <i>Aspergillus niger</i> (Liu, y otros, 2006), <i>Mucor rouxi</i> (Yang & Viraraghavan, 2003), <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (Iqbal & Edyvean, 2004), <i>Phomopsis sp</i> (Saiano, Ciofalo, Cacciola, & Ramírez, 2005) y <i>Trametes versicolor</i> (Jarosz, Malarczyk, Pirszel, Skowronski, & Leonowicz, 2002) han sido estudiados y probados y su capacidad de biosorción para la mayoría de estos hongos es eficaz.</p>

Fuente: (Lara M. , 2008)

2.1.7. Metales pesados.

Los metales pesados son una agrupación de 40 elementos, se consideran metales pesados a los elementos que poseen un peso atómico mayor a 44 UMA y con una densidad igual o mayor a 5 g/cm³, algunos elementos son esenciales para el correcto funcionamiento biológico como Mn, Fe, Co, Zn, pero cuando se presentan en concentraciones elevadas se vuelven tóxicos, alterando el metabolismo y el funcionamiento de proteínas o la desnaturalización de las mismas, los metales más tóxicos son: plomo, mercurio, cromo y cadmio (Volesky, B, 2003).

❖ *Plomo.*

El plomo es un metal usado en distintos procesos industriales, es de color gris, suave y maleable (Dávila, 2012), su punto de fusión es de 327 °C y su punto de ebullición es de 1740 °C, se encuentra distribuido en la naturaleza, y presente en un gran número de minerales, dentro de ellos el más común es el sulfuro de plomo. No cuenta con un valor biológico, no es requerido para el normal desarrollo de los seres vivos. Este se puede acumular en los tejidos óseos y causar anemia ya que interfiere en la síntesis de glóbulos rojos, los animales absorben plomo ya sea por inhalación o por ingesta

(Fergusson, 1990), además el Pb divalente tiende a suplantar al Ca en las articulaciones de los huesos (Charris, Guerrero, & Barrera, 2011).

El plomo también es utilizado para el revestimiento de cables, fabricación de anticorrosivos, pinturas y esmaltes, en la industria de recuperación de metal y minería, entre otros (Fergusson, 1990).

Los compuestos más usados son los óxidos de plomo, silicatos de plomo, tetraetilo de plomo. Este metal forma aleaciones con muchos metales. Es tóxico, la intoxicación por plomo se llama plumbosis o saturnismo (Cervantes, 2012). Otros minerales que son importantes para la industria son los carbonatos y los sulfatos, los vanadatos, los arseniatos, los cromatos y molibdatos, los diferentes usos del plomo, se encuentra en la fabricación de acumuladores, forros para cables, elementos de construcción, municiones, pigmentos, soldaduras suaves, soldaditos de juguetes, piezas musicales (Tahir & Alaamer, 2008).

Los compuestos organoplúmbicos son utilizados también como catalizadores en la fabricación de espuma de poliuretano, estos son tóxicos dentro de las pinturas navales y tienen la finalidad de impedir la adherencia en los cascos, también se encuentran dentro de formulaciones como agentes biocidas contra bacterias, ácaros, protegen la madera contra la plaga de barrenillos, funcionan también como lubricantes e inhibidores para evitar la corrosión del acero (Cervantes, 2012). El plomo también se encuentra presente dentro de las sustancias químicas dentro de la minería y en el procesamiento de minerales, estos contaminan la tierra, causando problemas de salud a trabajadores y poblaciones aledañas a estas.

La contaminación producida por el plomo es un problema de salud pública ya que se relaciona directamente con la contaminación con el medioambiente. En la antigüedad, Discórides comenta que la intoxicación por plomo hacía que se pierda la cabeza, debido

a las pinturas que en su composición tenía este metal. En la actualidad, varios infantes que han usado utensilios o juguetes pintados con pinturas con base de plomo tienen altas posibilidades de presentar este metal en su organismo (Revistanova, 2012).

Las partículas de plomo contienen una serie de contaminantes que afectan la salud del ser humano, por lo general este contaminante está presente en el aire de zonas urbanas por la gran congestión vehicular, puesto que el plomo se encuentra en las formulaciones de aditivos para la gasolina (Revistanova, 2012).

La corrosión de tuberías hace que el plomo pueda entrar a través del agua potable, esto es común que ocurra cuando el agua se presenta ácida, por esta razón en los diferentes tratamientos de agua, deben tener un ajuste de pH. El plomo puede causar varios efectos secundarios no deseados (Cervantes, 2012), por ejemplo:

- Incremento de la presión sanguínea.
- Aborto espontáneo.
- Daño cerebral.
- Distintos tipos de cáncer.
- Disminución de la fertilidad del hombre.
- Agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad.
- Puede afectar al feto a través de la placenta de la madre.

La norma ecuatoriana TULSMA (Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente) de calidad ambiental y de descargas de efluentes: recurso agua, en el Anexo 1 del libro VI, habla sobre una norma técnica ambiental que determina los principios básicos y el enfoque para el control de la contaminación del agua, los límites permisibles para las descargas a los sistemas de alcantarillado.

Según el punto 5.2.3.6 de la Norma: las descargas al sistema de alcantarillado que provienen de actividades sujetas a una regularización deberán cumplir, al menos, con

los valores establecidos en la Tabla 4, en la cual las concentraciones de Pb deben tener un límite máximo permisible de 0.5 mg/l.

❖ **Cromo.**

El cromo es un elemento químico, su símbolo es Cr, tiene un número atómico de 24, su peso atómico es de 51.996 uma y color blanco plateado. Se lo emplea en la industria de producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y sobre todo resistentes al calor. En la naturaleza, su mineral más importante es la cromita y tiene un interés geoquímico, existen isótopos naturales del cromo; ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr , también existen isótopos producidos de reacciones radioquímicas, el más importante es el ^{51}Cr debido a que emite rayos gamma y su tiempo de vida es de aproximadamente 27 días. El cromo forma una serie de compuestos con otros elementos formando óxidos, anhídridos, peróxidos, halogenuros (Lenntech, 2017). El compuesto de mayor aplicación industrial por sus diferentes propiedades y sobre todo su capacidad de formar sales muy coloridas e insolubles es el cromo hexavalente; los compuestos de mayor interés son: el dicromato sódico, dicromato potásico y trióxido de cromo (Nodberg, 2012).

A continuación, se describe los procesos en que se utiliza el cromo (Elementos.org, 2016):

- La cinta magnética de los casetes de audio.
- El óxido de cromo (III) usado como un óxido de metal pulido.
- En los laboratorios, el ácido crómico para limpiar cristales con presencia de compuestos orgánicos.
- Cromo (III) en curtiembres.
- Diferentes compuestos de cromo para elaborar tintes o colores.
- Sales de cromo (VI) para conservación de la madera.
- Obtención de acero inoxidable (añadiendo cromo al hierro).

- Las aleaciones de hierro, níquel y cromo son fuertes y pueden soportar altas temperaturas y se usan en motores de reacción y turbinas de gas.
- El cromo es resistente a la corrosión por esta razón, muchos materiales están revestidos de este metal.

Puede presentarse en diferentes formas y ocasionar efectos sobre los organismos. El que se encuentra en el aire, agua y suelo es el cromo (III) y cromo (VI) el cual pasa al ambiente mediante procesos naturales y actividades humanas. Las actividades que incrementan las concentraciones de cromo (III) son la producción de acero, textiles, pintura, curtiembres y otras aplicaciones industriales del cromo (VI). El cromo (III) es un elemento esencial y puede intervenir en el metabolismo del azúcar y por ende causar problemas cardiacos; el cromo (VI) en cambio es tóxico para los organismos, altera el material genético y causar cáncer (Lenntech, 2017).

Comúnmente el cromo no se acumula en animales marinos, pero en altas concentraciones, por ejemplo, en el caso de los peces, puede dañar las agallas, ocasionar problemas respiratorios, también puede ocasionar aparecimiento de tumores, defectos de nacimiento, infertilidad y demás. En general, el ser humano puede estar expuesto al cromo, a través de la respiración, ingesta o mediante el contacto con la piel. El cromo (VI) es tóxico para la salud del ser humano, sobre todo para las personas que trabajan en la industria del acero y la textil, los individuos que consumen tabaco también tienen un alto grado de exposición al cromo, que causa reacciones alérgicas cutáneas, irritación y sangrado de la nariz y demás problemas de la salud que se detallan a continuación (Lenntech, 2017):

- Erupciones cutáneas.
- Problemas respiratorios.
- Debilidad.

- Cáncer al pulmón.
- Alteración del material genético.

Los metales pesados encontrados en efluentes industriales son uno de los problemas más sobresalientes en la actualidad, (Durán, 2004). Muchos de estos elementos, en bajas concentraciones son necesarios para diferentes procesos vitales para los organismos de un entorno, en el caso de las plantas, son absorbidos por las raíces y posteriormente metabolizados, pero cuando estos se acumulan en los sustratos vitales, se convierten en tóxicos.

La rápida industrialización ha extendido la contaminación y deterioro del ambiente generando daños en la salud de los organismos que viven en un entorno definido, en esto algunos de los metales pesados que pueden ser utilizados como micronutrientes se encuentran presentes en la mayoría de los efluentes ya sea en concentraciones mínimas o excediendo los límites permitidos (Loiácono, Vuanello, Solorza, Millán, & Tejada, 2012).

Los efluentes de aguas residuales que tienen presencia de metales como el cromo, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc provienen de la limpieza de metales, recubrimientos, curados, refinados de fosfatos, generación de cloro, fabricación de baterías y teñidos, etc. Los daños colaterales que provocan sobre el entorno incluyen la mortalidad de los peces, envenenamiento de ganado, mortalidad de plancton, acumulaciones en el sedimento de peces o moluscos, en esto, el hierro, calcio, magnesio o manganeso también están presentes en aguas residuales de las industrias metalúrgicas, fabricación de cemento, cerámicas; sus efectos secundarios son menos peligrosos que los anteriores, pero presentan cambios en color, dureza, salinidad del agua (Ernesto, 2008).

La norma ecuatoriana TULSMA de calidad ambiental y de descargas de efluentes: recurso agua, en el Anexo 1 del libro VI, habla sobre una norma técnica ambiental que determina los principios básicos y el enfoque para el control de la contaminación del agua, los límites permisibles para las descargas a los sistemas de alcantarillado.

Según el punto 5.2.3.6 de la Norma, las descargas al sistema de alcantarillado que provienen de actividades sujetas a una regularización deberán cumplir, al menos, con los valores establecidos en la Tabla 4, en la cual las concentraciones de cromo deben tener un límite máximo permisible de 0.5 mg/l.

2.2. Estado del arte

En este trabajo experimental se analizará la capacidad de biosorción de metales pesados utilizando la cáscara de la papa como biosorbente natural, a continuación, se presenta una revisión del estado del arte sobre el tema de biosorción y la utilización de diferentes biosorbentes.

En otras publicaciones podemos observar que una amplia gama de materiales de bajo costo y con potencial de ser utilizados en la biosorción han sido estudiados; estos incluyen madera, arcilla, cenizas, lodos activados, cáscaras de naranja y de plátano. Namasivayam y otros (1996); Annadurai y otros (2002) reportaron resultados positivos en el uso de cáscaras de plátano y de naranja para la remoción de colorantes como azul de metileno, naranja y violeta de metilo de aguas residuales. En otros experimentos, residuos de olivas mezclados con carbón fueron utilizados como medio de adsorción en columnas para la remoción de azul de metileno en aguas residuales, alcanzando hasta un 80 % de remoción del colorante, Bant, y otros (2007). Se debe recalcar que según el estudio de Pavan & Yoshitaka (2007) han logrado eliminar el colorante azul de metileno y otros colorantes catiónicos utilizando cáscaras de «fruta de la pasión» (Vargas Rodríguez, Cabañas Vargas, Gamboa Marrufo, & Domínguez Benetton, 2009).

Además, damos a conocer estudios en los que se ha trabajado con otro tipo de biosorbentes entre ellos tenemos: la cáscara de mandarina y el exoesqueleto del camarón; en donde los autores revelan que el exoesqueleto del camarón tuvo un $q_{\text{máx}}$ de 55.24 mg/g de Pb que a diferencia de la cáscara de mandarina obtuvo un $q_{\text{máx}}$ de 39.68 mg/g del mismo metal, llegando a la conclusión que el exoesqueleto del camarón tuvo una mejor retentiva en la captación de Pb (Verdugo, 2017) (Quevedo, 2017).

En el estudio Biosorción de Pb utilizando (*Solanum melongena*) publicado por Yuvaraja, y otros (2013) proponen los modelos de Langmuir y Freundlich para una descripción del proceso de biosorción. Langmuir presenta una capacidad máxima de sorción de 71.42 mg/g para iones Pb (II) a 323 K; llegando a la conclusión que «*El modelo de Freundlich es adecuado para describir la adsorción en sistemas heterogéneos, como por ejemplo en la adsorción de níquel divalente por Chlorella vulgaris*» (Aksu & Donmez, 2006).

En el estudio de *Eliminación de Cr (VI) de soluciones acuosas usando polvo de cáscara de papa como un sorbente de bajo costo* realizado por Mutongo, Kuipa, & Kuipa (2014), cuando se aplica la isotérmica de Langmuir a los datos de adsorción, se obtiene una capacidad máxima de adsorción monocapa de 3,28 mg/g, lo cual sugiere un proceso de adsorción limitado a la eficacia del grupo funcional; de hecho, se ha informado que la cáscara de patata es una fuente de compuestos fenólicos, glicoalcaloides y polisacáridos de pared celular, estos compuestos serían la fuente de los grupos funcionales, además el valor de la energía de adsorción, b , se encontró que era de 0,448 l/mg. Cuando los datos de adsorción se modelan utilizando la isoterma de Freundlich, la constante de equilibrio Toth es 0,2985 (mg/g) (l/mg) $1/n$. El valor de n fue de 2/3, que está entre 0 y 10, lo que sugiere una adsorción relativamente fuerte de iones Cr (VI) sobre la superficie del polvo de cáscara de patata.

