

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. MEDIO FILTRANTE**

(Escobal, 2005) Es un mecanismo físico que tiene el propósito de controlar el paso de los contaminantes. Los diferentes tipos de medios filtrantes se distinguen por su capacidad o habilidad de tolerar el paso de los contaminantes.

La naturaleza del medio filtrante y la configuración del filtro se utilizan para determinar la eficiencia y el desempeño del filtro en la remoción de partículas, su capacidad de alojar contaminantes o la resistencia al flujo a través del filtro.

Entre las características del medio filtrante que influyen en la filtración, se destacan:

El tipo del medio filtrante;

- El tamaño efectivo del material filtrante; y
- El espesor de la capa filtrante.

Entre los tipos de medios filtrantes, se tiene 2 tipos:

- Flexibles, los cuales a su vez se dividen en:
  - Tejidos, pueden ser naturales, sintéticos y metálicos
  - No tejidos
  - No prefabricados
- Rígidos, los cuales pueden ser:
  - Fijos
  - Suelos

### **1.2. METALES PESADOS**

(Ríos, 2014) Los metales se definen en base a sus propiedades físicas en el estado sólido como son: alta reflectividad, alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica, propiedades mecánicas como fuerza y ductilidad.

Otra definición más práctica, desde el punto de vista de la toxicidad, se basa en sus propiedades cuando están en solución: “metal es un elemento que bajo condiciones biológicas puede reaccionar perdiendo uno o más electrones para formar un catión” (Reyes, Alvarado, Antuna, Garcia, Gonzalez, & Vasquez, 2012).

En general, distintas definiciones han sido establecidas para los metales pesados basándose en la densidad (gravedad específica), peso atómico (relativo a la masa atómica), número atómico y toxicidad (Agouborde, 2008).

La definición rigurosa de metal pesado todavía no es establecida por los científicos y es tema de discusión y polémica. Una de sus definiciones se basa en la gravedad específica: “metal pesado es aquel metal con gravedad específica  $> 5 \text{ g/cm}^3$ , sin embargo, esta definición no es útil respecto al estudio de los efectos toxicológicos que algunos metales tienen sobre el ambiente y los seres vivos, así que otra definición de metal pesado que se ha adoptado es “grupo de metales o metaloides asociados con contaminación y toxicidad potencial” (Reyes, Alvarado, Antuna, Garcia, Gonzalez, & Vasquez, 2012).

Los metales pesados ejercen efectos biológicos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales para los distintos organismos. No son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos, causando numerosas enfermedades y trastornos, razón por la cual han sido catalogados como una clase emergente de cancerígenos humanos (Agouborde, 2008).

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre; sin embargo, cuando se liberan en el ambiente por las actividades de los humanos pueden llegar a convertirse en contaminantes en el aire, agua, otros ambientes acuáticos y suelo.

Las fuentes antropogénicas más importantes son la extracción de minerales, desde hace 10,000 años el hombre comenzó la minería, fundición y manufactura de metales utilizados para producir utensilios, herramientas, armas y ornamentos. En las prácticas agrícolas, el uso de químicos para combatir plagas y fertilizar el suelo aportan grandes

cantidades de metales pesados como son cobre, cadmio, mercurio, cromo, arsénico, entre otros. Otras actividades son la fabricación de plásticos, recubrimientos anticorrosivos, alimentos, manufactura de plaguicidas, baterías, soldaduras, pigmentos, producción de acero, curtidoras de piel, entre otras.

La presencia de algunos metales y/o metaloides en el agua puede ocurrir de forma natural por dilución de minerales y erosión. (Castro M. , 2006).

Los metales se encuentran en todos los organismos vivos y juegan diferentes roles. Pueden ser elementos estructurales, estabilizadores de estructuras biológicas, componentes de mecanismos de control y activadores de los sistemas redox. Por ello algunos metales son elementos esenciales y su deficiencia afecta a las funciones biológicas. Sin embargo, cuando éstos se presentan en exceso pueden llegar a ser tóxicos. Algunos metales no tienen una función esencial conocida, contrario a esto muestran manifestaciones toxicas a exposiciones moderadas.

Los metales interactúan en sitios importantes como son los grupos SH (Azufre e Hidrógeno) de los sistemas enzimáticos.

Los efectos carcinogénicos de los metales pesados y metaloides también han sido estudiados ampliamente. La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasifica las sustancias de acuerdo a su condición carcinogénica. En el grupo 1 (Carcinógeno Humano) se encuentran los compuestos del cromo (VI), arsénico orgánico e inorgánico, cadmio, hierro (durante exposición ocupacional) y níquel; en el grupo 2A (Probable Carcinógeno Humano) se enlista el plomo inorgánico y sus compuestos (IARC, 2012).

Los efectos que estos elementos tienen sobre la salud del ser humano dependen de la naturaleza del compuesto, la ruta de exposición, la dosis de exposición y el tiempo de exposición. Las vías de exposición pueden ser por la inhalación de humos o aire contaminado, ingesta de alimentos y/o agua contaminada, consumo de medicamentos, o por contacto directo con la piel. Actualmente una de las más importantes rutas de exposición es la ingesta de agua debido a la contaminación de acuíferos.

### 1.3. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LOS METALES PESADOS

El agua es el solvente universal, gracias a esta propiedad disuelve la mayor cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas dependiendo de sus solubilidades. La incorporación de varios sólidos o estructuras geológicas es fuente de una gran variedad de iones disueltos en las aguas superficiales, los que permitirían saber, de no haber existido la actividad humana, el tipo de suelo que atraviesa una fuente de agua. Algunos de estos iones se encuentran en forma mayoritaria, respecto a los demás elementos en todas las aguas continentales:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , mientras que otros, se hallan a niveles de trazas, como es el caso de los metales pesados, siendo algunos de ellos necesarios para el desarrollo correcto de los microorganismos, las plantas y los animales que consuman de esta agua.

La contaminación de los cuerpos de agua del planeta, se produce, por la presencia de compuestos o elementos que son producidos por las actividades antropogénicas, o por una variación de la concentración normal de las sustancias existentes debido a la acción humana. Los componentes químicos potencialmente tóxicos son los metales pesados, y entre ellos Sb, As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Ni, Pb, Se y Zn.

El ingreso de metales pesados al ciclo hidrológico procede de diversas fuentes, siendo una de ellas de origen natural como lo es la erosión del suelo, que deja libres minerales que luego son arrastrados por las aguas lluvias hasta los cauces de agua.

La mayor concentración de contaminantes del agua es de origen antropogénico debida principalmente a la actividad humana.

El estudio de los metales pesados es importante, debido a su alta toxicidad, alta persistencia y acumulación rápida por los organismos vivos. Los efectos tóxicos de los metales pesados, no presentan problemas de salud a plazo corto, aunque sí puede haber una incidencia muy importante a medio y largo plazo.

Evitar el ingreso de contaminantes a nuestro organismo es difícil, puesto que los propios organismos vivos los incorporan a sus tejidos a través del consumo de alimentos contaminados y de éstos a sus depredadores, en los que se acaban

manifestando. La toxicidad de los metales pesados es proporcional a la facilidad de ser bioadsorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica puede adsorberse más fácilmente que estando en forma elemental; si esta, se halla reducida finamente aumentan las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos (Castro, 2009).

#### **1.4. TECNOLOGÍAS PARA REMOVER METALES PESADO EN AGUAS**

(Sanchis, 2010) Las principales técnicas de eliminación de iones metálicos de las aguas residuales son la precipitación química, la oxidación-reducción, el intercambio iónico, los tratamientos electroquímicos, los procesos de membrana, la extracción con disolventes, la adsorción sobre carbón activado y la bioadsorción.

##### **1.4.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA**

La precipitación química consiste en la separación de los iones metálicos de una disolución como consecuencia de la disminución de la solubilidad de los metales con el incremento del pH. La precipitación química consiste en la formación del hidróxido metálico correspondiente mediante el ajuste del pH a través de la adición de compuestos básicos como hidróxido sódico (NaOH), hidróxido cálcico ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o cal (CaO), y es el método más ampliamente utilizado para la eliminación de metales disueltos en el agua residual.

En la mayoría de casos, el hidróxido cálcico es el reactivo más eficaz porque da lugar a la formación de precipitados muy estables y posee capacidad para desestabilizar coloides. A su vez, juega un papel importante como adsorbente, ya que incluso a valores de pH elevados están presentes partículas sólidas de hidróxido cálcico con capacidad para retener iones adsorbidos. Para una correcta precipitación de los metales se recomienda la aplicación de una mezcla rápida al inicio de la operación seguida de una disminución de la velocidad de agitación que favorezca la floculación. Como consecuencia de la precipitación, se forma un fango con elevadas concentraciones de

metal que debe retirarse y gestionarse adecuadamente como residuo peligroso. La relación entre la solubilidad del metal y el pH de la disolución depende del tipo de metal que se considere. Existe un pH de mínima solubilidad que es diferente para cada metal, y que no se encuentra necesariamente en el intervalo 6.5–9.5, especificado como estándar para las corrientes residuales descargadas, lo que implica que el ajuste de pH a un valor alrededor de 8.5 puede no producir resultados satisfactorios en la depuración.

La presencia de ciertos compuestos en el agua residual puede producir interferencias que disminuyan la eficacia de la precipitación. Tal es el caso de los agentes complejantes, que se coordinan con los metales dando lugar a la formación de complejos altamente solubles, inhibiéndose la precipitación.

La fuerza iónica de la disolución afecta a la solubilidad de los óxidos metálicos. En ocasiones una fuerza iónica elevada inhibe la precipitación o causa desestabilización de los precipitados, aunque otras veces la promueve probablemente por saturación de la disolución con sales. Cabe destacar la dificultad de predecir la fuerza iónica de un efluente real, ya que rara vez se mantiene constante.

La precipitación química es un método de relativa facilidad de aplicación, ya que no requiere un equipo sofisticado ni personal cualificado, pero las interferencias anteriormente mencionadas, junto con las dificultades para controlar el proceso, ocasionan con frecuencia la aparición de concentraciones residuales de metales tras el tratamiento por encima de los valores requeridos para el vertido.

Además, tiene la problemática añadida de la necesidad de gestión del fango con elevadas concentraciones de metales que se genera tras el tratamiento.

#### **1.4.2. PROCESOS DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN**

Los procesos de oxidación-reducción consisten en la adición de un compuesto que actúa como agente oxidante o reductor, produciéndose una transformación como consecuencia de la transferencia electrónica entre el compuesto añadido y los compuestos presentes en el agua residual. Se utilizan para eliminar un compuesto

contaminante del agua residual por cambio de fase, como en la transformación de nitrato a nitrógeno, o para transformar un compuesto que se encuentra en una forma de elevada toxicidad a una forma menos peligrosa o que puede eliminarse más fácilmente. Uno de los procesos que más se emplean en el tratamiento de efluentes con metales pesados es la reducción del cromo hexavalente, Cr (VI), a cromo trivalente, Cr (III), como paso previo a su precipitación. Esta reacción se lleva a cabo mediante la adición de agentes reductores como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y sus sales, el bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) o el ion ferroso (Fe (II)). Son reacciones fuertemente dependientes del pH, de manera que el intervalo de trabajo depende del reactivo utilizado. Por ejemplo, la reducción de Cr (VI) a Cr (III) utilizando  $\text{SO}_2$  o algunas de sus sales se lleva a cabo en el intervalo de pH 2– 3, mientras que si se utiliza  $\text{NaHSO}_3$  el pH de trabajo debe ser básico ( $\text{pH}>7$ ).

### **1.4.3. INTERCAMBIO IÓNICO**

El intercambio iónico es un proceso por el cual los iones presentes en un material de intercambio son reemplazados por iones de una especie diferente que se encuentran en la disolución. El material de intercambio se conoce con el nombre de resina de intercambio iónico y la forma más habitual de operación es con la resina en forma de columna empaquetada. Cuando la resina se agota tras cierto tiempo de funcionamiento, se hace necesaria su regeneración.