De los modelos que involucran capacidades máximas, el modelo de Langmuir predice una capacidad máxima cercana a la obtenida experimentalmente (96.7 mg/g, a una concentración inicial de níquel de 300 mg/l), con un valor de 104.22 mg/g, en contraste, la capacidad máxima predicha por el modelo de Khan fue inferior (86.52 mg/g) y la del modelo de Toth fue superior (111.57 mg/g) a la alcanzada experimentalmente. Aun cuando los coeficientes de determinación obtenidos con los modelos de Khan y Toth fueron muy altos (0.9993 y 0.9996 respectivamente) (Reza Samarghandy, Hoseinzadeh, Taghavi, & Rahmani, 2011).

Se debe recalcar los siguientes estudios realizados con diferentes biomásas; como es el caso de King, y otros (2008), dan a conocer en su estudio un resultado de adsorción de 33.49 mg.g⁻¹ utilizando como biomaterial la *Azadirachta indica* para remover Zn; su metodología aplicada fue un pretratamiento antes de proceder a las diferentes pruebas de biosorción; mientras que Gundogdu, y otros (2009) indican que en el proceso de remoción de Pb(II) tuvieron un resultado de adsorción de 76.8 mg.g⁻¹ utilizando *Pinus brutia Ten (corteza de pino)*. Una de las técnicas para la remoción de Ni (II) en la investigación realizada por Salem & Awwad (2011) obtuvieron un resultado de adsorción de 27.548 mg.g⁻¹ al utilizar *Eriobotrya japónica*; en otro estudio, el cual fue realizado por Harmita, Karthikeyan, & Pan (2009) que removieron Cu y Cd presentes en soluciones acuosas, se llegó a la conclusión que existía una capacidad de adsorción de 80.6 mmol.g⁻¹ y 28.7 mmol.g⁻¹ utilizando como biosorbente a las ligninas kraft y organosolv.

La utilización de quitosano como un biosorbente extraído del caparazón del cangrejo para eliminar Hg y Zn (II) realizado por Rae, Gibb, & Lu (2009) y Lu, Gibb, & Cochrane (2007) obtuvo los siguientes resultados de adsorción: para el Hg un 80 % a partir de 500 mg.l⁻¹ en 60 min y para el Zn un promedio entre 105.6 y 67.6 mg. g⁻¹.

El pH es un factor importante en el proceso de biosorción. El estudio realizado por Lourie & Gjengedal (2011) indica que se presentó una remoción óptima de metales a un pH de 3.0, utilizando como biosorbente la turba con algas tratadas. La turba también se utilizó como biosorbente en el estudio de Xiong & Mahmood (2010) para la remoción de fosfatos, en el cual el resultado fue de $8.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

Finalmente, Gupta & Ali (2004) realizaron su investigación sobre la remoción de cromo presente en soluciones acuosas utilizando como biosorbente aserrín, los resultados obtenidos daban indicios de que el modelo de Langmuir es el más óptimo para la captación de metales sobre todo del Cr (VI), cuya máxima capacidad de adsorción fue de 41.5 mg/g con un valor 1.0 para pH.

CAPÍTULO 3

Materiales y métodos

En este capítulo se dará a conocer las diferentes metodologías que se aplicaron para alcanzar el objetivo planteado, de acuerdo con estos la investigación se estructuró en tres fases principales.

3.1. Fase 1. Caracterización

3.1.1. Acondicionar los residuos de la papa a las características requeridas de un biosorbente.

Para el efecto de esto se aplicó un método documental basándose en una revisión bibliográfica para así establecer parámetros y procedimientos que serán utilizados en la investigación.

❖ Obtención del biosorbente.

La materia prima utilizada en este trabajo de investigación fue obtenida de los desechos de un restaurante de papas fritas en la parroquia Torata, cantón Santa Rosa provincia de El Oro.

❖ Preparación del biosorbente.

De forma manual se procedió a eliminar impurezas presentes, ya terminada la limpieza se realizó el análisis de humedad de la cáscara, para esto, se colocó el material vegetal en una estufa a una temperatura de 70 °C hasta alcanzar una humedad del 10 %; una vez seca se trituro utilizando una licuadora industrial obteniendo un tamaño de partícula menor.

Ilustración 1. Cáscara de la papa seca.



Fuente: La autora.

- ***Determinación del tamaño de partícula.***

Para determinar el tamaño de partícula se realizó el análisis granulométrico de 861.94 g de cáscara de papa pulverizada, se tomó un peso base de tamizado de 200 g; para llevar a cabo esta prueba se utilizó un juego de tamices vibratorios *Advantech DuraTapTM* con tamizado progresivo de 0.6 mm, 0.475 mm, 0.425 mm, 0.3 mm y 0.250 mm durante 36 minutos, este procedimiento se realizó 4 veces hasta alcanzar los 861.94 g iniciales; posteriormente se recolectaron las fracciones depositadas en cada tamiz y se determinó el peso de cada una, con los resultados obtenidos se procedió a realizar un análisis granulométrico basado en histogramas que indican las fracciones separadas por tamaño partícula de la cáscara de la papa. Se debe recalcar que en esta investigación se utilizó solo las fracciones finas, es decir, las muestras con tamaño de partícula menor a 0.250 mm.



Fuente: La Autora.

❖ **Determinación de parámetros.**

• *Humedad.*

Para la determinación de la humedad se tomó 2 g de cáscara de papa pulverizada de granulometría menor a 0.250 mm, luego se determinó la humedad mediante la utilización del *analizador de humedad Mettler Toledo HB* con lámpara de halógeno, por un tiempo de una hora; este proceso se lo realizó tres veces; con los resultados obtenidos se realizaron promedios para conocer el porcentaje de humedad del biosorbente.

• *pH.*

Para realizar la prueba de pH, se tomó 90 ml de agua destilada y se la mezcló juntamente con 10 g de cáscara de papa pulverizada de granulometría menor a 0.250 mm, posteriormente se procedió a homogenizar mediante la utilización de una base y de un agitador magnético por un tiempo de 15 min, este proceso se lo realizó por tres ocasiones; por último, se midió el pH de la solución utilizando un *pH-metro Mettler Toledo Cool Pro-ISM*. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar el promedio correspondiente.

• *Cenizas totales.*

Para la prueba de cenizas totales se toma como referencia el procedimiento postulado por el Instituto de Salud Pública de Chile (PRT-701.02-011).

En primera instancia, se realizó el pesado de los crisoles vacíos con tapa, luego se colocó 2 g del biosorbente con granulometría menor a 0.250 mm en los crisoles y se pesó nuevamente, posteriormente con la utilización de una mufla se incineró hasta que se detuvo la combustión. Continuando con el procedimiento los crisoles se colocaron en la mufla durante 2 horas a una temperatura de 200 °C, después se elevó la temperatura a 550 °C por 8 horas, ya terminado este proceso cada uno de los crisoles fue retirado y se colocó en el desecador hasta que se estabilizó la temperatura, posteriormente los crisoles se pesaron en una balanza analítica hasta que la diferencia fuera de 0.1 mg. Este procedimiento se lo realizó por triplicado, con los resultados obtenidos se procedió a sacar el respectivo promedio.

- *Acidez.*

Para esta prueba se siguió el procedimiento de la Norma Técnica Peruana (NTP 2002.001-2003). Se pesó 18 g del biosorbente de tamaño de partícula menor a 0.250 mm, luego se diluyó el biosorbente en 200 ml de agua destilada para posteriormente homogenizar utilizando una base y un agitador magnético por un tiempo de 30 min, a continuación se filtró el contenido y se tomó 50 ml de la solución filtrada y se añadió 5 gotas de fenolftaleína, terminado esto se procedió a titular con NaOH al 0.1 N. El proceso se lo realizó por triplicado, con los resultados obtenidos se procedió a sacar el promedio respectivo.

- *Capacidad de intercambio catiónico.*

Esta prueba se realizó siguiendo el procedimiento del método propuesto por McConnell, Eastwood, & Mitchell (1974).

Como primer paso se pesó 2 g del biosorbente con tamaño de partícula menor a 0.250 mm, seguido se colocó en un exceso de ácido clorhídrico a 2N durante 24 horas, estas muestras se centrifugaron a 2000 rpm por un tiempo de 5 minutos, se filtraron y se

lavaron con NaCl a 0.1 M por 5 veces para eliminar el exceso de ácido, seguido se añadieron 5 gotas de fenolftaleína y se titularon con NaOH al 0.1 M, hasta que exista el cambio de color. El proceso se replicó dos veces, con los resultados obtenidos se procedió a sacar el respectivo promedio.

- *Densidad aparente y densidad real.*

Para la determinación de la densidad aparente se siguió el procedimiento aplicado por Castillo (2005) en primer lugar, se pesó una probeta vacía de 10 ml en una balanza analítica, se agregó biosorbente de tamaño de partícula menor a 0.250 mm hasta los 10 ml y se golpeó ligeramente hasta que se compacte, por último, se pesó la probeta con la muestra y se registraron los datos.

Para realizar la prueba de la densidad real se pesaron los picnómetros en una balanza analítica; se tomaron 2 g de biosorbente de tamaño de partícula menor 0.250 mm y se colocaron en cada picnómetro, se los pesó nuevamente y se anotaron los datos obtenidos; a continuación, se llenaron con agua destilada los picnómetros con muestra y se procedió a desalojar el aire, dejarlos en reposo; nuevamente se realizó el pesado y por último se lavaron los picnómetros que se volvieron a llenar pero solo con agua destilada y nuevamente se determinaron sus pesos.

Los dos procedimientos tanto para densidad real como para densidad aparente fueron realizados por triplicado, con los datos obtenidos se obtuvieron los promedios respectivos y la aplicación de la fórmula para saber el porcentaje de porosidad que tiene la muestra.

- *Porosidad.*

Para determinar la porosidad del biosorbente se siguió la fórmula expresada en el trabajo de investigación de Castillo (2005) para lo cual en primera instancia se debe

tener calculado los parámetros de la densidad real y aparente, y aplicar los resultados en la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Fórmula de la porosidad.

$$\%P = 100 \left(1 - \frac{\delta A}{\delta R} \right)$$

Donde:

δR : Densidad real.

δA : Densidad aparente.

❖ ***Identificación de componentes principales del biosorbente.***

- *Espectroscopia de infrarrojo.*

Para realizar la identificación de los componentes del biosorbente se ejecutó una prueba de espectroscopia de infrarrojo, la misma que se llevó a cabo mediante la realización de una pastilla con bromuro de potasio (KBr); se mezclaron 4 g de biosorbente de granulometría menor a 0.3 mm con 196 mg de KBr y se trituraron con un mortero hasta obtener un tamaño de partícula bastante fino, para luego ser encapsuladas en discos y se procedió a analizar en el equipo de espectroscopia de infrarrojo, las frecuencias de las muestras se encontraron entre 515 y 4400 cm^{-1} .

❖ ***Determinación de la estructura microscópica del biosorbente.***

- *Microscopio electrónico de barrido.*

Para realizar la determinación de la estructura microscópica del biosorbente, se aplicó la técnica del microscopio electrónico de barrido. Se liofilizó la muestra del biosorbente de tamaño de partícula menor a 0.3 mm, luego la muestra se colocó en un soporte fijo de aluminio puro, se aplicó una capa de carbón, encima una capa de oro con la finalidad de que las muestras tengan rigidez y conductividad en las siguientes condiciones: 15 Ma, 80 mTorr durante un minuto para obtener un espesor de aproximadamente 20 nm.

3.2. Fase 2. Laboratorio

3.2.1. Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos.

Para alcanzar este objetivo se realizó una investigación documental a través de la cual se determinó el procedimiento a utilizar en la parte experimental; luego se realizó el experimento que consistió en aplicar un sistema tipo batch; es decir, la aplicación se dio en cantidades fijas que contenían la solución problema, esta solución se encontraba a una concentración estándar (variable dependiente); se procedió a modificar estas variables; para el caso de la variable independiente (pH), seguido se procedió a agitar la mezcla para luego filtrar. A continuación, se detalla el procedimiento. Cabe recalcar que el experimento fue realizado por triplicado.

- Efecto del pH en la biosorción de Pb o Cr respectivamente

En 5 vasos de precipitación se colocaron en cada uno de ellos 50 ml de solución de 5 ppm de plomo o cromo preparadas a partir de una solución madre de 1000 ppm de plomo y de cromo; en cada uno de estos vasos se ajustó el pH de las soluciones a 2.0; 4.0; 6.0; 8.0 y 10.0 con ácido clorhídrico (HCl) 0.1 M o hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M, de acuerdo con la necesidad de los vasos y a cada uno de ellos se les adicionó 0.1 g de biosorbente, se procedió a agitar las soluciones de cada uno de estos vasos durante 2 horas, para luego filtrarlas. Con las muestras obtenidas se procedió a analizar la concentración de plomo o cromo para lo cual se utilizó la técnica de absorción atómica.

3.2.2. Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote.

Para alcanzar este objetivo partimos de una investigación documental, la cual se basó en recopilar información bibliográfica; determinando así el procedimiento a utilizar en la parte experimental; en la cual se identificó como variables el porcentaje de

concentración del metal (variable dependiente) y el tiempo de contacto entre el metal y el biosorbente (variable independiente), luego procedimos a aplicar un método estadístico para poder revisar la relación que existe entre estas variables; seguido de esto se aplicó el experimento, utilizando el procedimiento propuesto por Larenas, Andrango & Inga (2008); que se describe de la siguiente forma: la captación de los iones de Pb y Cr desde soluciones acuosas se llevó a cabo mediante un sistema tipo batch; con cantidades fijas que contienen la solución problema (estándar), se adicionó el biosorbente y se fijó al pH óptimo establecido en la prueba anterior, se procedió a aplicar agitación por diferentes tiempos establecidos para luego proceder al filtrado. A continuación, se detalla el procedimiento. Se debe tener claro que el experimento se lo realizó por triplicado.

Ilustración 3. Vasos con agua contaminada de plomo de 10 ppm con tiempo de agitación de 10 min.



Fuente: La autora

- Cinéticas de biosorción de Pb o Cr respectivamente.

En 4 vasos de precipitación se coloca en cada uno de ellos 50 ml de soluciones de 10, 25, 50 y 100 ppm de plomo o cromo (en cada vaso una concentración diferente) preparadas a partir de una solución madre de 1000 ppm de plomo; a cada vaso se le agregó 0.1 g de biosorbente vegetal y se ajustó cada uno de estos a pH 4 (óptimo para el caso con Pb y Cr). Cada una de las soluciones que se encontraban en estos vasos se mantuvieron en agitación constante durante 10, 30, 60, 90 y 120 minutos,

posteriormente se procedió a filtrar las soluciones, con las muestras listas se analizaron cada una de ellas mediante el equipo de absorción atómica, con los resultados obtenidos se aplicaron los diferentes modelos matemáticos que nos revelará cual es el mejor tiempo óptimo para realizar el proceso de biosorción y la capacidad máxima de retención del biosorbente.

3.2.3. Determinar la capacidad de biosorción del biosorbente de los metales.

Para alcanzar este objetivo se realizó una investigación documental con la recopilación de la información bibliográfica, con este respaldo se realizó la parte experimental en el laboratorio; identificando como variables la cantidad de agua que influye en la capacidad de captación de metales pesados, luego se procedió a comparar el rendimiento con el que el metal fue captado de manera más eficiente por el biosorbente; una vez determinados el pH y el tiempo de contacto óptimo para cada metal se preparó el experimento de la siguiente forma: la captación de los iones de Pb y Cr desde soluciones acuosas se llevó a cabo mediante un sistema tipo batch; con cantidades fijas de la solución problema, a concentración estándar, se adicionó el biosorbente y se fijó el pH óptimo establecido en la prueba anterior, se agitó la muestra por el tiempo ya establecido también en la prueba anterior para luego filtrarla. A continuación, se detalla el procedimiento. Se debe tener claro que el experimento se lo hizo por triplicado.

- Capacidad de adsorción de plomo o cromo respectivamente.

En 4 vasos de precipitación se coloca en cada uno de ellos 50 ml de soluciones de 10, 25, 50 y 100 ppm de plomo o cromo (en cada vaso una concentración diferente) preparadas a partir de una solución madre de 1000 ppm de plomo; a cada vaso se agregó 0.1 g de biosorbente vegetal y se ajustó a pH 4 (óptimo para ambos casos). Cada una de las soluciones se mantuvieron en agitación constante por 120 min para concentraciones

altas (50-100 ppm) y 60 min para concentraciones bajas (10-25 ppm) (óptimo para ambos casos) cumplido con el tiempo respectivo se filtraron las soluciones. Con las muestras listas se procedió al análisis individual mediante el equipo de absorción atómica; con los resultados obtenidos se realizó la comparación de los rendimientos con la prueba anterior.

3.2.4. Determinar la capacidad de reutilización del biosorbente mediante procesos fisicoquímicos

Para alcanzar este objetivo se hizo una investigación documental la cual se basó en la recopilación de información bibliográfica sobre la reutilización de material vegetal como biosorbente; a continuación, con la información encontrada se procedió a realizar la parte experimental en el laboratorio; se identificaron las diferentes variables, la reutilización del biosorbente (variable independiente) y el porcentaje de captación de metales (variable dependiente); por último, se preparó el experimento. El estudio de la capacidad de reutilizar el biosorbente en un proceso de biosorción, permitió realizar una comparación del rendimiento de reutilización.

El experimento a utilizar es el propuesto por Bustamante (2011) que indica que la captación de los iones de Pb y Cr desde soluciones acuosas se llevó a cabo mediante un sistema tipo batch; con cantidades fijas que contienen la solución problema que se encuentra en una concentración estándar, se adicionó el biosorbente y se fijó al pH óptimo establecido en la prueba anterior, se procedió a aplicar agitación por el tiempo óptimo establecido para luego se filtró, se eliminó el filtrado y se realizó el proceso de desorción del biosorbente. A continuación, se detalla el procedimiento. Se debe tener claro que el experimento se lo efectuó por triplicado.

- Capacidad de reutilización del biosorbente para Pb o Cr respectivamente.

En dos vasos de precipitación se colocó en uno de ellos 30 ml de ácido clorhídrico (HCl) al 4 % y en el otro 30 ml de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M; a cada solución se adicionó el biosorbente utilizado de la prueba anterior, cada vaso se mantuvo en agitación constante por 175 rpm durante 30 min, cumplido este tiempo se filtró cada una de las soluciones, con el biosorbente ya filtrado se realizó nuevamente las pruebas de biosorción siguiendo el procedimiento del punto 3.2.3 para el plomo o para el cromo.

3.3. Fase 3: Análisis

Con los valores obtenidos de las dos fases, se procedió a agruparlos con la finalidad de acelerar el análisis de resultados.

3.3.1. Primera fase: Caracterización.

En la primera fase con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de caracterización se empleó una estadística descriptiva, es decir, aplicamos medidas de tendencia central con la finalidad de generalizar resultados, considerando como variables las características del biosorbente.

3.3.2. Segunda fase: Laboratorio.

Para el segundo objetivo: «*Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos*», con los datos obtenidos se los agrupó con la finalidad de identificar las variables de entrada y de salida, es decir, se aplicó un diseño experimental completamente al azar, en el cual la variable de entrada es el pH con 5 niveles y la variable de salida es la concentración cuya unidad es el porcentaje de remoción de metales pesados.

Para el tercer objetivo: «*Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote*», con los datos obtenidos se realizó una regresión lineal utilizando las fórmulas linealizadas de

Langmuir y Freundlich. Para el modelo de Langmuir en el eje x tenemos $(1/q)$ que significa el coeficiente de adsorción del metal y en el eje y $(1/C_e)$ que significa la concentración final; obteniendo como resultado los valores de R (valor de regresión). Para el modelo de Freundlich se propuso el mismo gráfico con la diferencia de que los valores de $(1/q)$ se reemplazaron por (\log/q) , como también los valores de $(1/C_e)$ se reemplazaron por los valores de (\log/C_e) ; consiguiendo como resultado los valores de “R” (Valor de regresión).

Para el cuarto objetivo: «*Determinar la capacidad de adsorción del biosorbente de los metales*», con los datos obtenidos se evaluó el rendimiento de la cáscara de la papa en condiciones óptimas, este valor se obtuvo de la aplicación de la razón entre la captación en condiciones óptimas y la captación experimental utilizando factor porcentual.

Para el quinto objetivo: «*Determinar la capacidad de reutilización de biosorbente mediante procesos fisicoquímicos*», los datos de la captación de metales obtenidos de las pruebas en condiciones óptimas se sometieron a análisis de rendimiento para reutilización, el cual usó sustancias químicas fuertes. Los valores de rendimiento se obtuvieron de aplicar la razón entre el porcentaje de captación de metales y el porcentaje de captación en pruebas de reutilización utilizando factor porcentual.

CAPÍTULO 4

Resultados y discusión

4.1. Fase 1. Caracterización

4.1.1. Acondicionar a los residuos de la papa a las características requeridas de un biosorbente.

❖ *Determinación de parámetros.*

Se determinaron los parámetros del biosorbente (cáscara de papa), los resultados se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10. Pruebas realizadas con el biosorbente.

Prueba	Cáscara de papa promedio	Varianza	Desviación estándar
pH	6.7	0.0022	0.04714045
Tamaño de partícula	< 0.3 mm	-	-
Humedad	5.13 %	0.017	0.160728
Acidez	0.3986 %	0.00028289	0.016819301
Cenizas totales	0.145 %	0.0485	0.06941941
Densidad aparente	0.8168 g/ml	9.1926×10^{-5}	0.00958784
Densidad real	1.4013 g/ml	0.018981887	0.137774768
Porosidad	41.179 g/ml	29.494	5.431
Capacidad de intercambio catiónico	53.666	0.149	0.386

Fuente: La autora.

El pH del biosorbente en esta investigación alcanzó un valor promedio de 6.7; comparado con el estudio realizado por Rivas (2006) en el cual se utiliza un biosorbente proveniente del hueso de aceituna, el mismo que obtuvo un valor de pH 5; recordando la bibliografía anteriormente consultada, la biosorción suele verse favorecida en valores de pH superiores a 4 y menores a 7, por lo que el dato obtenido se encuentra dentro del rango óptimo.

Se procedió a determinar el tamaño de partícula del biosorbente, obteniendo un tamaño de partícula menor a 0.3 mm. Según el estudio realizado por Pinzón-Bedoya & Cardona Tamayo (2010) en el cual utilizaron un biosorbente de cáscara de naranja con

un tamaño de partícula de 0.3 mm, el tamaño óptimo es igual o menor a 0.3 mm, dimensión que tiene el biosorbente en esta investigación.

El biosorbente estudiado presenta 5.13 % de humedad, comparado con el resultado propuesto por Guechi & Hamdaoui (2015) en el cual utilizan papa como biosorbente, obtiene 6 % de humedad; además, se debe recalcar que estos valores se encuentran dentro del rango (5 a 10 %) establecido por Cardona, Cabañas & Zepeda (2013) en donde también dan a conocer que los valores altos de humedad en los biosorbentes pueden presentar crecimiento bacteriano y formación de aglomerados.

El porcentaje de cenizas del biosorbente que se obtuvo en esta investigación es de 0.145 % lo que indica que el contenido de minerales presentes en la muestra es bajo, comparado con el porcentaje de cenizas obtenido en el estudio realizado por Vasco (2008) en el cual utilizaron zanahoria como biosorbente, cuyo valor fue de 0.49 %. Además, se debe recalcar que en el estudio realizado por Zamora (2010) se indica que los valores de cenizas altos no son eficaces para el proceso de biosorción, debido a que existe presencia de impurezas capaces de interferir en el proceso de captación de metales pesados, en conclusión, el valor de cenizas obtenido este trabajo se considera aceptable para el proceso de biosorción.

El porcentaje de acidez promedio del biosorbente en esta investigación es de 0.4 % comparado con los estudios realizados por Cabrera (2017) y Verdugo (2017), en los cuales se aprecian valores de acidez de 0.558 % y 0.43 % utilizando cáscara de tomate de árbol y cáscara de mandarina respectivamente; además, se debe recalcar la investigación realizada por Navarro y otros (2006) en la cual da a conocer que la acidez del catión y de los grupos funcionales del biosorbente son los responsables de la selectividad y eficiencia del proceso, es decir, el valor obtenido se encuentra en un rango aceptable para el proceso de biosorción.

La densidad aparente que presenta el biosorbente es de 0.8168 g/ml, según el estudio realizado por Izquierdo Sanchis (2010) en donde utiliza como biosorbente turba con una densidad aparente de 0.807 g/ml; al comparar los datos podemos visualizar que son semejantes; según la bibliografía anteriormente consultada, los materiales adsorbentes con altas densidades aparentes presentan mejores resultados en procesos de biosorción; asimismo, se debe recalcar que estos biosorbentes pueden ser utilizados en proceso de columnas, debido a que permite el paso de sustancias en volúmenes menores.

Teóricamente la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se encuentra directamente relacionada con el tamaño de partícula; cuando existe un menor tamaño de partícula la capacidad de intercambio catiónico es mayor, el biosorbente de esta investigación posee un porcentaje de 53.666 meq/g para una muestra con tamaño de partícula menor a 0.3 mm; este valor resulta similar al obtenido en el estudio realizado por Ríos Elizalde (2015), el cual utiliza una partícula menor a 0.4mm de biosorbente de banano, obteniendo un resultado de 66.17 meq/g, verificando así que el proceso de biosorción está ligado al tamaño de partícula.

El valor de la porosidad del biosorbente es de 41.179 g/ml, comparado con el estudio realizado por Cabrera (2017) en el cual su valor de porosidad obtenido fue de 40.38 g/ml, indicando un valor regular para el proceso de biosorción, cuanto más alto sea el valor de la porosidad mayor serán los sitios activos que se encuentren disponibles para captar iones metálicos.