Los costes de operación mayoritarios provienen precisamente de la regeneración, siendo imprescindible su optimización tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

Las resinas de intercambio iónico pueden estar compuestas por una gran variedad de materiales en función de los iones que se desee eliminar de la disolución. En el caso concreto de los metales pesados, suelen usarse resinas catiónicas con una matriz de poliestireno cargada con grupos funcionales complejantes. Su regeneración suele llevarse a cabo utilizando ácidos minerales.

El intercambio iónico permite eliminar metales presentes en elevada concentración en efluentes de empresas de diversos sectores industriales como el de mecanizado y preparación de metales, la industria del sector de la electrónica, los recubrimientos y acabados metálicos, la industria farmacéutica, etc. La utilización de resinas suficientemente específicas puede permitir la recuperación de los metales. Esta tecnología presenta como principal ventaja que puede ser muy específica si se selecciona adecuadamente la resina. No obstante, a efectos prácticos es difícil aprovechar esta ventaja por la elevada variabilidad en la composición de los efluentes industriales, como suele ocurrir en las industrias del sector de tratamiento de superficies metálicas.

Además, es una tecnología que presenta un coste elevado tanto por el coste de adquisición de las resinas como por el de su regeneración. Por otro lado, tras la regeneración de las resinas se genera un efluente con concentraciones elevadas de metales, que debe gestionarse adecuadamente como residuo peligroso de no ser posible la recuperación de metales.

#### **1.4.4. TRATAMIENTOS ELECTROQUÍMICOS**

Los tratamientos electroquímicos son reacciones de oxidación-reducción inducidas por la aplicación de energía eléctrica externa entre dos electrodos que se encuentran inmersos en una disolución conductora. La aplicación más conocida de esta tecnología es la reducción catódica de los iones metálicos de una disolución para la deposición del metal. Frente a la precipitación química, presenta la ventaja de la obtención del metal con unas mejores características para su reutilización.

Sin embargo, si existen varios metales en la disolución, situación bastante frecuente, aparecen muchas dificultades para la obtención de un producto metálico aprovechable. Tampoco resulta una técnica adecuada cuando la concentración de metal es reducida, normalmente inferior a 10 mg, debido a la disminución de la eficacia de la operación (Eilbeck y Mattochk, 1987).

#### 1.4.5. PROCESOS DE MEMBRANA

Los procesos de depuración por membranas consisten en una separación física de los solutos presentes en el agua residual al pasar a través de una membrana selectiva a cierto tipo de iones. Los procesos de membrana se dividen en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, diálisis y electrodiálisis.

Se diferencian entre sí por el material constituyente de la membrana, la naturaleza de la fuerza impulsora, el mecanismo de separación y el tamaño de poro de la membrana. Las aplicaciones de este tipo de tecnología son muy diversas y evolucionan en la medida en que mejora el diseño de las membranas y los materiales utilizados en su fabricación. Concretamente, para la eliminación de metales pesados se emplean la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa. Las membranas de ultrafiltración son permeables al solvente, generalmente agua, y a los compuestos de bajo peso molecular, mientras que las moléculas de tamaño superior al tamaño de poro de la membrana quedan retenidas en ésta. Las membranas de ultrafiltración retienen partículas con un tamaño comprendido entre 0.005 y 0.2  $\mu\text{m}$  (Tchobanoglous y col., 2003). Retienen solutos con peso molecular comprendido en el rango 300–500,000.

Los materiales de las membranas más habituales son el acetato de celulosa, las poliamidas y las polisulfonas. Las presiones suelen estar comprendidas en el rango 10–100 psi (Seader y Henley, 2006).

Los mecanismos de separación en la nanofiltración incluyen tanto efectos estéricos como eléctricos, ya que las membranas de nanofiltración se caracterizan por el pequeño tamaño de poro y por su carga superficial (Kurniawan y col. 2006).

Mientras en la ultrafiltración la separación se produce fundamentalmente por efecto tamiz, en la nanofiltración y en la ósmosis inversa los solutos de menor tamaño pueden quedar retenidos en la capa de agua adsorbida sobre la superficie de la membrana. El tamaño de las partículas que son retenidas por nanofiltración se encuentran en el rango 0.001–0.01  $\mu\text{m}$ .

En los procesos de ósmosis inversa, se aplica una presión hidrostática superior a la presión osmótica de la corriente alimentada, de manera que los compuestos son retenidos por la membrana y el agua pasa a través de ésta. Se utiliza una membrana densa, normalmente de acetato de celulosa o de poliamidas aromáticas, cuyo espesor debe ser relativamente elevado para soportar las elevadas presiones a las que es sometida. El tamaño de las partículas retenidas se encuentra entre 0.001 y 0.0001  $\mu\text{m}$  y las presiones de trabajo entre 100 y 1,000 psi (Seader y Henley, 2006).

Uno de los problemas más importantes de estos procesos es el ensuciamiento de la membrana, conocido comúnmente como fouling, que reduce el flujo de agua limitando la capacidad del sistema. Para reducir el ensuciamiento y alargar la vida útil de las membranas, se requiere de un pretratamiento del agua a tratar y de un mantenimiento continuo de las membranas.

En términos relativos, se trata de una técnica de elevado coste asociado a la adquisición de las membranas, si bien éste va disminuyendo por la continua evolución de la tecnología de fabricación de las membranas y el aumento del número de instalaciones operativas.

#### **1.4.6. EXTRACCIÓN CON DISOLVENTES**

El tratamiento con disolventes para la eliminación de metales pesados consiste en la extracción del metal por contacto del efluente contaminado con un disolvente orgánico, seguido de una separación de la fase orgánica del efluente descontaminado. Una vez alcanzada la separación de fases, el disolvente orgánico cargado de metal pesado se pone en contacto con una corriente acuosa para recuperar el metal y permitir la reutilización del disolvente.

Esta técnica es utilizada para la recuperación del metal cuando su concentración en la corriente residual es elevada. La extracción de cationes se lleva a cabo generalmente por formación de complejos con agentes complejantes ácidos presentes en el disolvente orgánico, mientras que la extracción de aniones se realiza mediante la formación de

enlaces iónicos con compuestos alquilamínicos de cadena larga o compuestos de amonio cuaternario presentes en el disolvente orgánico. Silva y col. (2005) utilizaron esta técnica para recuperar parte de los metales pesados presentes en un fango industrial. Para ello, separaron los metales del fango utilizando una disolución ácida que posteriormente fue sometida al procedimiento de extracción con disolventes, en el que se utilizó ácido fosfórico disuelto en keroseno como disolución de extracción.

Los mayores inconvenientes de esta tecnología son el elevado coste por el gran consumo de disolvente y la contaminación cruzada de la corriente acuosa con el disolvente orgánico.

#### **1.4.7. ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVADO**

La adsorción es un proceso en el que átomos, iones o moléculas son retenidas en la superficie de un material. Consiste en un proceso de separación de un soluto presente en una fase líquida o gas que se concentra sobre la superficie de otra fase generalmente sólida. Se considera un fenómeno superficial.

Se denomina adsorbato al soluto y adsorbente a la fase sobre la cual se acumula. Si bien el carbón activado presenta un elevado potencial para la adsorción de compuestos orgánicos y algunos inorgánicos, su aplicación al tratamiento de aguas residuales no está muy extendida, y sus usos en este campo suelen ser como tratamiento de afino de una corriente que ha sido previamente tratada en otro proceso, para eliminar parte de la materia orgánica disuelta que permanece tras el tratamiento. Se usa principalmente para eliminar compuestos orgánicos refractarios, así como compuestos inorgánicos residuales como el nitrógeno, sulfuros y metales pesados (Tchobanoglous y col., 2003). La forma más habitual de operación es en columnas de lecho fijo, en las cuales se introduce la disolución conteniendo los solutos a eliminar que quedan retenidos sobre el material que va saturándose con el tiempo. Cuando la concentración en el efluente de la columna alcanza el máximo valor permitido, debe cesarse la alimentación y proceder a la regeneración del lecho de adsorbente.

El inconveniente principal de esta operación es el elevado coste del carbón activo, por lo que hace ya algunos años se investigan procesos de adsorción basados en otros materiales de menor coste.

### **1.5. BIOADSORCIÓN PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS**

(Sanchis, 2010) La bioadsorción es un proceso por el cual ciertos tipos de materiales de origen natural retienen y concentran en su superficie sustancias y compuestos de diversa naturaleza química presentes en disoluciones acuosas.

El término bioadsorción hace referencia a un tipo específico de adsorción. En el proceso participan una fase sólida, el bioadsorbente, y una fase líquida, el solvente, que contiene las especies disueltas que conviene separar de la disolución (adsorbatos). Como consecuencia de la elevada afinidad entre el bioadsorbente y el adsorbato, éste es atraído y retenido sobre el bioadsorbente por una serie de procesos complejos que incluyen la quimisorción, la complejación, la adsorción en superficie y en los poros, el intercambio iónico, la quelación y la adsorción de naturaleza física.

Un proceso alternativo a los métodos convencionales de depuración de aguas residuales conteniendo metales pesados es la bioadsorción, que hace referencia a un tipo específico de adsorción, en la que la fase sólida se conoce con el nombre de bioadsorbente. Los bioadsorbentes son materiales de origen biológico que presentan propiedades tanto de adsorbentes como de intercambiadores de iones, y poseen propiedades que les confieren elevadas capacidades de retención de metales, siendo capaces de disminuir su concentración en la disolución a niveles de ppb. (Volesky, 2001).

Es una técnica que puede utilizarse para el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales complejas con concentraciones bajas de metales.

Las ventajas más importantes de la bioadsorción frente a otros tratamientos son:

- Se trata de una tecnología de bajo coste, por el reducido coste de los materiales bioadsorbentes, la escasa necesidad de reactivos y el reducido consumo energético del proceso.
- Presenta una elevada eficacia, especialmente cuando la concentración de metal en el agua residual es baja, situación, por otro lado, en la que las técnicas convencionales se muestran ineficaces.
- Es posible la regeneración de un gran número de bioadsorbentes, pudiéndose utilizar en ciclos sucesivos de adsorción-desorción.
- Puede permitir la recuperación del metal tras el proceso de regeneración en el que se obtiene una solución concentrada en el compuesto de interés.
- Frente a la precipitación, la bioadsorción no genera fangos químicos, y el único residuo del proceso es el bioadsorbente agotado tras sucesivos ciclos de bioadsorción/regeneración.
- Permite la valorización de residuos que se utilizan como bioadsorbentes.
- Al emplearse materiales residuales de diversa procedencia sin tratamiento previo, y en especial sin carbonización previa, el impacto ambiental se reduce considerablemente frente al de los adsorbentes tradicionales como los carbones activados.

Los inconvenientes más importantes con los que se enfrenta esta tecnología son los siguientes:

- Las técnicas convencionales están ampliamente extendidas y son muy conocidas en diversos sectores industriales, lo que dificulta enormemente su sustitución.
- Las interacciones de los metales de la disolución y de los bioadsorbentes con otros compuestos presentes en las aguas residuales pueden ocasionar cambios en las capacidades de retención, disminuyendo la eficacia del proceso. Por ello,

es importante caracterizar adecuadamente las aguas residuales a tratar para evitar interacciones indeseables, y programar adecuadamente los ciclos de operación, para conseguir el máximo aprovechamiento del sistema manteniendo las condiciones de calidad requeridas al efluente.

- La selección de los materiales bioadsorbentes debe realizarse atendiendo a la disponibilidad de los mismos en cantidad y reducido coste para conseguir una aplicación extendida de la bioadsorción a nivel industrial.
- Trata grandes volúmenes, pero con baja concentración de metales pesados.