❖ *Identificación de componentes principales del biosorbente.*

- *Espectroscopia de infrarrojo.*

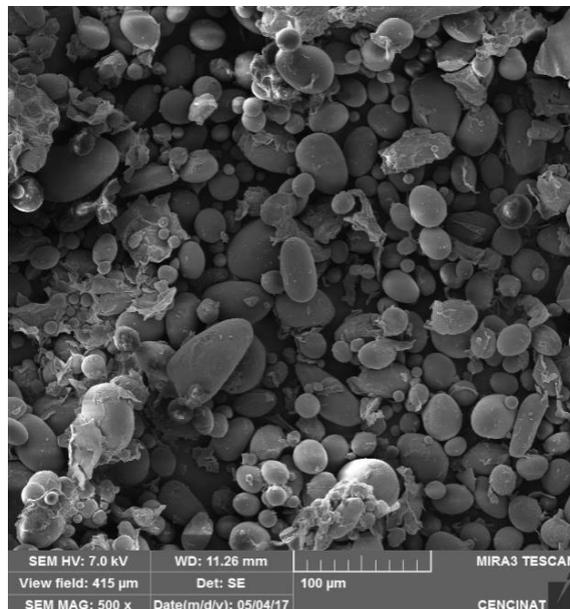
En el Gráfico 4 se muestra el espectro obtenido por el análisis infrarrojo, se distingue una banda ancha entre 2500 y 2000, en la cual se visualizan vibraciones derivadas de los grupos funcionales de ligninas, amidas que se encuentran presentes en el pico 2133.28

❖ *Determinación de la estructura microscópica del biosorbente.*

- *Microscopía electrónica de barrido.*

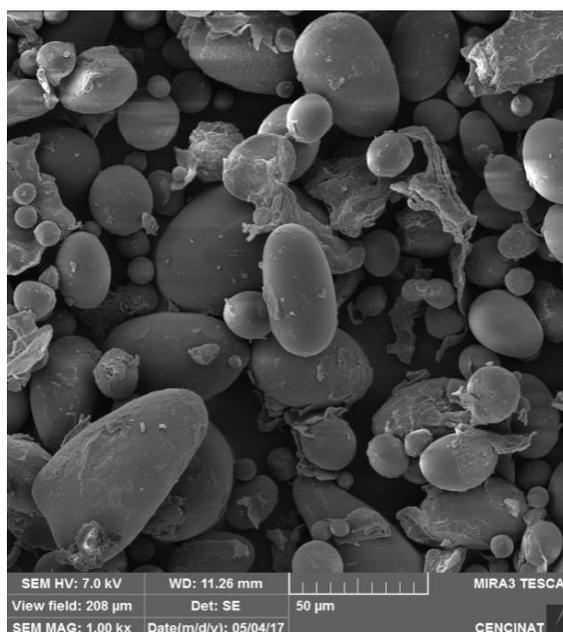
Para verificar los espacios intersticiales en el biosorbente en base a cáscara de papa se utilizó el microscopio electrónico de barrido, se tomaron imágenes de la superficie de la cáscara de papa para determinar su estructura a nivel micrométrico. La ilustración 4 corresponde a la visualización del biosorbente a 500x y la ilustración 5 a la visualización de 1000x, se puede observar en ambas imágenes que es una estructura sólida y esférica; también se percibe que existe la presencia de pequeñas láminas sólidas y grietas posiblemente debido a la fractura del biosorbente al momento de llevar a cabo la prueba. Cabe recalcar que cuando las partículas son esféricas estas tienen mayor área de adherencia, por lo tanto, es una característica importante debido a que se establecen más sitios activos para la adherencia de iones metálicos.

Ilustración 4. Microscopía electrónica de barrido de la cáscara de papa a 500x aumentos.



Fuente: La autora.

Ilustración 5. Microscopía electrónica de barrido de la cáscara de papa a 1000x aumentos.



Fuente: La autora.

En el análisis de microscopía electrónica de barrido podemos identificar que al tomar imágenes del biosorbente de cáscara de papa, en diferentes aumentos, se observan partículas de forma esférica y maciza, comparando con otro estudio realizado por Vera (2015) en el cual utilizó el bagazo de la caña como biosorbente, este presenta una superficie irregular sólida idónea para el proceso de biosorción de Pb y Cd, al igual que el estudio realizado por Jacques y otros (2007) en donde utilizaron cáscara de maracuyá para la remoción de Pb y Cr; el análisis SEM da como resultado una superficie con diversas cavidades y grietas, demostrando así que el maracuyá también presenta buenas características como un potente biosorbente.

Al comparar los diversos estudios anteriormente mencionados se puede determinar que efectivamente la superficie del biosorbente hecho de la cáscara de la papa presenta características significativas para el proceso de remoción de metales pesados por la existencia de una mayor área de adherencia.

4.2. Fase 2. Laboratorio

4.2.1. Evaluar el efecto del pH para determinar si es un factor que influye en el proceso de biosorción mediante procesos fisicoquímicos.

Con los resultados de la prueba tipo batch, las cuales se realizaron por triplicado, se efectuó la prueba de Shapiro-Wilk con la finalidad de verificar el supuesto de normalidad, obteniendo un *p-value* de > 0.1 para el Pb, concluyendo así que nuestros valores se comportan de una forma normal ($\alpha = 0.05$).

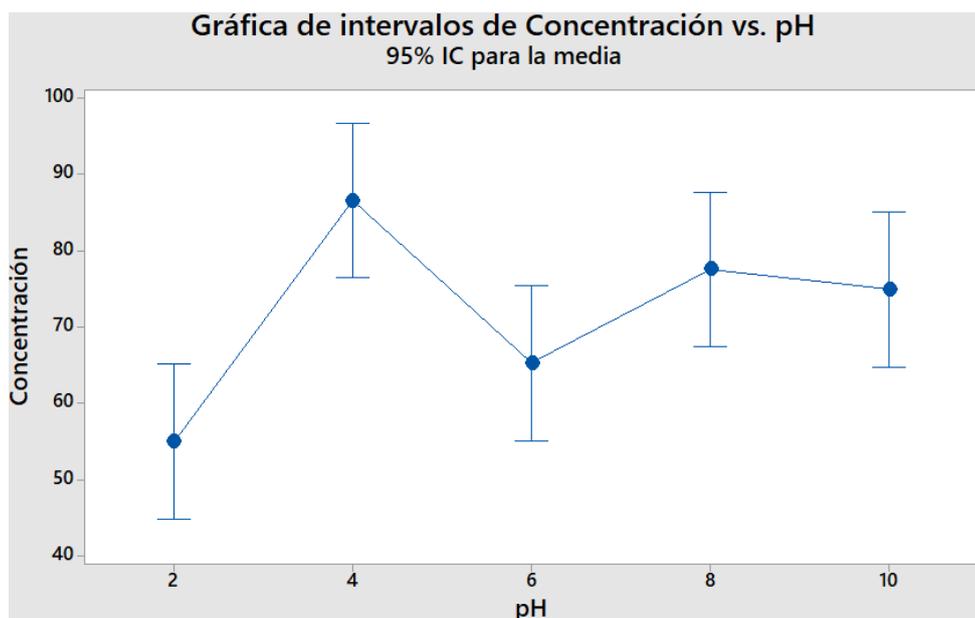
En la gráfica de intervalos de concentración vs. pH (Gráfico 5) se puede visualizar que las medias y la variabilidad son diferentes en cada uno de los tratamientos (pH). Con los datos obtenidos luego de verificar que se cumplen los supuestos se realizó el análisis estadístico aplicando un diseño completamente al azar estableciendo las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D = \mu_E$$

$$H_1 = \mu_A \neq \mu_B \neq \mu_C \neq \mu_D \neq \mu_E$$

Con el resultado del ANOVA obtuvimos un valor de *p* de 0.006 ($\alpha = 0.05$), este se encuentra por debajo del valor alfa establecido, por lo tanto, se rechaza nuestra hipótesis nula, es decir, nuestros valores se comportan de una forma distinta.

Gráfico 5. Intervalos de concentración vs. pH para el Pb.



Fuente: La autora.

Al rechazarse nuestra hipótesis nula, se establecen nuevas interrogantes para lo cual aplicamos el método de Tukey con un 95 % de confianza, los resultados de Tukey muestran las comparaciones en parejas de los diferentes tratamientos (pH), según la Tabla 12 podemos visualizar las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes, es decir, que el pH 4 se considera óptimo debido a que tiene el valor de la media más alto comparado con las medias de los demás valores de pH.

Comparaciones en parejas de Tukey

Tabla 12. Comparación en parejas de Tukey para el Pb.

Ph	N	Media	Agrupación		
4	3	86.61	A		
8	3	77.56	A	B	
10	3	74.94	A	B	C
6	3	65.28		B	C
2	3	54.94			C

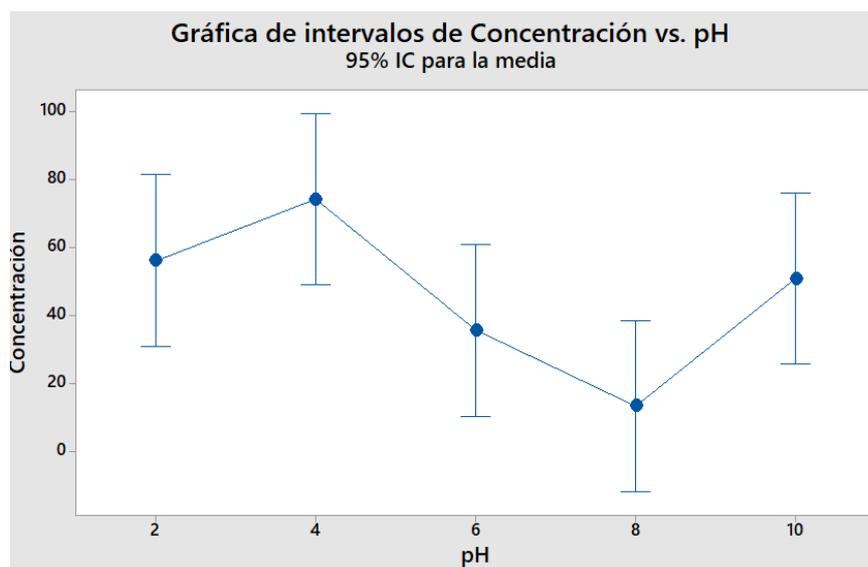
Fuente: La autora.

Para el caso del cromo, al igual que el plomo, se comprobó la normalidad de los datos, obteniendo un valor p de > 0.1 , corroborando dicho enunciado frente a nuestro valor alfa establecido de 0.05.

En la gráfica de intervalos de concentración vs. pH (Gráfico 6), se puede describir que para el Cr las medias y la variabilidad son diferentes en cada uno de los tratamientos (pH).

Con los datos obtenidos luego de verificar que se cumplen los supuestos, se procedió a realizar el análisis del diseño completamente al azar (ANOVA), para el cual obtuvimos un valor de p de 0.033, comparando con nuestro valor alfa de 0.05, este se encuentra por debajo del valor alfa establecido, lo cual implica que nuestra hipótesis nula se rechaza, es decir, nuestros valores se comportan de una forma distinta.

Gráfico 6. Intervalos de concentración vs. pH para el Cr.



Fuente: La autora.

Al rechazarse nuestra hipótesis nula se establecen nuevas interrogantes para lo cual aplicamos el método de Tukey con un 95 % de confianza, los resultados de Tukey muestran las comparaciones en parejas de los diferentes tratamientos (pH), según la Tabla 13 podemos visualizar que las medias que no comparten una letra son

significativamente diferentes, es decir, que el pH 4 comparado con los otros valores de pH es el óptimo para el proceso de biosorción de Cr.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95 %.

Tabla 13. Comparaciones en parejas de Tukey para el Cr.

pH	N	Media	Agrupación	
4	3	74.4	A	
2	3	56.2	A	B
10	3	51	A	B
6	3	35.8	A	B
8	3	13.33		B

Fuente: La autora.

El pH es un factor importante en los procesos de biosorción; esta investigación obtuvo un pH de trabajo de 4.0 para ambos metales (Pb y Cr), según Ben-Ali y otros (2017) determinaron que el valor de pH en su estudio fue de 5.8 para la biosorción de cadmio utilizando la cáscara de granada como biosorbente. En otro estudio realizado por Ordóñez Romero (2014), en el cual los valores de pH para un proceso de biosorción óptimo para Pb y Cr se encuentran en el rango de 3 a 5 para la cáscara de diversas frutas agri dulces.

En el trabajo realizado por Cabrera (2017) dio a conocer que el valor del pH fue 4 para el proceso de biosorción de Pb y pH 2 para el Cr, además, Verdugo (2017) demuestra que para el proceso de biosorción el pH óptimo fue de 4 para Pb y Cr respectivamente.

Comparando los valores de los estudios anteriormente citados podemos concluir que el pH es un factor que influye en el proceso de biosorción de metales pesados, cabe recalcar que los valores de pH óptimos para el proceso se encuentran dentro de un rango ácido.

4.2.2. Evaluar la cinética de biosorción para predecir el tiempo de contacto entre el biosorbente y el medio a través de un proceso de lote.

❖ *Isotermas de Langmuir y Freundlich para el plomo.*

- *Isoterma de Langmuir.*

Para evaluar la cinética de biosorción se desarrolló el experimento tipo batch, en el cual, se trabajó con una masa de 0.1 g de biosorbente, pH 4, tamaño de partícula menor 0.3 mm y 50 ml de una solución a diferentes concentraciones.

Para la determinación de la concentración máxima de biosorción es necesario establecer los valores de $q_{\text{máx}}$ (capacidad de absorción) y b (coeficiente de afinidad) de la ecuación lineal de Langmuir (Ecuación de Langmuir, Tabla 8 del punto 2.1.6). En la Tabla 14 podemos visualizar los parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir; en el cual el valor de q (concentración de adsorción) se obtiene mediante la ecuación 7 que se encuentra en el punto 2.1.6 de este trabajo; con estos valores procedemos a calcular el valor de $1/q$ y $1/C_e$ que posteriormente servirán para realizar la gráfica de la isoterma, luego se realizan los cálculos del RL (sistema isotérmico) utilizando la ecuación 9 encontrada en el punto 2.1.6 de esta investigación.

Con respecto a los valores del RL mostrados en la Tabla 14 podemos visualizar que van desde 0.0099 hasta 0.0917, concluyendo que cuando los valores se encuentran en un rango de 0 a 1 presentan una captación de metales favorable según Uría, Daniel & Pablo (2008).

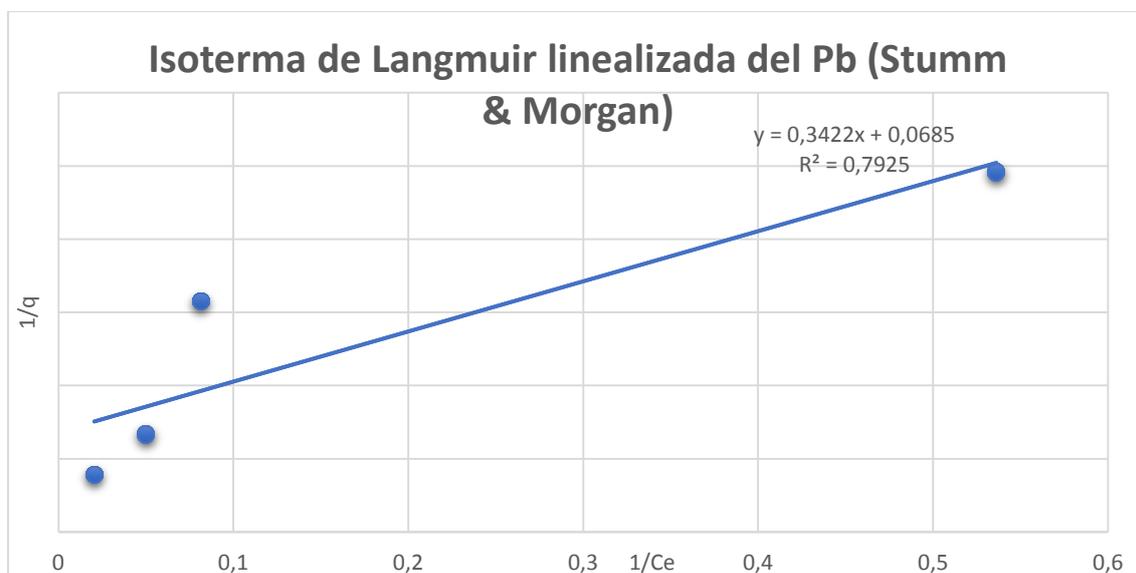
Tabla 14. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir y cálculos de RL para el Pb.

Masa (g)	Concentración inicial. C_i (mg/l)	Concentración de equilibrio. C_e (mg/l)	Concentración de adsorción. q (mg/g)	Langmuir		RL
				$1/q$	$1/C_e$	
0.1	10	1.865	4.0675	0.2458	0.5361	0.0917
0.1	25	12.315	6.3425	0.1576	0.0812	0.0398
0.1	50	20	15	0.0666	0.05	0.0194
0.1	100	48.95	25.525	0.0391	0.0204	0.0099

Fuente: La autora.

Con los valores ya establecidos se realiza una relación gráfica de $1/q$ para el eje de las ordenadas y $1/C_e$ para las abscisas (Gráfico 7), se hace una regresión lineal, en la cual se obtuvo una recta pendiente de 0.3422 e intercepción de 0.069, dando como resultado un valor de $q_{\text{máx}}$ de 14.59 mg/g de Pb y el valor $b = 1$; de igual manera, un valor de correlación (R^2) de 0.7925, lo que significa que la isoterma de Langmuir para el Pb se ajusta de una forma estable al modelo.

Gráfico 7. *Isoterma de Langmuir linealizada para el Pb.*



Fuente: La autora.

- *Isoterma de Freundlich.*

La isoterma de Freundlich se realizó mediante la aplicación de la ecuación lineal (Ecuación 10) para determinar los valores de n (constante relacionada con la intensidad de sorción del biosorbente en función de su grado de heterogeneidad) y K (constante de Freundlich relacionada con la capacidad de sorción del biosorbente), Freundlich relaciona mediante logaritmos la capacidad de captación de un determinado compuesto y la concentración del contaminante cuando se encuentra en el estado de equilibrio. Como en el caso anterior, en la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos en nuestro experimento, con estos datos se obtuvo el valor de q (concentración de

adsorción) mediante la ecuación 7 anteriormente citada, con estos valores se obtiene las variables de Freundlich ($\log q$ y $\log C_e$).

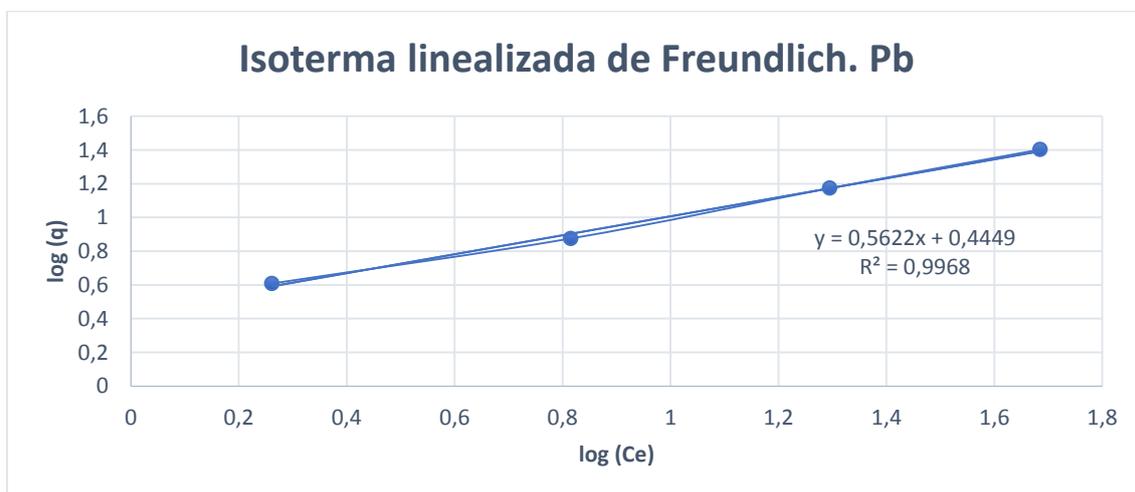
Tabla 15. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Freundlich para el Pb.

Masa (g)	Concentración inicial C_i (mg/l)	Concentración de equilibrio. C_e (mg/l)	Concentración de adsorción q (mg/g)	Freundlich	
				$\log (q)$	$\log (C_e)$
0.1	10	1.865	4.0675	0.6088	0.2617
0.1	25	12.315	6.3425	0.8755	0.8152
0.1	50	20	15	1.1734	1.2950
0.1	100	48.95	25.525	1.4027	1.6852

Fuente: La autora.

Ya linealizado el modelo matemático de Freundlich, y con el fin de determinar la concentración máxima, se realiza una relación (Gráfica 8) entre $\log (q)$ y $\log (C_e)$, obteniendo como resultados una recta cuya pendiente de 0.5622 y ordenada al origen de 0.449 corresponden, obteniendo un valor de $K = 2.78$ y $n = 1.77$ con una correlación (R^2) de 0.9968, con estos resultados se manifiesta una afinidad del biosorbente en la captación de iones metálicos de Pb.

Gráfico 8. Isoterma de biosorción linealizada de Freundlich para el Pb.



Fuente: La autora.

❖ *Isotermas de Langmuir y Freundlich para el cromo.*

- *Isoterma de Langmuir.*

Como en el caso anterior, para la determinación de la concentración máxima de biosorción primero es necesario establecer los valores de $q_{\text{máx}}$ (capacidad de absorción) y b (coeficiente de afinidad) de la ecuación lineal de Langmuir (Ecuación de Langmuir en la Tabla 8 del punto 2.1.6); en la Tabla 16 podemos visualizar los parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir, para el cual el valor de q (concentración de adsorción) se obtiene mediante la ecuación 7 que se encuentra en el punto 2.1.6 de este trabajo; con estos valores procedemos a calcular el valor de $1/q$ y $1/C_e$ que posteriormente nos servirán para realizar la gráfica de la isoterma, seguido procedemos a realizar los cálculos del RL (sistema isotérmico) utilizando la ecuación 9 encontrada en el punto 2.1.6 de esta investigación. Con respecto a los valores del RL obtenidos en la Tabla 16; la cual muestra que los datos van desde 0.0099 hasta 0.0898, concluyendo que cuando los valores se encuentran en un rango de 0 a 1 presentan una captación de metales favorables según Uría, Daniel & Pablo (2008).

Tabla 16. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Langmuir y cálculo del RL para el Cr.

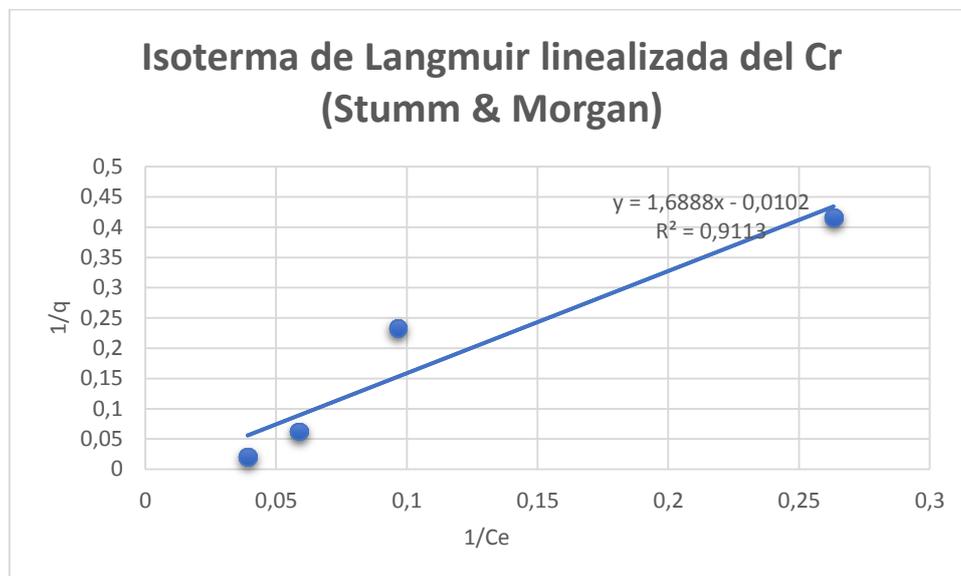
Masa (g)	C_i (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/g)	Langmuir		RL
				$1/q$	$1/C_e$	
0.1	10	2.402	3.798	0.2632	0.4161	0.0898
0.1	25	4.295	10.3525	0.0965	0.2328	0.0384
0.1	50	15.95	17.025	0.0587	0.0626	0.0195
0.1	100	48.95	25.525	0.0391	0.0204	0.0099

Fuente: La autora.

Con los valores ya establecidos se realiza una relación gráfica de $1/q$ para el eje de las ordenadas y $1/C_e$ para las abscisas (Gráfico 9), en la misma que se hizo una regresión lineal, en la cual se obtuvo una recta pendiente de 1.688 e intercepción de 0.0102, dando como resultado un valor de $q_{\text{máx}}$ de 98.39 mg/g de Cr y el valor $b =$

0.998; de igual manera un valor de correlación (R^2) de 0.9113, lo que significa que la isoterma de Langmuir para el Cr se ajusta de una forma estable al modelo.

Gráfico 9. *Isoterma de Langmuir linealizada para Cr.*



Fuente: La autora.

- *Isoterma de Freundlich.*

La isoterma de Freundlich se realizó mediante la aplicación de la ecuación lineal (Ecuación 10) para determinar los valores de n (constante relacionada con la intensidad de sorción del biosorbente en función de su grado de heterogeneidad) y K (constante de Freundlich relacionada con la capacidad de sorción del biosorbente), Freundlich relaciona mediante logaritmos la capacidad de captación de un determinado compuesto y la concentración del contaminante cuando se encuentra en el estado de equilibrio. De igual manera, en la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos en nuestro experimento, con estos datos se obtiene el valor de q (concentración de adsorción) mediante la Ecuación 7 anteriormente citada, con los valores obtenidos, procedemos a realizar los cálculos de Freundlich ($\log q$ y $\log C_e$).

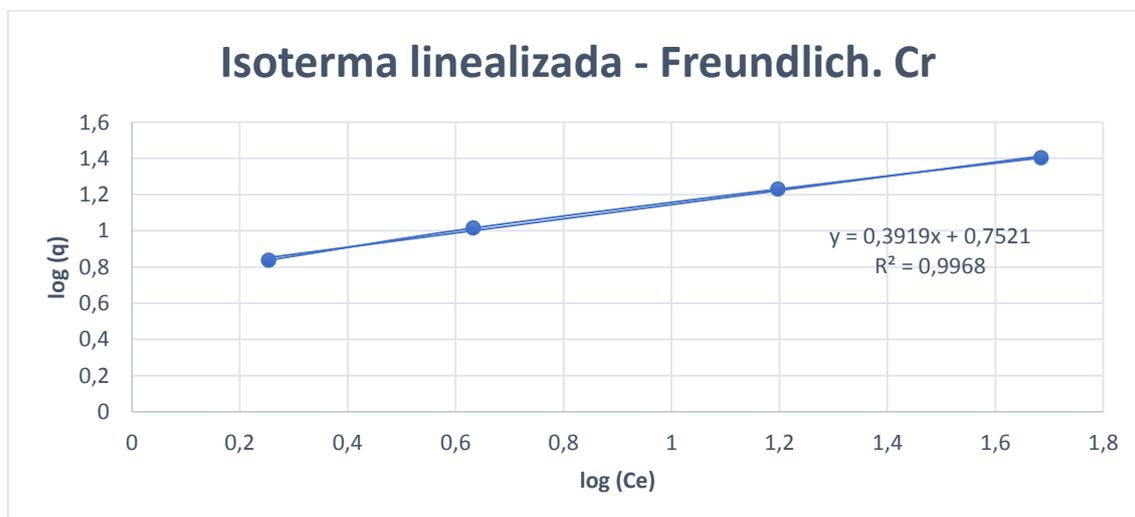
Tabla 17. Parámetros de aplicación para el modelo lineal de Freundlich de Cr.

Masa (g)	Ci (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Freundlich	
				log (q)	log (Ce)
0.1	10	2.402	3.798	0.8374	0.2533
0.1	25	4.295	10.3525	1.0150	0.6329
0.1	50	15.95	17.025	1.2298	1.1971
0.1	100	48.95	25.525	1.4027	1.6852

Fuente: La autora.