A continuación, se detallarán las ventajas y desventajas de la bioadsorción como proceso de eliminación de metales pesados, en comparación a las demás tecnologías.

***Tabla 1-I, Cuadro comparativo***

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Alto rendimiento</li> <li>• No utiliza productos químicos</li> <li>• Tecnología accesible</li> <li>• Es orgánico y biodegradable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita grandes cantidades de cáscara de banana para usar este método a gran escala.</li> <li>• Aún está en proceso de investigación</li> <li>• Variabilidad de efectividad debido a otros componentes presentes en aguas contaminadas.</li> <li>• Trata bajas concentraciones de metales pesados.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración Propia, 2021

## 1.6. CÁSCARA DE BANANA COMO BIOADSORBENTE

(Tomaylla, 2019) La cáscara de banana tiene la capacidad de adsorber por fisisorción o adsorción física (es un tipo de adsorción). En química se denomina adsorción al acúmulo o depósito de material (adsorbato) en un plano o superficie (a diferencia de la absorción que es un proceso volumétrico).

Existen un gran número de moléculas con carga negativa en la cáscara de banana, estas moléculas tienen un gran poder de atracción sobre la carga positiva de los metales pesados.

(Pardo & Porras, 2018) La cáscara de banana molida tiene la capacidad para extraer iones de metales pesados del agua y de los parámetros que intervienen en este proceso. Los principales componentes de la cáscara de banana son: celulosa (25%), hemicelulosa (15%) y lignina (60%).

La adsorción de la cáscara de banana se debe en gran parte a la lignina que son polímeros insolubles, además presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina (Monsalve et. Al, 2006).

La gran capacidad de adsorción de metales de la lignina se debe en parte a los fenoles y otros grupos funcionales presentes en su superficie, aunque no puede ser atribuida a un único grupo funcional, pero entre ellos existe uno que posee mayor afinidad con el ion metálico. También se debe a las fuerzas de atracción electrostática entre la superficie de la lignina y el ion metálico. Esta fuerza de enlace con la que los iones son adsorbidos es debida al tamaño del radio del ion que entre más grande, mayor será la fuerza con la que es retenido, esto se presenta porque existe una fuerza de repulsión electrostática de los iones metálicos con menor radio iónico con los sitios de unión de la lignina (Correa et. Al, 2012).

### **1.7. DATOS EXPERIMENTALES DEL MEDIO FILTRANTE OBTENIDOS POR OTROS AUTORES**

Según los autores mencionados en los antecedentes, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, concluyen que se puede utilizar la cáscara de banana como medio filtrante de metales pesados en aguas y que esta tiene +/- 65% de eficacia, mostrando en algunas investigaciones resultados de 90% de retención para el cromo, sin embargo, el proceso puede repetirse las veces que sean necesarias hasta lograr porcentajes de retención de metales pesados tan bajos como se requiera.

Los mismos autores recomiendan usar 5 gramos o menos por cada 100 cm<sup>3</sup> de agua, tomar temperaturas de secado menores a 80°C y realizar pruebas previas para determinar el tiempo en el que el medio filtrante se disuelve en el agua ya que este será el tiempo adecuado para ponerlo en contacto con la muestra patrón.

### **1.8. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

(Carrión, 2013) El fruto del banano tarda entre 80 y 180 días en desarrollarse por completo. En condiciones ideales fructifican todas las flores femeninas, adoptando una apariencia dactiliforme que lleva a que se denomine mano a las hileras en las que se disponen.

Puede haber entre 5 y 20 manos por espiga, aunque normalmente se trunca la misma parcialmente para evitar el desarrollo de frutos imperfectos y evitar que el capullo terminal insuma las energías de la planta. El punto de corte se fija normalmente en la "falsa mano", una en la que aparecen frutos enanos. En total puede producir unos 300 a 400 frutos por espiga, pesando más de 50 kg.

El fruto es una falsa baya epígina de 7 a 30 cm de largo y hasta 5 de diámetro, que forma un racimo compacto. Está cubierta por un pericarpo coriáceo verde en el

ejemplar inmaduro y amarillo intenso, rojo o bandeado verde y blanco al madurar. Es de forma lineal o falcada, entre cilíndrica y marcadamente angulosa según la variedad. El extremo basal se estrecha abruptamente hacia un pedicelo de 1 a 2 cm. La pulpa es blanca a amarilla, rica en almidón y dulce; en los plátanos puede resultar algo astringente o gomosa por su contenido en látex, farinosa y seca.

Muy rara vez las variedades diploides o tetraploides producen semillas, negras, globosas o irregulares, con la superficie rugosa, de hasta  $16 \times 3$  mm de tamaño, incrustadas en la pulpa. Los triploides, como 'Cavendish', nunca producen semilla.

La fibra vegetal se clasifica en dos tipos: soluble e insoluble. La fibra soluble puede contribuir a equilibrar el nivel de colesterol en la sangre, prevenir el cáncer de colon, regular el tránsito intestinal y disminuir altos niveles de glucosa en la sangre.

La fibra insoluble; se refiere a la celulosa, lignina y algunas hemicelulosas; es fundamental para el tránsito intestinal ya que la celulosa tiene un efecto laxante mayor al de la fibra soluble, lo cual es muy beneficioso para combatir el estreñimiento.

Por esta razón se recomienda el consumo de productos que contengan fibra vegetal, siendo los remanentes de banano una fuente potencial de fibra para el consumo humano.

Por otro lado, la fruta de banano contiene 60% de pulpa y 40% de cáscara, es decir que de una caja de banano de 18,14 kg se desperdician 7,25 kg.

*Tabla 1-II, Composición de los remanentes de banana*

<b>COMPONENTES</b>	<b>CÁSCARA DE BANANA MADURA</b>	<b>CÁSCARA DE BANANA VERDE</b>
<i>%Humedad</i>	95,66	91,62
<i>%Proteína Cruda</i>	4,77	5,19
<i>%Fibra Cruda</i>	11,95	11,58
<i>Energía Bruta, Kcal</i>	4592	4383
<i>%Calcio</i>	0,36	0,37
<i>%Fósforo</i>	0,23	0,28
<i>%Ceniza</i>	14,58	16,30

**Fuente:** Moreira Carrión, 2013

## **1.9. PRODUCCIÓN DE BANANA EN BOLIVIA**

(Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2008) El Plátano es originario en Asia llegó a América en el año 1516, donde le cambiaron el nombre a banana y se convirtió en uno de los alimentos básicos de los países tropicales y caribeños.

La banana en Bolivia es originaria de la amazonía subtropical, en sus variedades originales criollas es un producto abundante en la zona de Alto Beni y Caranavi donde toda la producción es orgánica. En la región del chapare de Cochabamba se han introducido variedades mejoradas y parte de esa producción es orgánica.

En Bolivia, según datos estadísticos del INE, para el año 2020 existen 20 010 hectáreas de Banana cultivadas, la zona de mayor producción es el trópico de Cochabamba con 12 210 hectáreas, según el INE en Tarija se cultivan 28 hectáreas de banana. Produciéndose así 301 162 toneladas en Bolivia y 340 toneladas.

# **CAPÍTULO II**

## **PARTE EXPERIMENTAL**

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1. METODOLOGÍA A SER EMPLEADA**

Para la metodología a emplear en el presente trabajo y al ser un tema que aún se encuentra en investigación, se tomó como base diferentes fuentes bibliográficas donde se obtuvieron resultados óptimos para la elaboración de un medio filtrante a partir de cáscara de banana, las cuales consisten en tres operaciones básicas que son secado, molienda y tamizado.

Posteriormente se realizarán pruebas de adsorción de metales pesados en las muestras patrones previamente preparadas, las cuales tengan una concentración conocida de metal pesado, que serán mezcladas con el medio filtrante ya obtenido.

### **2.2. SELECCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE A PARTIR DE CÁSCARA DE BANANA**

(Pardo & Porras, 2018) La mayoría de bioadsorbentes tiene una buena capacidad de adsorción en comparación con los carbonos activados e intercambiadores comerciales de iones; pero, su uso en su forma original es limitado debido a la filtración de sustancias orgánicas en las soluciones.

La cáscara de banana, cuando se seca y muele, hasta obtener un polvo muy fino, tiene la capacidad de limpiar las aguas contaminadas con metales pesados de una manera eficaz y económica.

Para eliminar el agua de la materia prima existen varios métodos, sin embargo, se mencionan los métodos más convencionales.

(Maupoey, Andrés, Barat, & Albors, 2001)

- **Secado:** Cuando un producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido en el aire, siendo la corriente de salida el aire húmedo.

- **Liofilización:** Es esta operación, el líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que los contiene por sublimación. De ahí que sea necesario partir del material congelado y trabajar en condiciones de vacío.
- **Ósmosis:** Cuando un producto se sumerge en una disolución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (membrana celular). Este flujo se establece a causa de una diferencia de potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea.

**Tabla 2-I, Criterios para la selección del proceso de eliminación de agua de la materia prima**

<b>FACTOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PONDERACIÓN</b>
Tiempo	Se espera que la etapa elimine la humedad en un tiempo óptimo obteniendo el mismo resultado.	25
Rendimiento	Se espera que el proceso elimine la mayor humedad posible sin alterar las propiedades de la cáscara de banana.	25
Operación	Se espera que la operación sea simple y flexible para cualquier tipo de operador, incluso si este no posee capacitación previa.	20
Impacto Ambiental	Se busca que los residuos que puedan existir no afecten el medio ambiente o tengan mínimo daño a éste.	15
Costo	Se busca que los costos de operación principalmente los servicios eléctricos sean rentables.	15
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-II, Valores para la selección del método*

VALOR	ESCALA DE PUNTUACIÓN
5	Excelente
4	Muy Bueno
3	Adecuado
2	Regular
1	Deficiente

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-III, Matriz de decisión para el proceso de eliminación de agua de la materia prima*

FACTOR	% PONDERACIÓN	SECADO			LIOFILIZACIÓN			ÓSMOSIS			
		Califi.	Fracción de Cal.	Pond. Final	Califi.	Fracción de Cal.	Pond. Final	Califi.	Fracción de Cal.	Pond. Final	
Tiempo	25	4	0,8	20	4	0,8	20	4	0,4	20	
Rendimiento	25	4	0,8	20	4	0,8	20	4	0,8	20	
Operación	20	4	0,8	16	3	0,6	12	2	0,4	8	
Impacto ambiental	15	4	0,8	12	4	0,8	12	4	0,8	12	
Costo	15	3	0,6	9	3	0,6	9	3	0,6	9	
<b>TOTAL</b>					77				73		

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

Dado que se tratará con materia prima seca se pueden optar por dos métodos para la reducción de tamaño.

- Trituración
- Molienda

Si bien no existe una diferencia clara entre la trituración y la molienda, en general se habla de trituración cuando se fragmentan partículas de tamaños superiores a 1 pulgada (25,4 mm) y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1 pulgada (1" = 25,4 mm).