Ya linealizado el modelo matemático de Freundlich, y con el fin de determinar la concentración máxima, se realiza una relación (Gráfico 10) entre $\log (q)$ y $\log (Ce)$, obteniendo como resultados una recta cuya pendiente de 0.3919 y ordenada al origen de 0.7521, dando un valor de $K = 5.65$ y $n = 2.55$ con una relación (R^2) de 0.9968, con estos resultados se manifiesta una afinidad del biosorbente en la captación de iones metálicos de Cr.

Gráfico 10. Isotherma de biosorción linealizada de Freundlich para el Cr.



Fuente: La autora.

A continuación, en la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de los modelos de Langmuir y Freundlich; para el caso del Pb, se puede establecer que el modelo que más se ajusta, es el de Freundlich porque su nivel de correlación (0.9998) es mayor; en el caso del Cr, Freundlich presenta también un nivel de correlación alto (0.9998);

además, se aprecia un contraste de valores de K y n en el modelo de Freundlich, es decir, estos valores son factores que establecen la diferencia entre los dos metales estudiados; el valor de K para Cr es de 5.65 mg/g, mientras que para el Pb es de 2.78 mg/g, es decir, que el biosorbente estudiado tiene mayor capacidad de sorción para el Cr que para el Pb; con respecto a n, el biosorbente estudiado tiene una mayor afinidad con el Cr, debido a que su valor de n es de 2.55 mientras que para el Cr el valor de n es de 1.77.

Tabla 18. Comparación de los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich.

Metal	Isoterma de Langmuir			Isoterma de Freundlich		
	q _{máx} (mg/g)	b (mg/l)	R ²	K (mg/g)	n	R ²
Plomo	14.59	1	0.7925	2.78	1.77	0.9968
Cromo	98.39	0.9998	0.9133	5.65	2.55	0.9968

Fuente: La autora.

En el estudio realizado por Guechi & Hamdaoui (2015) utilizaron la papa en su totalidad como biosorbente y obtuvieron como resultado que el modelo de Freundlich es el que más se ajusta al proceso de biosorción para Pb, presentando un valor de K de 9.37; comparado con el resultado de nuestra investigación, en la cual se obtiene un valor de K de 2.78; la diferencia de los valores se debe a que el biosorbente de esta investigación se realizó solo utilizando la cáscara de la papa, mas no el tubérculo entero como indican en la investigación anteriormente citada.

Además, según el estudio realizado por Jacques, y otros (2007) en el cual utilizan un biosorbente de maracuyá, obtuvieron como resultado que el modelo que más se ajusta al proceso de biosorción es el de Langmuir con un valor de 85.1 mg/g para el Cr y 151.6 mg/g para el Pb; en el caso de esta investigación obtuvimos un valor de 14.59 mg/g para el Pb y 98.39 mg/g para el Cr.

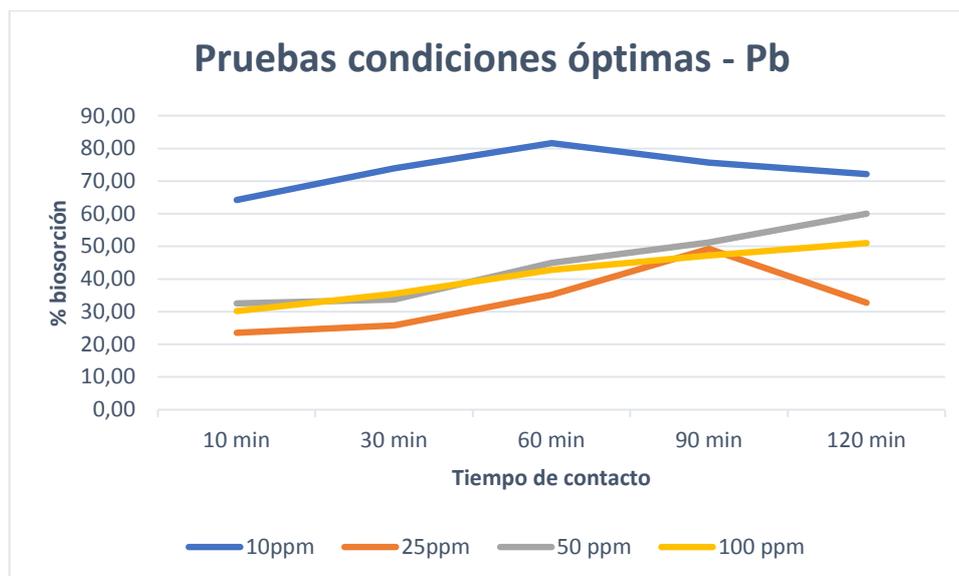
Según el estudio propuesto por Muñoz (2007) en el cual se utiliza la cáscara de naranja como biosorbente, se determina una capacidad máxima de retención de 141.05 mg/g utilizando el modelo de Langmuir para el Pb; comparado con el resultado de esta investigación en el cual se obtuvo para el Pb un valor de 14.59 mg/g; la diferencia de los resultados se debe a que el biosorbente de la investigación anteriormente citada fue sometido a un proceso de activación.

4.2.3. Determinar la capacidad de adsorción del biosorbente de los metales.

Para llevar a cabo esta prueba se trabajó con parámetros definidos anteriormente: tamaño de partícula menor a 0.3 mm, 50 ml de disolución y pH 4 para Pb y Cr. Con los datos obtenidos se realizó una relación gráfica entre el porcentaje de biosorción y el tiempo de contacto para las diferentes concentraciones planteadas (10, 25, 50 y 100 ppm) (Gráfico 11), en el cual visualizamos los puntos más altos, indicando a qué tiempo se da la mejor captación de metales pesados.

Para la concentración de 10 ppm su tiempo óptimo es de 60 min; para la concentración de 25 ppm su tiempo de contacto es de 90 min y para las concentraciones de 50 y 100 ppm el tiempo es de 120 min.

Gráfico 11. Relación de biosorción vs. tiempo de contacto para el Pb.

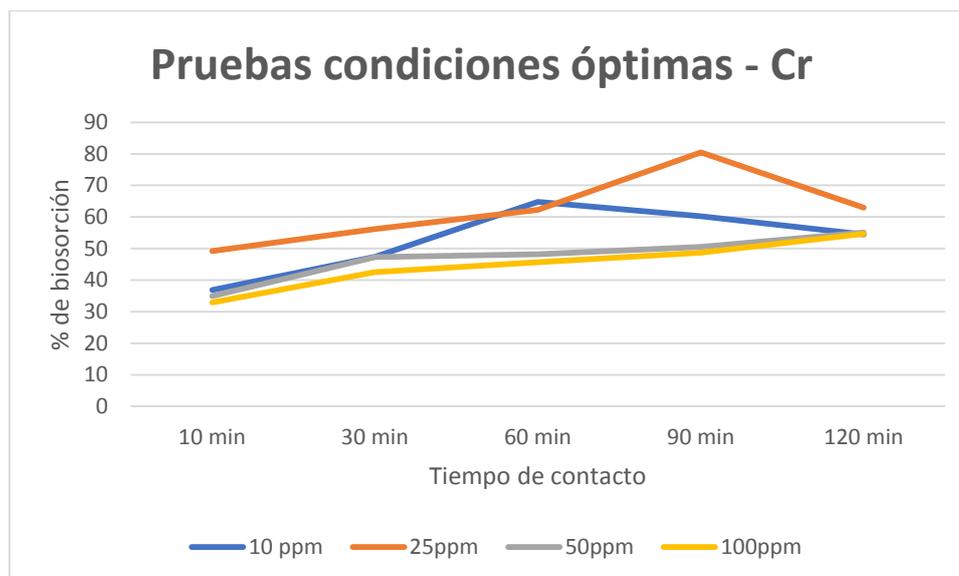


Fuente: La autora.

Para el Cr, de igual manera se ajustó a los parámetros definidos anteriormente (pH 4, tamaño de partícula menor a 0.3 mm, masa de 0.1 g de biosorbente y 50 ml de disolución), con los datos obtenidos del proceso de biosorción a diferentes concentraciones (10, 25, 50 y 100 ppm) se realizó una gráfica que relaciona el porcentaje de biosorción y el tiempo de aplicación, visualizándose que para el Cr los puntos más altos indican el tiempo en el cual el porcentaje de captación de metales es mayor (Gráfico 12).

Para la concentración de 10 ppm su tiempo óptimo es de 60 min, para la concentración de 25 ppm es de 90 min y, finalmente, para las concentraciones de 50 y 100 ppm su tiempo es de 120 min.

Gráfico 12. Relación de biosorción vs. tiempo de contacto para Cr.



Fuente: La autora.

Según los estudios de Cabrera (2017) y Verdugo (2017) en donde utilizan como biosorbentes la cáscara de tomate de árbol y cáscara de mandarina respectivamente, establecieron que el tiempo necesario para captar los metales varía de acuerdo con la concentración inicial, es decir, si la concentración inicial es alta, el tiempo de captación es mayor; estos resultados son similares a los fijados en este estudio.

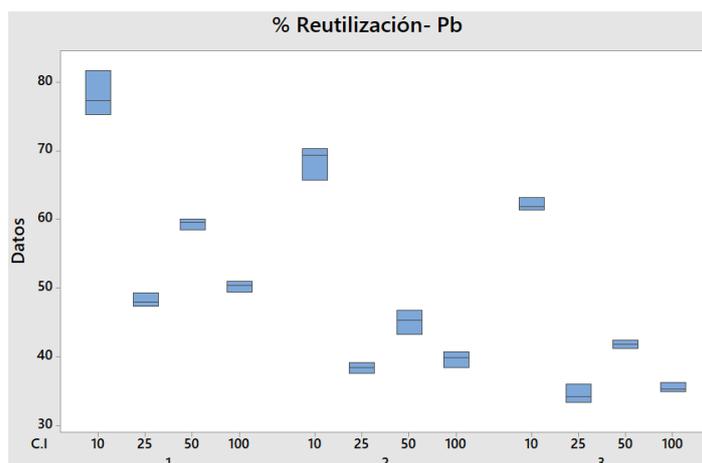
4.2.4. Determinar la capacidad de reutilización de biosorbente mediante procesos fisicoquímicos.

Para llevar a cabo este objetivo, se realizó una prueba doble con los residuos reciclados de la prueba anterior, se prosiguió con cada uno de los residuos a realizar una digestión ácida y básica por separado; después, con estos residuos se realizó nuevamente el proceso de biosorción especificado en el punto 3.2.3 de esta investigación.

En los resultados de la prueba de reutilización para Pb y Cr (Gráficos 13 y 14 respectivamente), se da a conocer que los porcentajes de captación de metales se reducen cuando se lo reutiliza por primera vez; adicionalmente, podemos apreciar que el

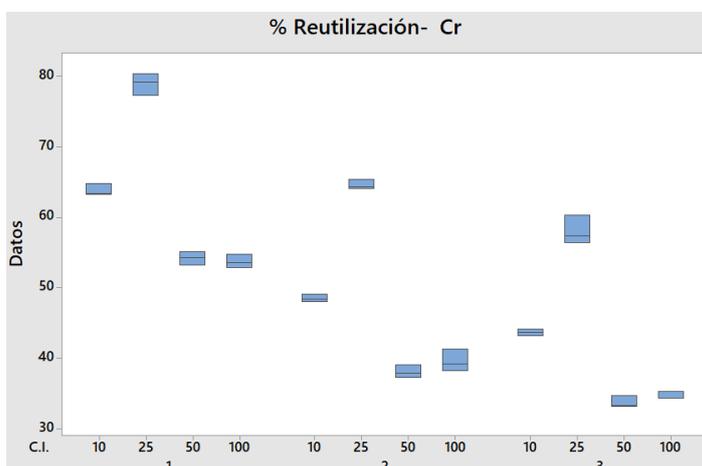
tratamiento preliminar que debemos realizar al biosorbente para su reutilización es la digestión ácida, es decir, la reutilización está en función del tipo de digestión que se realiza, por ende, los mejores resultados se dan cuando se aplica una digestión ácida. (Columna 1: % biosorción en condiciones óptimas, Columna 2: % reutilización utilizando HCl, Columna 3: % reutilización usando NaOH.)

Gráfico 13. Comparación de resultados a diferentes concentraciones. Reutilización del biosorbente.



Fuente: La autora.

Gráfico 14. Comparación de resultados a diferentes concentraciones. Reutilización del biosorbente.



Fuente: La autora.

Estudios realizados por Cabrera (2017) y Verdugo (2017) obtuvieron resultados de reutilización de biosorbentes, pero no alcanzan la misma capacidad de captación inicial; además, indicaron que para tener una mayor eficacia en el proceso de reutilización debe

tratarse anteriormente con una digestión preferentemente ácida; resultados que son similares a los propuestos por esta investigación.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Con los resultados alcanzados se establece que se cumple la hipótesis planteada, es decir, que la cáscara de papa presenta capacidad de biosorción para la captación de plomo y cromo.

El pH es uno de los factores más importantes en el proceso de biosorción; para el caso del biosorbente de cáscara de papa, el pH óptimo de las soluciones acuosas para el plomo y cromo que es de 4.0, alcanzando un rendimiento del 86 % y 74 % respectivamente.

El análisis de infrarrojo realizado al biosorbente presenta como componente principal a la celulosa.

El estudio establece que el biosorbente empleado se ajusta más al modelo de Freundlich tanto para el plomo como para el cromo, debido a que el nivel de correlación de ambos modelos es alto.

El biosorbente de la papa tiene mayor afinidad al cromo porque alcanza un valor de K de 5.65.

Este estudio determina que el biosorbente se puede reutilizar, pero su capacidad de biosorción disminuye después de cada tratamiento.

Para tener una mayor eficacia en el proceso de reutilización debe tratarse anteriormente el biosorbente con una digestión preferentemente ácida.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar nuevos estudios aprovechando restos orgánicos que se generen a nivel industrial.

Se aconseja realizar un nuevo estudio similar al actual, pero con la diferencia que se aplique una activación química al biosorbente.