**Tabla 2-IV, Criterios para la selección del proceso de reducción de tamaño de la materia prima**

<b>FACTOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PONDERACIÓN</b>
Tiempo	Se espera que la etapa elimine la humedad en un tiempo óptimo obteniendo el mismo resultado.	25
Rendimiento	Se espera que el proceso elimine la mayor humedad posible sin alterar las propiedades de la cáscara de banana.	25
Operación	Se espera que la operación sea simple y flexible para cualquier tipo de operador, incluso si este no posee capacitación previa.	20
Impacto Ambiental	Se busca que los residuos que puedan existir no afecten el medio ambiente o tengan mínimo daño a éste.	15
Costo	Se busca que los costos de operación principalmente los servicios eléctricos sean rentables.	15
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-V, Valores para la selección del método*

VALOR	ESCALA DE PUNTUACIÓN
5	Excelente
4	Muy Bueno
3	Adecuado
2	Regular
1	Deficiente

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-VI, Matriz de decisión para el proceso de reducción de tamaño de la materia prima*

FACTOR	% PONDERACIÓN	MOLIENDA			TRITURACIÓN			
		Califi.	Fración de Cal.	Pond. Final	Califi.	Fración de Cal.	Pond. Final	
Tiempo	25	5	1	25	5	1	25	
Rendimiento	25	4	0,8	20	4	0,8	20	
Operación	20	5	1	20	4	0,8	16	
Impacto ambiental	15	4	0,8	12	4	0,8	12	
Costo	15	5	1	15	5	1	15	
<b>TOTAL</b>					92			88

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

## **2.3. OPERACIONES UNITARIAS PARA LA OBTENCIÓN DE UN MEDIO FILTRANTE A PARTIR DE CÁSCARA DE BANANA**

Para elaborar un medio filtrante a partir de cáscara de banana se necesitan tres operaciones unitarias principales: secado, molienda y tamizado.

### **2.3.1. SECADO**

(McCabe, Smith, & Harriot, 2007) El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

### **2.3.2. MOLIENDA**

(McCabe, Smith, & Harriot, 2007) El objetivo de la molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseadas por su gran superficie o bien por su forma, tamaño y número.

### **2.3.3. TAMIZADO**

(McCabe, Smith, & Harriot, 2007) El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. En el tamizado industrial, los sólidos se colocan sobre la superficie del tamiz. Las partículas de menor tamaño, o finos, pasan a través de las aberturas del tamiz; mientras que las de mayor tamaño, o colas, no pasan.

### **2.3.4. ADSORCIÓN**

Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material.

Es decir, es un proceso en el cual un contaminante soluble (adsorbato) es eliminado del agua por contacto con una superficie sólida (adsorbente). El proceso inverso a la adsorción se conoce como desorción.

#### **2.3.4.1. ADSORCIÓN FÍSICA**

(Castellan, 1987) Se lleva a cabo cuando el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan solo por medio de fuerzas. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos, unas cuantas calorías comparables al calor de vaporización del adsorbato.

El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción.

Cuando las fuerzas de Van der Waals son las mismas que producen la licuación, no se produce adsorción a temperatura crítica del adsorbato gaseoso. Por tanto, si la presión del gas tiene valores cercanos a la presión de vapor de equilibrio para el adsorbente líquido, se producirá una adsorción más extensa, adsorción en capas múltiples.

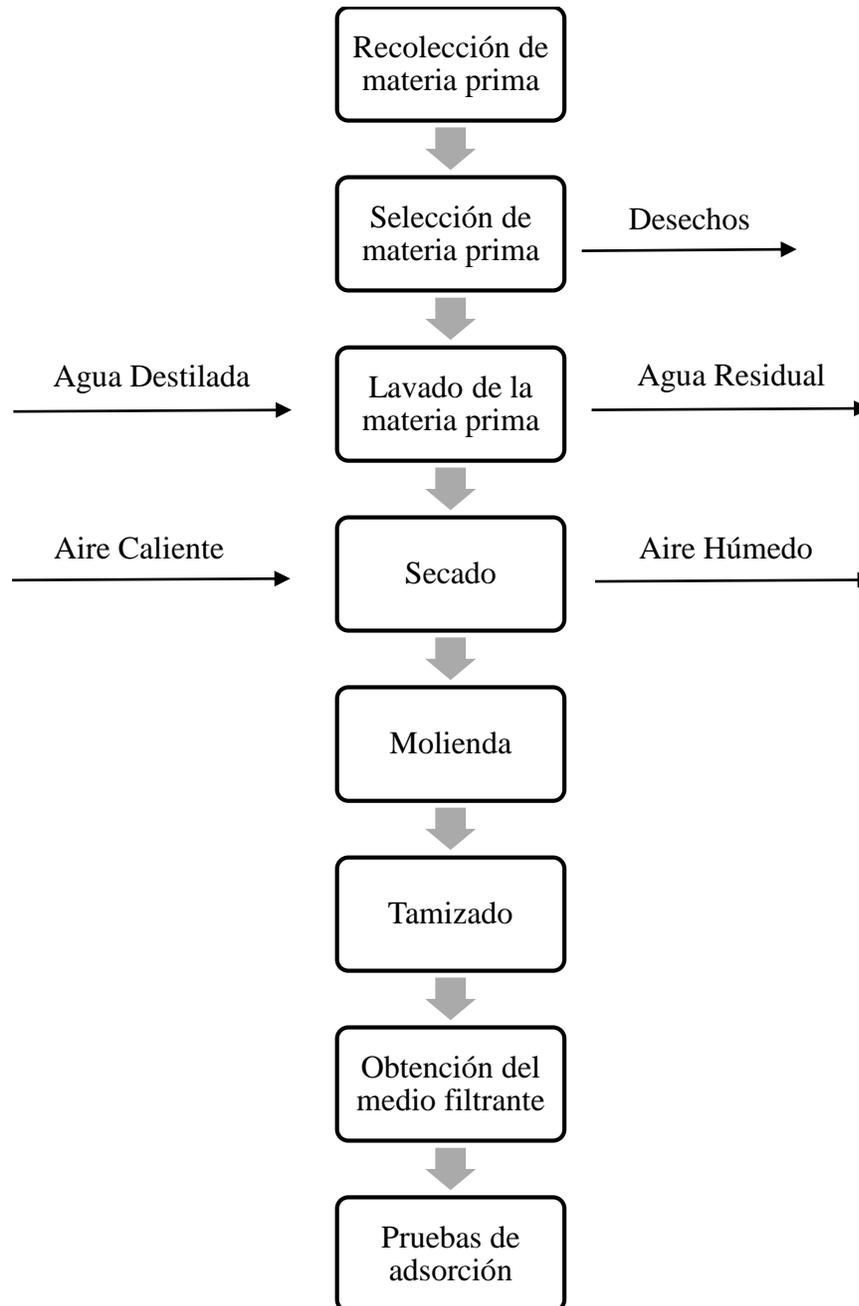
#### **2.3.4.2. ADSORCIÓN QUÍMICA**

(Castellan, 1987) Las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie. En este caso se rompe y se forman enlaces, el calor de adsorción tiene intervalos de valores análogos a los de una reacción química, desde una hasta cientos de Kilocalorías. La adsorción química no va más allá de una monocapa de superficie.

Hay que hacer notar que el tipo de enlace de adsorción se determina no solo por el grado de insaturación de la superficie, sino también por las condiciones en que se efectúa el proceso de adsorción.

Se puede esperar que para un mismo adsorbente y un mismo adsorbato a temperaturas bajas, se lleve a cabo la adsorción física y a temperaturas altas se efectúe la quimisorción.

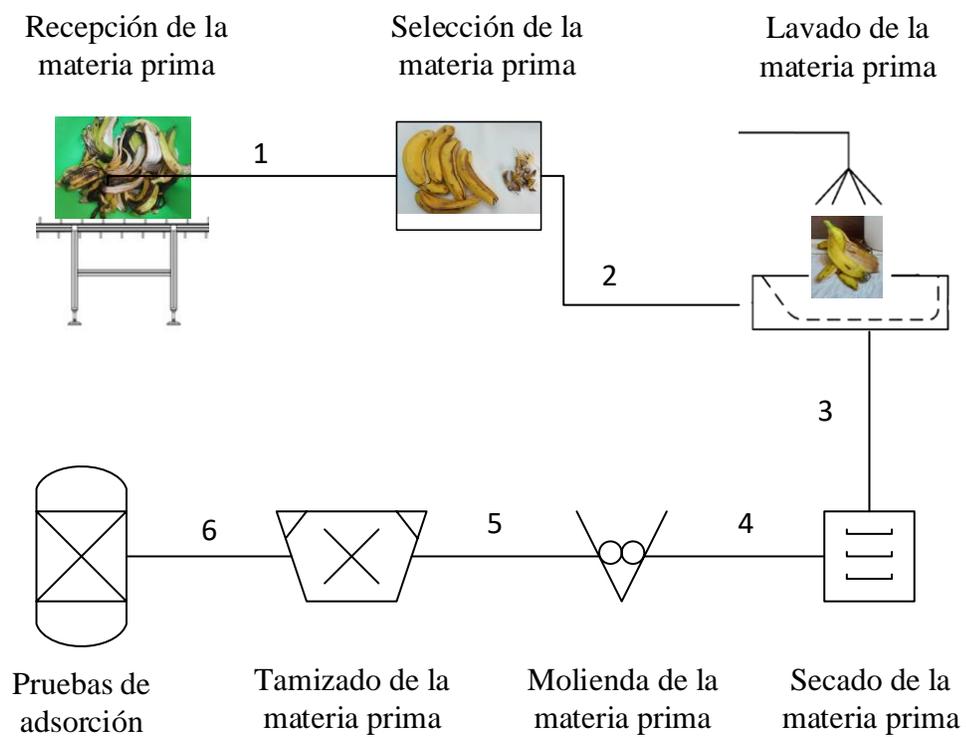
## 2.4. DIAGRAMA DE BLOQUE PARA LA ELABORACIÓN DE UN MEDIO FILTRANTE A PARTIR DE LA CÁSCARA DE BANANA



**Fuente:** Elaboración Propia, 2021

## 2.5. DIAGRAMA DE BLOQUE PARA LA ELABORACIÓN DE UN MEDIO FILTRANTE A PARTIR DE LA CÁSCARA DE BANANA

Gráfico 2-I, Diagrama de flujo del proceso



**Fuente:** Elaboración Propia, 2021

## **2.6. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE LA ELABORACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE**

### **2.6.1. RECOLECCIÓN DE MATERIA PRIMA**

Las bananas son traídas a la ciudad de Tarija del trópico del departamento de Cochabamba, son adquiridas en grandes proporciones por personas que tienen negocios de venta de batidos y licuados, de este punto las cáscaras de banana serán recolectadas, específicamente de la zona del aeropuerto, ya que el proyecto de grado se realizará a pequeña escala, por ende, se necesitan cantidades pequeñas y en esta zona existen alrededor de tres puestos pequeños en el lugar.

### **2.6.2. SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA**

De existir cáscaras de banana en mal estado, como por ejemplo en descomposición, en esta etapa las mismas serán desechadas y las demás serán utilizadas para este propósito.

### **2.6.3. LAVADO DE LA MATERIA PRIMA**

La materia prima se someterá a un lavado con agua potable para eliminar restos de fruta, polvos, tierra y demás impurezas existentes en las cáscaras de banana, y finalmente serán enjuagadas con agua destilada.

### **2.6.4. SECADO**

El propósito de esta etapa será la eliminación de la humedad existente en las cáscaras de banana, para la etapa de secado se puede optar por dos métodos:

- Secar las cáscaras de banana al sol, aproximadamente entre 1 a 2 semanas.
- Secar las cáscaras de banana en una estufa, aproximadamente entre 8 a 16 horas.

Posteriormente se realizará la selección de método más adecuado para el desarrollo de la parte experimental.

### **2.6.5. MOLIENDA**

El principal objetivo en esta etapa será reducir el tamaño de la materia prima previamente seca, hasta partículas pequeñas finas.

### **2.6.6. TAMIZADO**

En esta etapa se buscará uniformar el tamaño de partículas de materia prima, de acuerdo a la disponibilidad de tamices en el laboratorio de operaciones unitarias se obtendrán 2 tamaños diferentes de partícula para las pruebas posteriores (0,25 mm y 0,5 mm), pertenecientes a los valores recomendados en la bibliografía consultada 0,25 a 0,6 mm.

### **2.6.7. OBTENCIÓN DEL MEDIO FILTRANTE**

Una vez realizadas las anteriores etapas, ya se habrá obtenido el medio filtrante para su posterior caracterización y ensayos con muestras patrón de agua con metales pesados.

## **2.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN UTILIZANDO EL MEDIO FILTRANTE OBTENIDO**

Una vez obtenido el medio filtrante se procederá con las pruebas de adsorción, estas se realizarán con soluciones patrón con metales pesados, adquiridas de laboratorio, ya preparadas con una concentración conocida.

Posteriormente se dejará reposar estas muestras por un periodo de hasta 24 horas y luego se llevará a analizar estas muestras al laboratorio.

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se hará la comparación de concentraciones de metales pesados, ya que al haber adquirido la muestra patrón se conocerá su concentración inicial, lo cual facilitará cuantificar la cantidad de componentes que fueron separados posteriores a las pruebas de adsorción.

## **2.8. DISEÑO EXPERIMENTAL**

(Bao, 2020) El objetivo de la experimentación es obtener información de calidad, la cual permita el desarrollo de nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema, tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas.

En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son lo más eficientes para este tipo de experimentos.

## **2.9. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ADSORCIÓN**

Algunos de los factores que intervienen en el proceso de adsorción son:

- Cantidad de medio filtrante en la solución
- Tamaño de partícula del medio filtrante
- pH de la solución
- Temperatura
- Tiempo de contacto

### **2.9.1. CANTIDAD DE MEDIO FILTRANTE EN LA SOLUCIÓN**

(Pardo & Porras, 2018) La relación g/l de adsorbente es el factor que limita el proceso en el caso de metales, es decir a mayor cantidad de adsorbente, obtiene una mayor adsorción.

### **2.9.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL MEDIO FILTRANTE**

(Ríos, 2014) El tamaño de partícula del bioadsorbente afecta tanto a la capacidad de adsorción como a la velocidad de la reacción. La existencia de un mayor número de centros activos disponibles para la reacción y la mayor facilidad con que el adsorbato puede acceder a ellos, con una menor limitación a la difusión en el interior de los poros,

son las causas del aumento de la capacidad de retención con la disminución del tamaño de partícula.

### **2.9.3. pH DE LA SOLUCIÓN**

(Ríos, 2014) El valor de pH de la disolución determina no solo la especiación de la superficie del material, en particular el grado de protonación de los grupos funcionales, sino también la química en disolución de los metales (hidrólisis, complejación por ligandos orgánicos e inorgánicos, reacciones redox, precipitación), que afectará a la disponibilidad del metal para la bioadsorción.

Es importante destacar que el pH óptimo es diferente para cada sistema de bioadsorción estudiado, en función, tanto del metal como del bioadsorbente y de la composición de la disolución que contiene el metal a eliminar.

Los valores de pH demasiado elevados pueden ocasionar la precipitación del metal en la disolución, hecho que debe evitarse durante los experimentos de bioadsorción para no sobrestimar la capacidad de adsorción de los materiales estudiados.

### **2.9.4. TEMPERATURA**

(Ríos, 2014) La temperatura a la cual el proceso de bioadsorción tiene lugar influye tanto en la velocidad de bioadsorción como en el grado en que la bioadsorción se produce. La dependencia de la constante de equilibrio aparente de adsorción ( $K_c$ ) con la temperatura, puede describirse termodinámicamente mediante la ecuación que se describe a continuación

**Ecuación 2-I, Ecuación para la constante de equilibrio aparente de adsorción**

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT}$$

Donde:

- $\Delta S^0$  representa el cambio de entropía ( $J, mol^{-1}, ^\circ C^{-1}$ ),
- $\Delta H^0$  el calor de adsorción o cambio de entalpía ( $J, mol^{-1}$ )
- T la temperatura ( $^\circ C$ )
- R la constante universal de los gases ideales ( $J, mol^{-1}, ^\circ C^{-1}$ ).

En los casos en que la adsorción es exotérmica, el calor de reacción es negativo ( $\Delta H^0$ ), se ve favorecida a elevadas temperaturas.

### **2.9.5. TIEMPO DE CONTACTO**

La reacción de bioadsorción de metales pesados normalmente se completa en un intervalo de tiempo reducido, alcanzándose el equilibrio en pocas horas.

### **2.10. VARIABLES**

Las variables independientes serán aquellos que se pueden manipular, controlar, etc. Las combinaciones de las variables independientes darían como respuesta la variable dependiente que es el % de adsorción de metal pesado en una muestra.

#### **2.10.1. VARIABLES INDEPENDIENTES**

- Cantidad de medio filtrante en la solución
- Tamaño de partícula del medio filtrante
- pH de la solución
- Temperatura
- Tiempo de contacto

#### **2.10.2. VARIABLES DEPENDIENTES**

- % de adsorción de metales pesados en la muestra

A continuación, se realizará la elección de variables a considerar en el diseño experimental del proyecto.

**Tabla 2-VII, Cuadro de Selección de variables**

VARIABLE	SE TOMA EN CUENTA		JUSTIFICACIÓN
	SI	NO	
Cantidad de medio filtrante en la solución	X		Esta variable es limitante en el proceso, la variación de esta nos dice que a mayor cantidad de medio filtrante mayor porcentaje de adsorción.
Temperatura		X	La temperatura en el proceso de adsorción, es una variable considerable, sin embargo, es complicado mantener una temperatura constante durante 24 horas continuas en 8 muestras a escala laboratorio y esta es la razón por la cual no se tomará en cuenta.
Tamaño de partícula del medio filtrante	X		La variación del tamaño de partícula del medio filtrante nos permite variar el área de contacto de metales pesados con el medio filtrante.
pH de la solución		X	Si bien es una variable importante, al obtener soluciones con metales pesados ya preparadas se desconoce el procedimiento de elaboración, variar el pH ya sea básico o ácido puede ocasionar precipitaciones al reaccionar con el metal pesado y afectar el procedimiento de adsorción.
Tiempo de contacto		X	Variar el tiempo de contacto en la adsorción de metales pesados significa interferir en la atracción de iones positivos de los metales hacia la superficie del medio filtrante.

**Fuente:** Elaboración Propia, 2021

### 2.11. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se propone un diseño  $2^2$ , ya que se seleccionaron 2 factores, cada uno de estos factores tendrán 2 niveles, en el caso de la concentración del medio filtrante se variará entre 10 y 20 (gr/ml) y para el tamaño de partícula la variación será de 0,25 y 0,5 (m/m).

#### FACTOR

#### NIVEL

**A:** Concentración de medio filtrante (gr/ml)

-1	+1
-1	+1

**B:** Tamaño de partículas (m/m)

*Tabla 2-VIII, Factores y niveles del diseño experimental*

FACTOR	NIVEL	
Concentración de Medio Filtrante (gr/ml)	A <sub>1</sub> (10 gr/ml)	-1
	A <sub>2</sub> (20 gr/ml)	+1
Tamaño de Partículas (m/m)	B <sub>1</sub> (0,25 m/m)	-1
	B <sub>2</sub> (0,5 m/m)	+1

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

Las combinaciones de estos dos factores a sus dos niveles correspondientes, nos dará la variable respuesta, que es el % de adsorción de metal pesado, es así que a continuación se muestran las posibles combinaciones del diseño experimental:

*Tabla 2-IX, Diseño factorial para el proceso experimental*

<b>N° de Experimento</b>	<b>Concentración de Medio Filtrante (gr/ml)</b>	<b>Tamaño de Partícula del Medio Filtrante (m/m)</b>	<b>Adsorción de Metales Pesados (%)</b>
<b>1</b>	-1	-1	A1
<b>2</b>	+1	-1	A2
<b>3</b>	-1	+1	A3
<b>4</b>	+1	+1	A4

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

## **2.12. DESARROLLO DE LA PARTE EXPERIMENTAL**

La parte experimental de la elaboración del medio filtrante a partir de la cáscara de banana, se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Microbiología de la carrera de Ingeniería de Alimentos (estufa de secado) y en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química (molino de discos y tamiz vibratorio).

### **2.12.1. RECOLECCIÓN DE MATERIA PRIMA**

La materia prima se recolectó por inmediaciones del barrio aeropuerto del consumo diario que hay en la zona, debido a los puestos de batidos y licuados.

**Fotografía 2-I, Zona de recolección de materia prima**



**Fuente:** Google Maps, 2021

Se pudo observar que las cáscaras de banana poseen tamaños variados que van desde 85 gramos frescas a 30 gramos semi secas, por lo que a continuación se muestra una tabla resumen de 12 muestras aleatorias de cáscara de banana, cada una con su peso correspondiente.

Se calculó el promedio de estas muestras aleatorias para tener peso de referencia para la investigación, mediante la siguiente fórmula:

**Ecuación 2-II, Ecuación para calcular el valor promedio**

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$  = Valor promedio

$X_n$  = Valores de la muestra

n = Número de muestras

*Tabla 2-X, Pesos de muestras aleatorias de materia prima*

<i>Muestra</i>	<i>Peso de la cáscara de banana fresca (gr)</i>
1	83,045
2	70, 811
3	67, 307
4	56,177
5	55,161
6	55, 327
7	52,085
8	47. 401
9	46, 480
10	41,422
11	32,108
12	30,935
<b>PROM.</b>	50,133

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.2. SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA

Una vez obtenida la materia prima se quitaron la punta y pedicelo (ambos extremos de la cáscara de banana) para quedarnos solamente con la cáscara de banana, también se hizo la selección adecuada de las cáscaras que estaban en estado de descomposición, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

*Tabla 2-XI, Parámetros a considerar*

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALORACION	DESICIÓN
Pigmentación	La coloración amarilla en la cáscara de banana es uno de los criterios que nos ayuda a conocer si se inició o no el proceso de maduración en la cáscara, así es posible estimar su vida útil	1	Se mantiene
		2	Se mantiene
		3	Se desecha
Olor	El olor de la cáscara de banana nos permite conocer su frescura, en caso de que el olor sea desagradable, significa que la cáscara de banana ya está en proceso de descomposición	1	Se mantiene
		2	Se mantiene
		3	Se desecha
Consistencia	La consistencia de una cáscara de banana, en óptimas condiciones, es estable y firme, si está va perdiendo esta característica se puede concluir que ya inició el proceso de descomposición	1	Se mantiene
		2	Se mantiene
		3	Se desecha

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-XII, Puntaje de Valoración*

VALORACION	ESCALA DE PUNTUACIÓN
1	Muy buena
2	Buena
3	Mala

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Fotografía 2-II, Retiro de punta y pedicelo de la cáscara de banana*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.3. LAVADO DE LA MATERIA PRIMA

Una vez seleccionadas las cáscaras de banana se procedió a quitar toda impureza que esta pueda tener, para ello se lavaron una a una con agua destilada.

*Fotografía 2-III, Lavado de las cáscaras de banana*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

#### 2.12.4. SECADO

Para la etapa del secado se puede optar por dos métodos:

- Secado al sol
- Secado en estufa de secado

Para lo cual se realizó la selección del método correspondiente, considerando algunos de los factores más importante mostrados a continuación:

*Tabla 2-XIII, Criterios para la selección del método*

<b>FACTOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PONDERACIÓN</b>
Tiempo	Se espera que la etapa elimine la humedad en un tiempo óptimo obteniendo el mismo resultado.	25
Rendimiento	Se espera que el proceso elimine la mayor humedad posible sin alterar las propiedades de la cáscara de banana.	25
Operación	Se espera que la operación sea simple y flexible para cualquier tipo de operador, incluso si este no posee capacitación previa.	20
Impacto Ambiental	Se busca que residuos que puedan existir no afecten el medio ambiente o tengan mínimo daño.	15
Costo	Se busca que los costos de operación principalmente los servicios eléctricos sean rentables.	15
<i>TOTAL</i>		<i>100</i>

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-XIV, Valores para la selección del método*

VALOR	ESCALA DE PUNTUACIÓN
5	Excelente
4	Muy Bueno
3	Adecuado
2	Regular
1	Deficiente

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

*Tabla 2-XV, Matriz de decisión para el proceso de selección*

FACTOR	% PONDERACIÓN	SECADO AL SOL			SECADO CON ESTUFA DE SECADO			
		Califi.	Fracción de Cal.	Pond. Final	Califi.	Fracción de Cal.	Pond. Final	
Tiempo	25	2	0,4	10	4	0,8	20	
Rendimiento	25	3	0,6	15	5	1	25	
Operación	20	5	1	20	4	0,8	16	
Impacto ambiental	15	5	1	15	4	0,8	12	
Costo	15	5	1	15	3	0,6	9	
<b>TOTAL</b>					75			82

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

**Fotografía 2-IV, Secado de la cáscara de banana**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

A continuación, se muestra una tabla resumen de la disminución de la masa a través del tiempo a 70 °C de temperatura.