Realizar estudios de biosorción utilizando descargas industriales con la presencia de metales pesados.

Se recomienda que se haga estudios con diferentes tamaños de partícula del biosorbente para evaluar si influye en la capacidad de biosorción.

Además, se sugiere trabajar con el biosorbente a base de cáscara de papa en procesos de captación de otros tipos de metales de interés como por ejemplo, arsénico, mercurio, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, P., Gupta, R., & Saxena, R. (1999). Zn⁺² biosorption by *Oscillatoria angustissima*. *Process Biochemistry*, 34(1): 77-85.
- Aksu, A., & Donmez, G. (2006). Binary biosorption of cadmium(II) and nickel(II) onto dried *Chlorella vulgaris*: Co-ion effect on mono-component isotherm parameters. *The Chemical Engineering Journal*, 53-63.
- Aksu, Z. (2001). Equilibrium and Kinetic modeling of cadmium (II) biosorption by *C. Vulgaris* in a batch system: effect of temperature. *Separation and Purification Technology*, 21(23): 285-294.
- ALAMI, S. (2010). *Aprovechamiento de Hueso de Aceite (Biosorción de Iones Metálicos)*. Universidad de Granada.
- ALOMA, I. (2011). *Tecnología sostenible para la obtención de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar*. Cuba.
- Andrago, D. (2011). *Estudio isotérmico de biosorción de cromo y cadmio en solución acuosa utilizando residuos de césped*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Annadurai, G., Juang, R., & D, L. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. *J Hazard Mater.*, 92(3):263-74.
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia) Vol. 74*, 12-22.
- AWWA, LdE, & WRC. (1996). *Water Treatment Membrane Processes*. En McGraw-Hill. South Africa: (American Water Works Association, Lyonnaise des Eaux, & Water Research Commission of South Africa, Eds.).

- Bant, F., Al-Asheh, S., Al-Ahmad, R., & Bni-Khalid, F. (2007). Bench-scale and packed bed sorption of methylene blue using treated olive pomace and charcoal. *Biosource Technology*, 3017-3025.
- Ben-Ali, S., Jaouali, I., Souissi-Najar, S., & Ouederni, A. (2017). *Characterization and adsorption capacity of raw pomegranate peel biosorbent for copper removal*.
- Bermejo, D. (2016). "REMOCIÓN DE PLOMO Y CADMIO PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES MINERAS MEDIANTE BIOSORCIÓN EN COLUMNAS CON BAGAZO DE CAÑA Y CÁSCARA DE CACAO" . Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Blázquez, G., Hernainz, I., Calera, M., & Ruiz, L. (2005). Removal of cadmium ions with olive stones: the effect of some parameters. *Process Biochemistry*, 40(8):2649-2654.
- Brion, J. (2010). Disposición final de residuos sólidos urbanos. *ANI- Academia Nacional de Ingenieria* , 3-22.
- Brunauer, S., Emmett, P., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Am. Chem. Soc*, 309-319.
- Bustamante, E. (2011). *ADSORCIÓN DE METALES PESADOS EN RESIDUOS DE CAFÉ MODIFICADOS QUÍMICAMENTE*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon.
- Cabrera, L. (2017). *Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara del tomate de árbol (Solanum betaceum)*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología - MEXICO*,

42(3), 131–143. Obtenido de <http://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>

Cardona, A. F., Dulce, C., & Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Revista Académica de la FI-UADY. Universidad de Yucatán. Yucatán.*

Castillo, C. (2005). *SELECCIÓN Y CALIBRACIÓN DE INDICADORES LOCALES Y TÉCNICO PARA EVALUAR LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS LADERAS, EN LA MICROCUENCA CUSCAMÁ EL TUMA - LA DALIA MATAGALPA.* Managua: Universidad Nacional Agraria.

Cervantes, A. (11 de Marzo de 2012). *PROCESO PRODUCTIVO DEL PLOMO.* Obtenido de PROCESO PRODUCTIVO DEL PLOMO: <http://procesoproductivodelpolmo.blogspot.com/>

Charris, V., Guerrero, A., & Barrera, C. (2011). Intoxicación por plomo secundaria a alojamiento de esquirras en el cuerpo. *Acta médica colombiana*, Vol 36. N°4 pag; 200-203.

Chubar, N., Carvalho, J., & Correia, M. (2004). Heavy metals biosorption on cork biomass: effect of the pre-treatment, *Colloids and Surfaces. Physicochemical Engineering Aspects*, 238(1-3): 51-58.

CIP (International Potato Center). (2014). *Procesamiento y Usos de la Papa.* Obtenido de Procesamiento y Usos de la Papa: <http://cipotato.org/es/lapapa/procesamiento-y-usos-de-la-papa/>

CITME. (2006). *Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.* Madrid.

- Cruz, C., Costa, A., Henriques, A., & Luna, A. (2004). Kinetic modelling and equilibrium studies during Cadmium biosorption by dead Sargassum Sp. Biomass. *Bioresource Technology*, 91(3): 249-257.
- Dal Bosco, S., Sarti Jimenez, R., & Alves Carvalho, W. (2005). Removal of toxic metals from wastewater by Brazilian natural scolecite. *Journal of Colloid and Interfase Science*, 281(2): 424-431.
- Dasgupta, J., Sikder, J., Chakraborty, S., Cursio, S., & Drioli, E. (2015). Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: a state of the art review. *Journal of Environmental Management* , 55-72.
- Dávila, N. (2012). *Caracterización del proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos sólidos de Café*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- De Rome, L., & Gadd, G. (1987). Copper adsorption by *Rhizopus arrhizus*, *Cladosporium resinae* and *Penicillium italicum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 26(1), 84-90.
- Doyurum, S., & Celik, A. (2006). Pb(II) and Cd (II) removal from aqueous solution by olive cake. *Journal of Hazardous Materials*, 132(1):22-28.
- Duffus, J. (2002). "Heavy metals" - A meaningless term? (IUPAC Technical report).
- Durán, M. (2004). *CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE METALES PESADOS EN EFLUENTES INDUSTRIALES DE LA CIUDAD DE GUAYAQUI*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Químicas .
- Egusquiza, B. (2000). *La papa producción, transformación y comercialización*. Lima.
- Elementos.org. (18 de Abril de 2016). *Elementos*. Obtenido de <http://elementos.org.es/cromo>
- Ernesto, S. (2008). *Los metales pesados en las aguas residuales*. Madrid: Grupo de Fisicoquímica de Procesos Industriales y Medioambientales, FQPIMA.

- Universidad Complutense de Madrid]. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
- ESPAC. (2015). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Quito: INEC.
- EZE, S. O., IGWE, J. C., & DIPO, D. (2013). Effect of particle size on adsorption of heavy metals using chemically modified and unmodified fluted pumpkin and broad-leafed pumpkin pods . *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7(2): 852-860.
- Fadzil, F., & Ibrahim S, H. M. (2016). Adsorption of Pb(II) onto organic acid modified rubber leaf powder: Batch and column studies. *Process Safety and Environmental Protection*,, 1-8.
- FAO. (2008). *Año Internacional de la Papa*. Obtenido de Año Internacional de la Papa: <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/utilizacion.html>
- FAO. (2008). *International Year of the POTATO*. Obtenido de International Year of the POTATO: <http://www.fao.org/potato-2008/en/world/latinamerica.html>
- FAOSTAT. (2014).
- Febrianto, J., Kosasiha, A. N., Sunarsob, J., Ju, Y., Indraswati, N., & Ismadjia, S. (2008). Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.06.042
- Fergusson, J. (1990). *The heavy elements: Chemistry enviromental impact and health effects*. Pergamon Press, Inc.
- Flores, J., M, L., & Tapia, N. (2001). *Biorremediación de metales tóxicos en efluentes mineros aplicando Biosorción*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Freundlich, H. (1906). Over the Adsorption in Solution. *Journal of Physical Chemistry* A, 385-470.

- Guechi, E.-K., & Hamdaoui, O. (2015). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by potato (*Solanum tuberosum*) peel: equilibrium modelling, kinetic, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment* , 1-16.
- Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales. (s.f.).
Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales.
Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/curso_rsm/e/fulltext/pequena.pdf
- Gundogdu, A., Ozfes, D., Duran, C., Bulut, V., Soylak, M., & Senturk, H. (2009). Biosorption of Pb (II) ions from aqueous solution by pine bark (*Pinus brutia* Ten). *Chemical Engineering Journal*, 153, 62-69.
- Gupta, V., & Ali, L. (2004). Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash: a sugar industry waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 321-328.
- Harmita, H., Karthikeyan, K., & Pan, X. (2009). Copper and Cadmium sorption onto kraft and organosolv lignins. *Bioresource Technology.*, 100, 6183-6191.
- Hernandez, A. (2009). *Biosorción de níquel divalente por materiales biológicos inactivos*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Ho, Y., Chiu, W., Hsu, C., & Hung, C. (2004). Sorption of lead ions from aqueous solution using tree fern as a sorbent. *Hydrometallurgy*, 73(1-2): 55-61.
- Hoyos, B., Martínez, L., & Salazar, A. (2007). Electrodeposición de Níquel Duro con Ondas de Corriente Pulsante Triangulares. *La Serena* , v.18 n.4.
- INEC. (2012). *Encuesta de Superficie de Producción Agropecuaria Continua (ESPAC 2012)*.
- INEC. (2014). *Información Ambiental en Hogares*.
- INEN 2841. (2014). *GESTION AMBIENTAL. ESTANDARIZACIÓN DE COLORES PARA RECIPIENTES DE DEPÓSITO Y ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE*

RESIDUOS SÓLIDOS. REQUISITOS . Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Inga, P. (2012). *Estudio Isotermico de biosorción de cadmio, cromo, plomo y zinc en solución acuosa empleando el pinzote(raquis) de plátano (Musa paradisiaca L)*. Quito: Universidad Politecnica Salesiana.

INIAP. (2011). *Ficha técnica fripapa 99*. Quito.: Santa Catalina.

INSTITUTO DE SALUD PUBLICA DE CHILE. (PRT-701.02-011). *PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR CENIZAS TOTALES- Método Gravimétrico*. SUBDEPARTAMENTO LABORATORIOS DEL AMBIENTE.

Iqbal, M., & Edyvean, R. (2004). Biosorption of lead, copper and zinc i loofa siponge immobilized biomass of Phanerochaete chrysosporium. *Minerals Engineering*, 17: 217-223.

Izquierdo Sanchis, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*. Valencia, España: Universitat de València. Obtenido de <http://roderic.uv.es/handle/10550/23403>

Izquierdo, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*. Valencia: Universidad de Valencia .

Jacques, R. A., Lima, E. C., Días, S. L., Mazzocato, A. C., & Pavan, F. A. (2007). Yellow passion-fruit shell as biosorbent to remove Cr(III) and Pb (II) from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 57(1): 193-198.

Jarosz, A., Malarczyk, E., Pirszel, J., Skowronski, T., & Leonowicz, A. (2002). Uptake of cadmium ions in white rot fungus trametes versicolor: effect of Cd (II) ions on the activity of laccase. *Cell Biology International*, 26: 605-613.

- Jimenez, B. (2001). *La contaminación Ambiental en México*. México D.F: Limusa.
- Judd, S. (2003). Membrane Technology. In *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*. Elsevier, 13.74.
- Karna, K. (2013). *Modelación matemática del proceso de biosorción de Cromo+6 y Ni+2: estudios en serie en columnas de lecho fijo con Bagazo de Caña de Azúcar*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Khormaei, M., Nasernejad, B., Edrisi, M., & Eslamzadeh, T. (2007). Copper biosorption from aqueous solutions by sour orange residue. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2): 269-274.
- King, P., Anuradha, K., Lahari, S., Prasanna Kumar, Y., & Prasad, V. (2008). Biosorption of zinc from aqueous solution using *Azadirachta indica* bark. Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 152. 324-329.
- Krishnan, K., & Anirudhan, T. (2003). Removal of cadmium (II) from aqueous solutions by steam-activated sulphurised carbon prepared from sugar-cane bagasse pith: kinetics and equilibrium studies. *Water SA*, 147-156.
- Langmuir, I. (1918). THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. *J. Am. Chem. Soc*, 1361-1403.
- Lara, M. (2008). *Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados*. Universidad de Granada.
- Lara, M. A. (2008). *Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados*. Universidad de Granada.
- Larenas, C., Andrango, D., & Inga, P. (2008). Estudios isotérmicos de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales. *La Granja*, 3-5.
- Lenntech. (16 de Abril de 2017). *Lenntech*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>

- Liu, Y., Fan, T., Zeng, G., Tong, Q., Ye, F., Zhou, M., & Xu, W. H. (2006). Removal of cadmium and zinc ions from aqueous solution by living *Aspergillus niger*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.*, 16:681-686.
- Loiácono, R., Vuanello, O., Solorza, B., Millán, M. E., & Tejada, J. (2012). *ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS DE EFLUENTES INDUSTRIALES POR MÉTODO ELECTROQUÍMICO*. Universidad Nacional de San Juan-Facultad de Ingeniería-Dpto. de Ing. Química.
- Lourie, E., & Gjengedal, E. (2011). Metal sorption by peat and algae treated peat: Kinetics and factors affecting the process. *Chemosphere*, 85, 759-764.
- Lu, S., Gibb, S., & Cochrane, E. (2007). Effective removal of zinc ions from aqueous solutions using crab carapace biosorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 149, 208-217.
- Manchola, P. A. (2012). *Estudio Isotermico de biosorción de Cadmio, Cromo, Plomo y Zinc en solución acuosa empleando el pinzote (raquis) de plátano (Musa paradisiaca.L)*. Quito.
- Martínez, N. (2014). *Captación del Cd (II) en solución acuosa mediante el uso de residuos orgánicos generados de la actividades acuícolas*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- McConnell, A., Eastwood, M., & Mitchell, W. (1974). Physical characteristics of vegetable foodstuffs that could influence bowel function. *Science of Food and Agriculture*, Volume 25, Issue 12 - Pages 1457–1464 .
- Mejía, P., & Patarón, I. (2014). *“PROPUESTA DE UN PLAN INTEGRAL PARA EL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL CANTÓN TISALEO”* . Riobamba: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO .