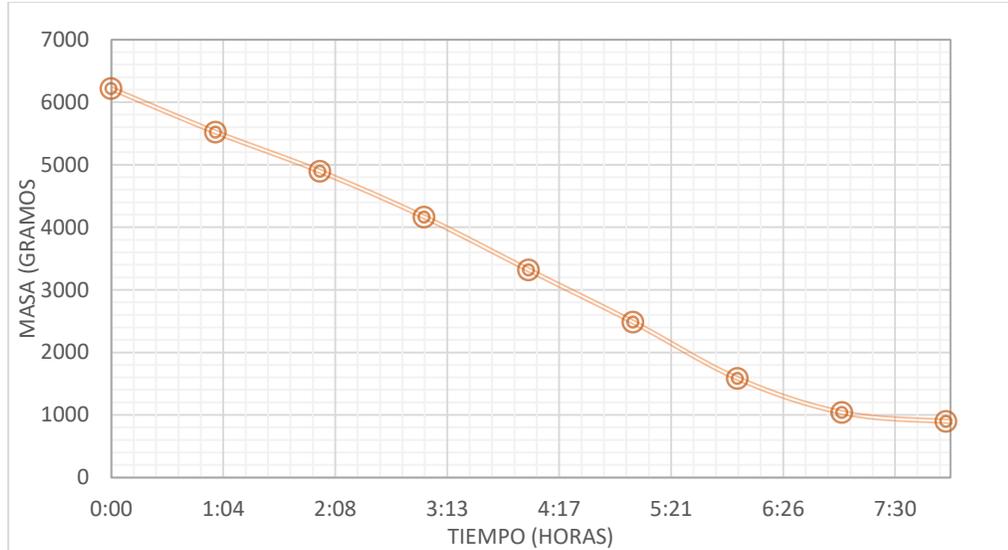
**Tabla 2-XVI, Datos de tiempo y masa obtenidos**

N°	Tiempo (horas)	Masa (gramos)
0	0:00	6216
1	1:00	5521,24
2	2:00	4893,36
3	3:00	4163,13
4	4:00	3316,84
5	5:00	2482,56
6	6:00	1582,23
7	7:00	1036,41
8	8:00	896,72
9	9:00	863,69
10	10:00	863,69

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

Dichos datos podemos apreciarlos en un gráfico de masa versus tiempo donde se muestra como ha disminuyendo la masa con las horas de tiempo transcurridas.

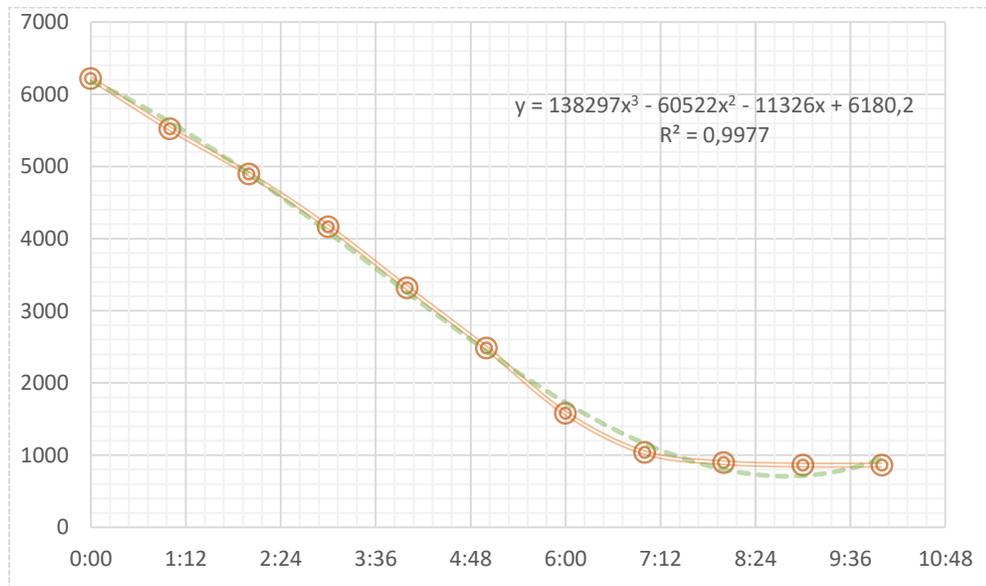
**Gráfico 2-II, Representación Masa vs Tiempo**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

Haciendo el ajuste a la curva correspondiente se obtiene la ecuación correspondiente, lo cual se puede representar en el siguiente gráfico.

**Gráfico 2-III, Ajuste de la curva**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

A partir del ajuste de la curva podemos sacar la ecuación para la pérdida de humedad

**Ecuación 2-III, Ecuación para la pérdida de la humedad**

$$y = 13829 x^3 + 60522 x^2 - 11326 x + 6180,2$$

Se aprecia que el valor de  $R^2 = 0,9977$  representa un buen ajuste a la curva.

#### 2.12.4.1. Humedad en base seca

Base Seca ( $X_{hs}$ ): compara la masa de agua que contiene un material sólido con su masa seca.

**Ecuación 2-IV, Ecuación para calcular humedad en base seca**

$$\%X_{bs} = \frac{m_{H2O}}{m_s} * 100$$

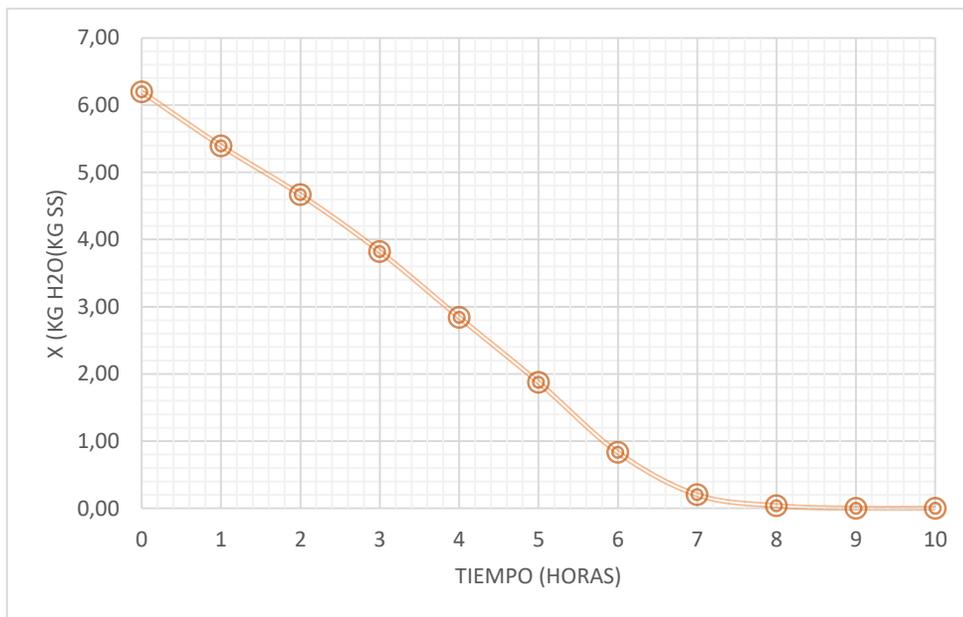
*Tabla 2-XVII, Resultados obtenidos en base seca*

N°	Tiempo (horas)	Masa (gramos)	X base seca (Kg H2O/Kg Ss)
0	0:00	6216	6,20
1	1:00	5521,24	5,39
2	2:00	4893,36	4,67
3	3:00	4163,13	3,82
4	4:00	3316,84	2,84
5	5:00	2482,56	1,87
6	6:00	1582,23	0,83
7	7:00	1036,41	0,20
8	8:00	896,72	0,04
9	9:00	863,69	0,00
10	10:00	863,69	0,00

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

A continuación, podemos apreciar los datos representados en una gráfica de base seca vs tiempo.

**Gráfico 2-IV, X base seca vs Tiempo**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

#### 2.12.4.2. Humedad en base húmeda

Base Húmeda ( $X_{bh}$ ): representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total.

**Ecuación 2-V, Ecuación para calcular humedad en base húmeda**

$$\%X_{bh} = \frac{m_{H2O}}{m_s + m_{H2O}} * 100$$

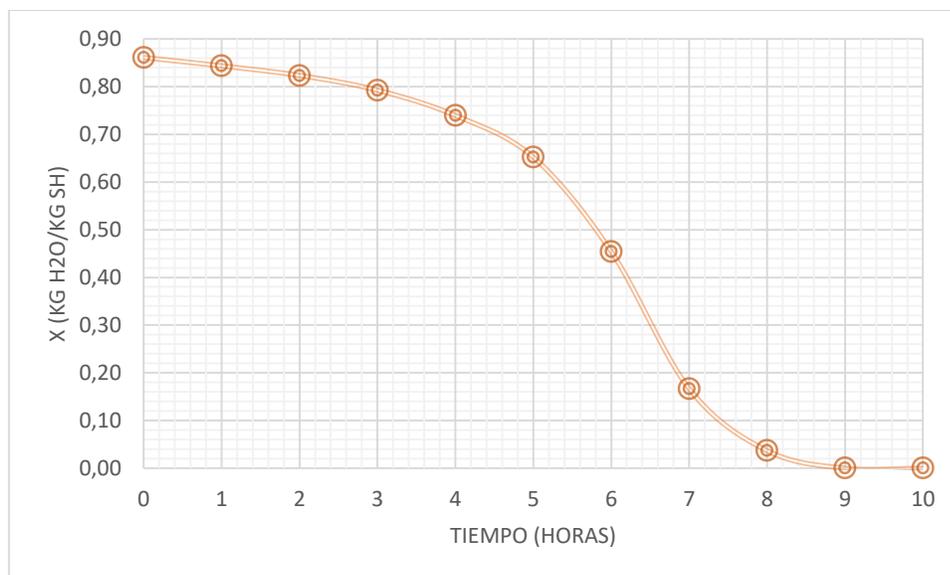
**Tabla 2-XVIII, Resultados obtenidos en base húmeda**

N°	Tiempo (horas)	Masa (gramos)	X base húmeda (Kg H <sub>2</sub> O/ Kg Sh)	Porcentaje (%)
0	0:00	6216	0,86	86,11
1	1:00	5521,24	0,84	84,36
2	2:00	4893,36	0,82	82,35
3	3:00	4163,13	0,79	79,25
4	4:00	3316,84	0,74	73,96
5	5:00	2482,56	0,65	65,21
6	6:00	1582,23	0,45	45,41
7	7:00	1036,41	0,17	16,67
8	8:00	896,72	0,04	3,68
9	9:00	863,69	0,00	0,00
10	10:00	863,69	0,00	0,00

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

A continuación, podemos apreciar los datos representados en una gráfica de porcentaje de humedad vs tiempo.