- Mendoza, L., & Molina, N. (2015). BIOSORCIÓN DE Cd, Pb y Zn POR BIOMASA PRETRATADA DE ALGAS ROJAS, CÁSCARA DE NARANJA Y TUNA. *Ciencia E Ingeniería Neogranadin*, 43-61.
- METROAMBIENTE. (2014). *Veoverde*. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de <https://www.veoverde.com/2013/11/la-reutilizacion-de-desechos-es-mas-simple-de-lo-que-crees/>
- Meyhuay, M. (2001). *Potato- Post-harvest Compendium*.
- Ministerio de Agricultura, G. A. (2014). *Boletín Situacional Papa*. Coordinación General del Sistema de Información Nacional.
- Ministerio del Ambiente. (2002). *Ministerio del Ambiente*. Recuperado el 12 de Julio de 2017, de <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Muñoz, M. (2007). *REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO UNA MACRÓFITA ACÚATICA (ELEOCHARIS ACICULARIS) MUERTA*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Murphy, V., Hughes, H., & McLoughlin, P. (2009). Enhancement strategies for Cu(II), Cr(III) and Cr(VI) remediation by a variety of a seaweed species. *Journal of Hazardous Materials*, 166: 318-326.
- Mutongo, F., Kuipa, O., & Kuipa, P. K. (2014). Removal of Cr(VI) from Aqueous Solutions Using Powder of Potato Peelings as a Low Cost Sorbent. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. doi:10.1155/2014/973153
- Namasivayam, C., Muniasamy, N., Gayatri, K., Rani, M., & Ranganathan, K. (1996). Removal of dyes from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel. *Bioresource Technology*, 37-43.
- Nodberg, G. (2012). *Metales: propiedades químicas y toxicidad*. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.

- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombia. *Revista Academica Colombia. Cienc*, 34 (132): 347-356.
- NORMA TÉCNICA PERUANA. (NTP 202.001 -2003). *LECHE Y PRODUCTOS LACTEOS. Leche. Cruda. Requisitos*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales -INDECOPI .
- Olmedo, F. (16 de Abril de 2013). *BIODISOL*. Obtenido de BIODISOL: <http://www.biodisol.com/contaminacion-ambiental/biorremediacion-con-vegetales-fitorremediacion-de-aguas-residuales/>
- Ordóñez Romero, A. E. (2014). *Bioadsorción de Pb y Cr mediante la utilización de la cáscara de naranja (Citrus cinensis) molida*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Ordóñez, J., & Moreno, R. (2013). "*ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGANICOS DE CULTIVOS DE FLORES (TALLOS DE ROSA) COMO BIOSORBENTE DE CADMIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*". Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Ospina, R. P. (2012). Alternativa de aprovechamiento eficiente de residuos biodegradables: el caso del almidón residual derivado de la industrialización de la papa Bogotá, . *Scielo*, 180-192.
- Oyarzo, J. (2007). *Precipitación química del fósforo mediante la adición de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento de aguas*. UNIVERSIDAD DE MAGALLANES-FACULTAD DE INGENIERÍA-DEPARTAMENTO INGENIERÍA QUÍMICA.
- Padmavathy, V. (2008). Biosorption of nickel(II) ions by baker's yeast: Kinetic, thermodynamic and desorption studies. *Bioresource Technology*, 99.

- Pavan, F., & Yoshitaka, G. (2007). Statistical design of experiments as a tool for optimizin the batch conditions to Methylene blue biosorption on yellow passion fruit and mandarin peels. *Dyes and Pigments*, 72, 256-266.
- Pinzón-Bedoya, M. L., & Cardona Tamayo, A. M. (2010). "Influencia del pH en la bioadsorción de Cr(III) sobre cáscara de naranja: Determinación de las condiciones de operación en proceso discontinuo". *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 8, núm. 1, enero-junio, 21-30.
- PNGIDS. (2011). *Ministerio del Ambiente*. Recuperado el 12 de Julio de 2017, de <http://www.ambiente.gob.ec/el-programa-nacional-de-gestion-integral-de-desechos-solidos-mae-pngids-difundio-los-resultados-de-su-gestion/>
- Porto, J. P., & Gardey, A. (2013). *Definición.de*. Recuperado el 25 de Julio de 2017
- Prado, P. (1987). *La adsorción como proceso unitario en el tratamiento de aguas*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- PROCONTROL. (2009). *PROELOX - Sistema de tratamiento de aguas por electrooxidación*. Obtenido de PROELOX - Sistema de tratamiento de aguas por electrooxidación: <http://www.procontrolsl.com/productos-patentados/proelox-sistema-de-tratamiento-de-aguas-por-electrooxidacion>
- PUNINA, E. (2013). *“EVALUACIÓN AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE PAPA (Solanum tuberosum) C.V. “FRIPAPA” A LA APLICACIÓN DE TRES ABONOS COMPLETOS”*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Quevedo, J. (2017). *Determinación de la capacidad de bioadsorción de plomo aprovechando las propiedades del exoesqueleto del camarón*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Radke, C., & Prausnitz, J. (1972). Statistical Mechanics of Adsorption from Dilute Liquid Solution. *J. Chem. Phys*, 714-767.

- Rae, I., Gibb, S., & Lu, S. (2009). Biosorption of Hg from aqueous solutions by crab carapace. *Journal of Hazardous Materials.*, 164, 1601-1604.
- Ramos, J. (2010). *Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café*. Universidad Nacional de Colombia.
- Red temática de Ciencias de la Tierra. (2011). *La adsorción de micropoluentes orgánicos sobre carbón activo en el tratamiento del agua potable*. Universidad centroccidental Lisandro Alvarado.
- Redlich, O., & Peterson, D. (1959). A Useful Adsorption Isotherm. *J. Phys. Chem.*, 1024-1024.
- Reinoso, I. (2014). *El cultivo de papa y su participación en la economía ecuatoriana*. EESC, PNRT-Papa.
- Remtavares. (17 de Septiembre de 2010). *Madrid-El agua*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491>
- Revistanova. (25 de Abril de 2012). *Revistanova*. Obtenido de http://www.revistanova.org/index.php?option=com_content&view=article&id=100&Itemid=108
- Reza Samarghandy, M., Hoseinzadeh, E., Taghavi, M., & Rahmani, A. (2011). Biosorption of reactive black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of potato peel waste. *BioResources*.
- Ríos Elizalde, P. E. (2015). *Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Rivas, G. T. (2006). *Caracterización de la biosorción de Cromo con hueso de aceituna*. Granada: Universidad de Granada.
- Rodolfo, J. (2010). Disposición final de residuos sólidos urbanos. *Academia Nacional de Ingeniería*, 234.

- Rodríguez, L. (2009). *Teorías sobre la clasificación taxonómica de las papas cultivadas (revisión bibliográfica)*. Bogotá: Departamento de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, R., & Contreras, Ó. (10 de Noviembre de 2006). *Remoción de metales pesados*. Obtenido de <http://remocion.blogspot.com/>
- Saeed, A., Iqbal, M., & Akhtar, M. (2005). Removal and recovery of lead (II) single and multimetal (Cd, Cu, Ni, Zn) solutions by crop milling waste (black husk). *Journal of Hazardous Materials*, 117:65-73.
- Saiano, F., Ciofalo, M., Cacciola, O., & Ramírez, S. (2005). Metal ion adsorption by *Phomopsis* sp. Biomaterial in laboratory experiments and real wastewater treatments. *Water Research*, 39: 2273-2280.
- Sala, L., García, S., González, J., Frascaroli, M., & Bellú, S. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (págs. 114–120). Real Sociedad Española de Química.
- Sala, L., García, S., González, J., Frascaroli, M., Bellú, S., Mangiameli, F., & Peregrin, S. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *An. Química*, 114-120.
- Sala, L., García, S., Gonzalez, J., Frascaroli, M., Bellú, S., Mangiameli, F., . . . Juan., S. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Química y Medio Ambiente*, 114-120.
- Salazar, M., Zambrano, J., & Valecillos, H. (2008). *Evaluación del rendimiento y característica de calidad de trece clones avanzados de papa (Solanum tuberosum L.)*. Trujillo: Universidad de los Andes, núcleo Universitario Rafael Rangel .

- Salem, N., & Awwad, A. (2011). Biosorption of Ni (II) from electroplating wastewater by modified (*Eriobotrya japonica*) loquat bark. *Jornal of Saudi Chemical Society*.
- Sánchez, A. (2016). “BIOSORCIÓN EN TANQUE AGITADO DE **Cd+2y Pb+2** CON CÁSCARA DE CACAO”. Cuenca: Universidad Estatal de Cuenca.
- Sánchez, G. (2007). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en los Municipios de Actopan, San Salvador y el Arenal del Estado de Hidalgo*. Hidalgo: Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo.
- Selatnia, A., Boukazoula, A., Kechid, N., Bakhti, M., Chergui, A., & Kerchich, Y. (2004). Biosorption of lead (II) from aqueous solution by a bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 19 (2), 127-135.
- Sips, R. (1948). On the Structure of a Catalyst Surface . *Frick Chemical Laboratory*, 490-495.
- Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM). (2014). *Solanum Tuberosum*. Proyecto GEF-CIBIOGEM de Bioseguridad.
- SWAU. (14 de Junio de 2017). *Turner faculty*. Obtenido de <http://turner.faculty.swau.edu/mathematics/math241/materials/anova/acalculate.php>
- Tahir, S., & Alaamer, S. (2008). PB-210 concentrations in cigarettes tobaccos and radiation doses to the smokers. *Radiat Prot Dosimetry*, 130 (3): 389-391.
- Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos* . México: McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering: treatment and Reuse/Metcalf & Eddy, Inc* (4ta ed.). New York: McGraw-Hill.

- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Garcés Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 109–123.
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortíz, Á., & Núñez Zarur, J. (2015). Uso de biomásas para la adsorción de plomo, níquel, mercurio y cromo. *Ingenium*, 41–51.
- Torres, G., Navarro, A. E., Languasco, J., Campos, K., & Cuizano, N. A. (2006). Estudio preliminar de la fitoremediación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua) . *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3 (1): 13-20.
- Universidad Santo Tomás. (2013). *Tecnologías más limpias*. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de http://soda.ustadistancia.edu.co/enlinea/maritzaduque_tecnologiaslimpias/reduccion_en_el_origen.html
- Ures, P., Jácome, A., & Suárez, J. (2015). *Filtración de membrana y ósmosis inversa*. Universidad de Coruña.
- Uría, C., Daniel, A., & Pablo, I. (2008). Estudio Isotérmico de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales. *La Granja*, 8(2): 3-8.
- Vargas Rodríguez, M., Cabañas Vargas, D., Gamboa Marrufo, M., & Domínguez Benetton, X. (2009). Evaluación del proceso de biosorción con cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanazol Navy CE en aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería (Mérida, Yuc.)*, 39-43.
- Vasco, V. (2008). *Determinación de parámetros físicos- químicos de la zanahoria amarilla (Daucus carota) como base para el establecimiento de la norma de requisitos*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

- Vasudevan, P., Padmavathy, V., & Dhingra, s. (2003). Kinetics of biosorption of cadmium on Baker's yeast. *Bioresource Technology*, 89, 281-287.
- Vera, L. (22 de ABRIL de 2015). *PROMETEO*. Obtenido de <http://prometeo.educacionsuperior.gob.ec/biosorcion-una-alternativa-para-reducir-la-contaminacion/>
- Verdezoto, F. A., & Fernández-Salvador, P. F. (2013). *Capacidad de absorción de la planta de papa (Solanum Tuberosum ssp indigena), en el suelo contaminado con plomo*. Cuenca.
- Verdugo, F. (2017). *Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la papa de la mandarina (Citrus reticulata var clementina)*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Vijayaraghavan, K., Palanivelub, K., & Velana, M. (2004). Removal of nickel(II) ions from aqueous solution using crab shell particles in a packed bed up-flow column. 223-230.
- Villanueva, C. (2006). *Biosorción de Cobre (II) por biomasa pretrata de cáscara de Citrus Sinensis (naranja), Citrus Limonium (limón) y Opuntía Ficus (palmeta de nopal)*. Lima-Perú: Universidad Nacional de San Marcos.
- Volesky, B. (2003). Biosorption process simulation tools. *Hydrometallurgy*, 71(1-2): 179-190.
- Volesky, B. (2003). Sorption and biosorption. Québec: Montreal-St. Lambert.
- Volesky, W., Weber, J., & Park, J. (2003). Continuous flow metal biosorption in a regenerable Sargassum column. *Water Research*, 37(2):297-306.
- Xiong, J., & Mahmood, Q. (2010). Adsorptive removal of phosphate from aqueous media by peat. *Desalination*, 259, 59-64.

- Yang, G., & Viraraghavan, T. (2003). Heavy metal removal from aqueous solution by fungus *Mucor rouxii*. *Water Research*, 37: 4486-4496.
- Yuvaraja, G., Krishnaiah, N., Subbaiah, M. V., & Krishnaiah, A. (2013). Biosorption of Pb(II) from aqueous solution by *Solanum melongena* leaf powder as a low-cost biosorbent prepared from agricultural waste. *Elsevier; Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 114 (2014) 75– 81.
- Zamora Velazco, G. N. (2010). *Obtención de carbón activado a partir de semillas, de dos palmeras de la Amazonía Peruana, Shapaja (Atta/eaphalerta) y Aguaje (Mauritia flexuosa)*. . Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.