**Gráfico 2-V, X base húmeda vs Tiempo**

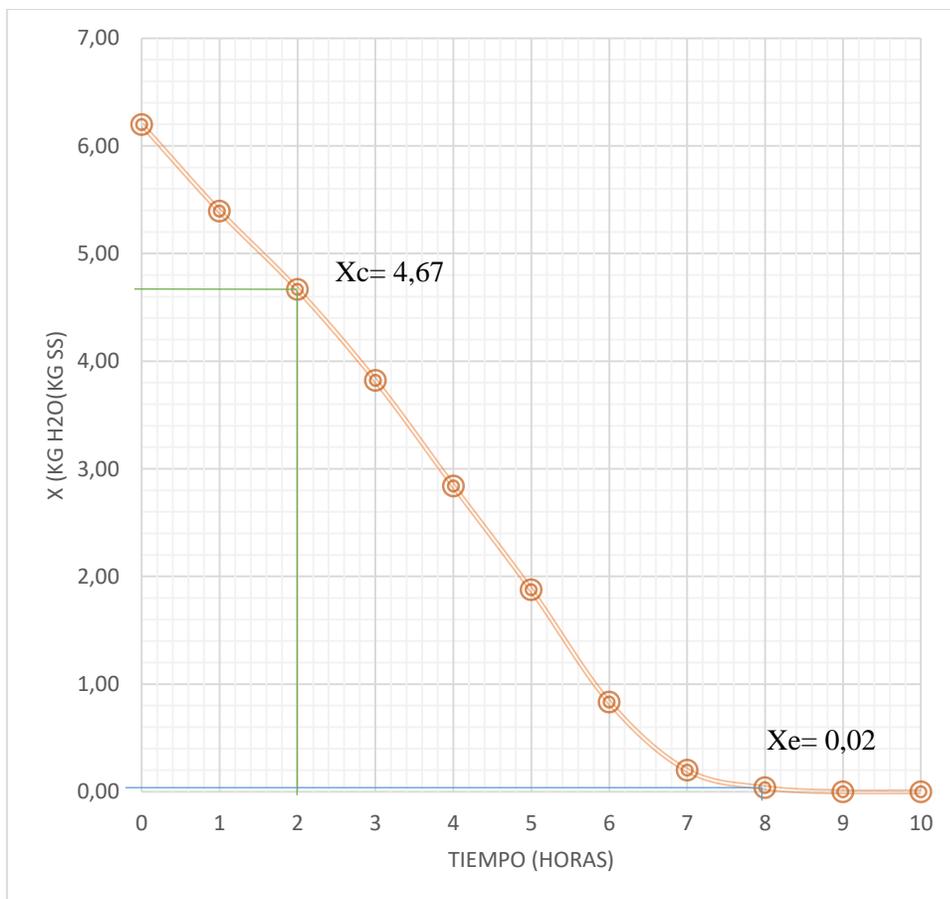


**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.4.3. Humedad Crítica y Humedad de equilibrio

Para los datos obtenidos previamente a un secado de 80 °C de temperatura se obtienen los siguientes datos.

**Gráfico 2-VI, Humedad Crítica y Humedad de Equilibrio**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.5. MOLIENDA

Luego de obtener la cáscara de banana seca se procedió a moler usando el molino de discos ya que debido al tamaño de las cáscaras de banana se optó por utilizar este equipo con la finalidad de triturar la materia prima ya seca.

Se colocó una bandeja debajo el molino para obtener las cáscaras de bananas de tamaño reducido.

Se calculó que para 500 gr de materia prima se necesitan aproximadamente 15 minutos.

*Fotografía 2-V, Molienda de la materia prima*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.6. TAMIZADO

La etapa final para la elaboración del medio filtrante a partir de la cáscara de banana es el tamizado la cual se llevó a cabo en el tamiz vibratorio con número de mallas de 0,5 m/m y 0,25 m/m.

Se realizaron 4 repeticiones de 15 minutos a 150 rpm para separar el tamaño del medio filtrante.

Se observó que el tamiz que más retuvo fue el de 0,25 m/m.

*Fotografía 2-VI, Tamizado de la materia prima*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.12.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN

Lo primero que se hizo es preparar las soluciones con metales pesados, se adquirió las soluciones madres de hierro y cobre, con concentraciones iniciales conocidas, del laboratorio del Centro Vitivinícola Tarija (CEVITA).

La concentración inicial de la solución madre de hierro es de 1 g/l, la cual se diluyó con agua destilada a una concentración de 0,1 g/l para trabajar con concentraciones pequeñas. (Consultar ANEXO D para el cálculo)

El mismo procedimiento se realizó para la solución madre de cobre, la cual tiene una concentración inicial de 0,1 g/l, se diluyó con agua destilada hasta llegar a una concentración final de 0,05 g/l para obtener una concentración menor. (Consultar ANEXO D para el cálculo)

Las pruebas de adsorción se realizaron de la siguiente manera:

- Para comprobar la efectividad del medio filtrante se añadieron 10 y 20 gramos de medio filtrante obtenido, de 0,25 y 0,5 m/m a las muestras de las soluciones de hierro y cobre, considerando las combinaciones del diseño factorial, que según el mismo se necesitan 4 muestras y 4 repeticiones.
- Se agitaron las 4 muestras con soluciones de hierro y 4 muestras de soluciones de cobre, todas con el medio filtrante añadido según las combinaciones del diseño factorial, alrededor de 20 segundos, posteriormente se dejaron 24 horas como tiempo de contacto del medio filtrante con cada una de las muestras de soluciones con metales pesados, ya que según bibliografía consultada en los antecedentes, es el tiempo recomendado, se realizó el mismo procedimiento con las 4 réplicas respectivamente para hierro y cobre.

- Se observó que el medio filtrante, al entrar en contacto con cada una de las 4 muestra y 4 réplicas, de hierro y cobre, pintó cada solución inicialmente transparente de una tonalidad café, de manera inmediata, como se puede apreciar en las siguientes fotografías.

- *Fotografía 2-VII, Pruebas de Adsorción para el Hierro*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

- *Fotografía 2-VIII, Pruebas de Adsorción para el Cobre*



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

- Concluido el tiempo de contacto en cada una de las pruebas de adsorción, la tonalidad café permaneció en cada una de las pruebas.
- El resultado del % de remoción de cada metal pesado demostrará la efectividad del medio filtrante.
- Cada prueba de adsorción realizada se mandó a analizar al laboratorio de la carrera de Ciencias Químicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en la ciudad de La Paz, el laboratorio realizó la filtración de las mismas, sin embargo, se sugiere que cada prueba de adsorción, pueda ser filtrada usando tamices con menor tamaño que las partículas del medio filtrante, en el caso de este proyecto deberá ser menor a 0,25 m/m.
- Los resultados de los análisis se detallan en el siguiente capítulo (Ver subtítulo 3.4 PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS), estos mostraron una mayor adsorción de hierro en la muestra 4 y réplica 4, de igual manera para el cobre se logró apreciar que la muestra 4 y réplica 4 lograron una mayor adsorción de dicho metal.
- Se pudo analizar, según los resultados de porcentaje de adsorción de cada prueba realizada y tomando en cuenta que la mejor muestra fue la número 4 y la mejor réplica también fue la número 4, tanto para la solución de hierro como para la solución de cobre, se puede determinar que, a mayor cantidad y mayor tamaño de partícula del medio filtrante, se obtiene un mayor porcentaje de remoción de metal pesado en soluciones.

### 2.13. BALANCE DE MATERIA

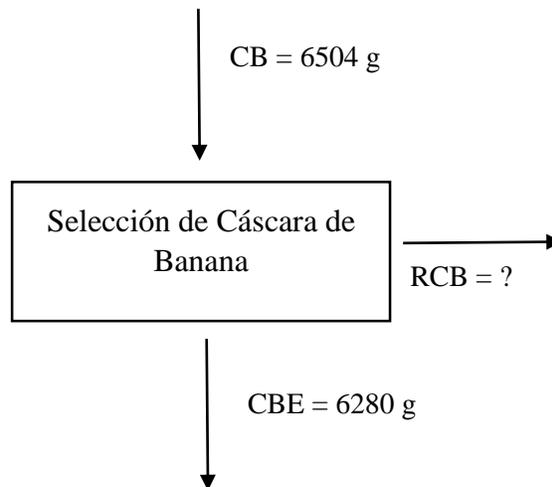
El balance de materia nos ayudará a conocer las corrientes del proceso, cantidades obtenidas durante el procedimiento

*Tabla 2-XIX, Abreviaciones de las corrientes*

<b>ABREVIACIÓN</b>	<b>DESCRIPCION</b>
CB	Cáscara de Banana
RCB	Residuos de Cáscara de Banana
CBE	Cáscara de Banana Escogida
CBL	Cáscara de Banana Lavada
CBS	Cáscara de Banana Seca
CBM	Cáscara de Banana Molida
PM	Pérdidas en Molienda
CBT	Cáscara de Banana Tamizada
RT	Retención en Tamices
T 0,5	Tamizado 0,5 m/m
T 0,25	Tamizado 0,25 m/m
AD	Agua Destilada
AR	Agua Residual
AH	Aire Húmedo

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

### 2.13.1. SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA



Base de Cálculo: 1000 gramos

Ecuación 2-VI, Balance Global para la selección de materia prima

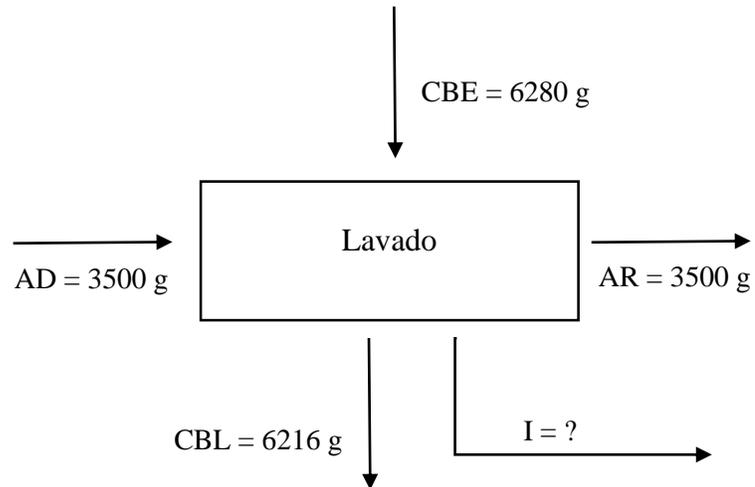
$$\mathbf{CB = CBE + RCB}$$

$$RCB = CB - CBE$$

$$6504 - 6280 = 224$$

$$RCB = 224 \text{ gramos}$$

### 2.13.2.LAVADO DE MATERIA PRIMA



Ecuación 2-VII, Balance Global para el lavado de la materia prima

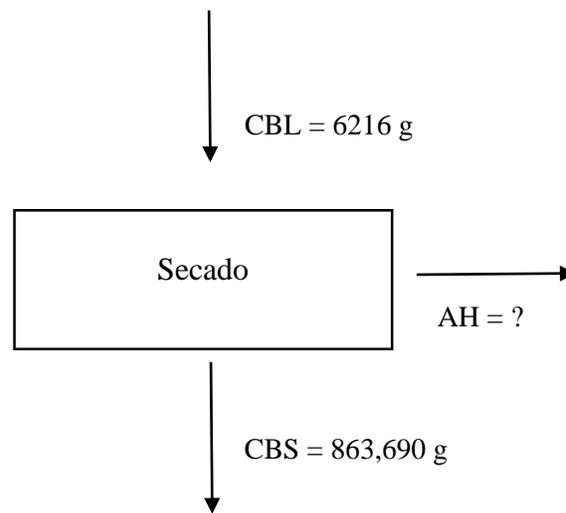
$$\mathbf{CBE + AD = CBL + AR + I}$$

$$I = CBE + AD - CBL - AR$$

$$I = 6280 + 3500 - 6216 - 3500$$

$$I = 64 \text{ gramos}$$

### 2.13.3. SECADO DE LA MATERIA PRIMA



Ecuación 2-VIII, Balance Global para el secado de la materia prima

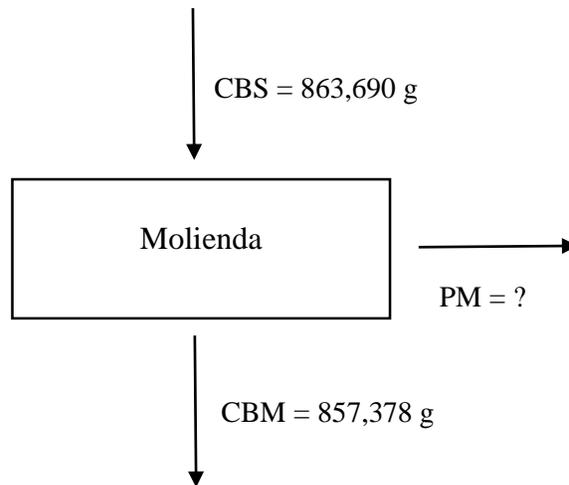
$$\mathbf{CBL = CBS + AH}$$

$$\mathbf{AH = CBL - CBS}$$

$$AH = 6216 - 863,690$$

$$AH = 5352,310 \text{ gramos}$$

#### 2.13.4. MOLIENDA DE LA MATERIA PRIMA



Ecuación 2-IX, Balance Global para la molienda de la materia prima

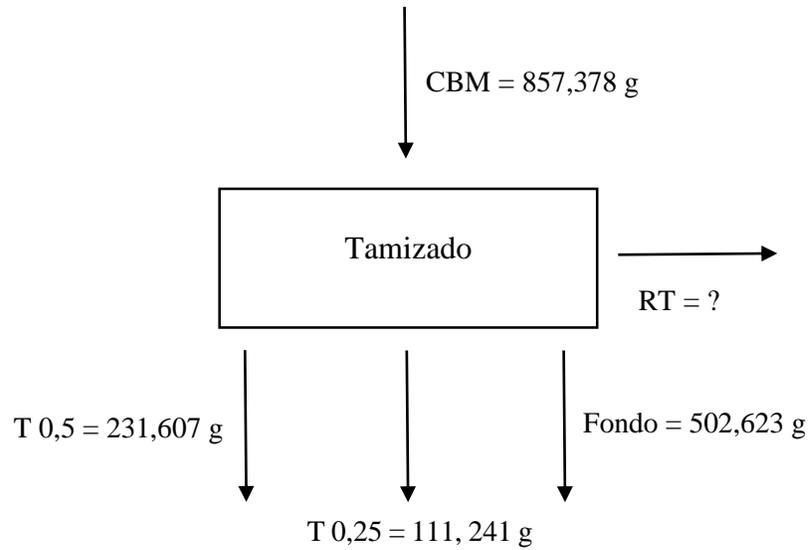
$$\mathbf{CBS = CBM + PM}$$

$$PM = CBS - CBM$$

$$PM = 863,690 - 857,378$$

$$PM = 6,312 \text{ gramos}$$

### 2.13.5. TAMIZADO DE LA MATERIA PRIMA



Ecuación 2-X, Balance Global para el tamizado de la materia prima

$$\mathbf{CBM = T\ 0,5 + T\ 0,25 + Fondo + RT}$$

$$RT = CBM - T\ 0,5 - T\ 0,25 - Fondo$$

$$RT = 857,378 - 231,607 - 111,241 - 506,623$$

$$RT = 7,907 \text{ gramos}$$

## 2.14. DATOS OBTENIDOS DEL BALANCE DE MATERIA

En la siguiente tabla podemos ver las cantidades de masa a la salida y entrada obtenidas en cada etapa del proceso para la obtención del medio filtrante.

*Tabla 2-XX, Tabla resumen de las corrientes obtenidas en el balance de materia*

<b>ETAPA</b>	<b>Masa de Entrada (gramos)</b>	<b>Masa de Salida (gramos)</b>
<i>Selección de la Materia Prima</i>	6504	6280
<i>Lavado</i>	6280	6216
<i>Secado</i>	6216	863,690
<i>Molienda</i>	863,690	857,378
<i>Tamizado</i>	857,378	845,470

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

## 2.15. BALANCE DE ENERGÍA

Para el balance de energía se debe tomar en cuenta las etapas que involucren un intercambio de energía.

Para calcular la energía consumida de cada equipo se hace uso del dato de la potencia, y como potencia es la cantidad de energía consumida por un equipo en unidad de tiempo obtenemos las siguientes ecuaciones.

**Ecuación 2-XI, Ecuación para calcular la potencia eléctrica**

$$P = V * I$$

Donde:

P: potencia eléctrica (W)

V: diferencia de potencial (V)

I: intensidad de la corriente (A)

**Ecuación 2-XII, Ecuación para calcular la energía eléctrica**

$$E = P * t$$

Donde:

E: energía eléctrica (W)

P: potencia eléctrica (W)

t: Tiempo de operación (horas)

Los datos necesarios para resolver las ecuaciones se obtendrán de las placas de especificaciones de los equipos utilizados.

### 2.15.1. SECADO DE MATERIA PRIMA

*Tabla 2-XXI, Datos para la estufa de secado*

<b>P estufa</b>	1,6 kW
<b>t op estufa</b>	10 h

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} * t_{\text{op estufa}}$$

$$E_{\text{estufa}} = 1,6 \text{ kW} * 10 \text{ h}$$

$$E_{\text{estufa}} = 16 \text{ kWh}$$

### 2.15.2. MOLIENDA DE LA MATERIA PRIMA

*Tabla 2-XXII, Datos para el molino de discos*

<b>P molino</b>	0,250 kW
<b>t op molino</b>	0,417 h

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

$$E_{\text{molino}} = P_{\text{molino}} * t_{\text{op molino}}$$

$$E_{\text{molino}} = 0,250 \text{ kW} * 0,417 \text{ h}$$

$$E_{\text{molino}} = 0,104 \text{ kWh}$$

### 2.15.3. TAMIZADO DE LA MATERIA PRIMA

*Tabla 2-XXIII, Datos para el tamizado*

<b>P tamiz</b>	0,92 kW
<b>t op tamiz</b>	1,25 h

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

$$E_{\text{tamiz}} = P_{\text{tamiz}} * t_{\text{op tamiz}}$$

$$E_{\text{tamiz}} = 0,92 \text{ kW} * 1,25 \text{ h}$$

$$E_{\text{tamiz}} = 1,15 \text{ kWh}$$

## 2.16. DATOS OBTENIDOS DEL BALANCE DE ENERGÍA

En la siguiente tabla podemos ver el flujo energético obtenido en cada equipo que consume energía eléctrica en ciertas etapas del proceso para la obtención del medio filtrante.

*Tabla 2-XXIV, Tabla resumen con el flujo energético obtenido en los equipos utilizados*

<b>ETAPA</b>	<b>Energía Eléctrica (kWh)</b>
<i>Estufa de Secado</i>	16
<i>Molino</i>	0,104
<i>Tamiz</i>	1,15

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

## 2.17. RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE UN MEDIO FILTRANTE A PARTIR DE CÁSCARA DE BANANA.

Para calcular el rendimiento del proceso de elaboración de un medio filtrante a partir de cáscara de banana usaremos la siguiente ecuación

**Ecuación 2-XIII, Ecuación para calcular el Rendimiento**

$$\% \text{ Rend} = \frac{\text{Masa Final de medio filtrante obtenido}}{\text{Masa Inicial de cáscara de banana}} * 100$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\% \text{ Rend} = \frac{857,378 \text{ gramos}}{6216 \text{ gramos}} * 100$$

$$\% \text{ Rend} = 13\%$$

El cual nos indica que del 100% de material prima, cáscara de banana, solo el 13% de esta se convierte en medio filtrante.

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE

A continuación, mediante la siguiente tabla se mostrarán las características físicas del medio filtrante obtenido.

*Tabla 3-I, Parámetros físicos del medio filtrante*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
<i>Olor</i>	Característico de la banana
<i>Color</i>	Café
<i>Estado</i>	Sólido
<i>Granulometría</i>	0,25 y 0,5 mm.
<i>Solubilidad en Agua</i>	Es soluble

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

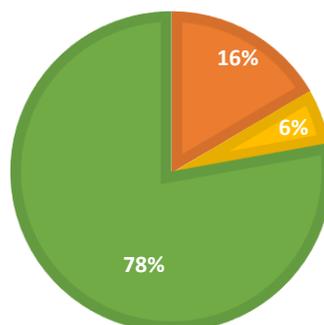
**Tabla 3-II, Características fisicoquímicas del medio filtrante**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>RESULTADOS</b>
<i>Ceniza</i>	13,34 %
<i>Humedad</i>	4,49 %
<i>Hidratos de Carbono</i>	62,72 %

**Fuente:** Resultados CEANID, 2021

**Gráfico 3-I, Características del medio filtrante**

■ Ceniza ■ Humedad ■ Hidratos de Carbono



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

Se puede apreciar que el mayor porcentaje presente en el medio filtrante es la presencia de hidratos de carbono, lo cual nos indica que los grupos funcionales existentes en la cáscara de banana permanecen aún en el medio filtrante posterior al proceso de elaboración del mismo.

### 3.2. DATOS ESTADÍSTICOS PARA LA ADSORCIÓN DE HIERRO

Se hizo uso del programa Minitab Statistical Software, que es un software estadístico que nos permite analizar una base de datos.

Para ello se hizo el análisis de varianza (ANOVA) con 8 datos tomando como variables independientes la concentración y tamaño de partícula del medio filtrante y como variable dependiente la interacción de ambas.

*Tabla 3-III, Análisis de Varianza (hierro)*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	3	490,500	163,500	50,31	0,001
Lineal	2	490,500	245,250	75,46	0,001
Concentración	1	450,000	450,000	138,46	0,000
Tamaño de partícula	1	40,500	40,500	12,46	0,024
Interacciones de 2 términos	1	0,000	0,000	0,00	1,000
Concentración*Tamaño de partícula	1	0,000	0,000	0,00	1,000
Error	4	13,000	3,250		
Total	8	503,500			

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

Como podemos apreciar la cola de significación ( $\rho$ ) para los factores de concentración y tamaño de partícula del medio filtrante, no superan el 0,05, por ende, podemos decir que las variables y la interacción entre ellas son significativos en el proceso de elaboración del medio filtrante.

La ecuación de regresión lineal nos servirá para poder ajustar los datos obtenidos a una línea recta, ya que La regresión lineal permite predecir el comportamiento de una variable dependiente a partir de otra independiente.

**Tabla 3-IV, Ecuación de regresión en unidades no codificadas (hierro)**

% Remoción de hierro	=	9,50 + 1,500 Concentración + 18,0 Tamaño de partícula + 0,00 Concentración*Tamaño de partícula
----------------------	---	--

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

A continuación, podemos ver el resumen del diseño factorial utilizado:

**Tabla 3-V, Resumen del diseño (hierro)**

Factores:	2	Diseño de la base:	2. 4
Corridas:	8	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

En la tabla de resumen del modelo que podemos apreciar debajo, observamos que los porcentajes superan el 89% de aceptación del modelo.

**Tabla 3-VI, Resumen de modelo (hierro)**

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1,80278	97,42%	95,48%	89,67%

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

### 3.3. DATOS ESTADÍSTICOS PARA LA ADSORCIÓN DE COBRE

Se hizo uso del programa Minitab Statistical Software, que es un software estadístico que nos permite analizar una base de datos.

Para ello se hizo el análisis de varianza (ANOVA) con 8 datos tomando como variables independientes la concentración y tamaño de partícula del medio filtrante y como variable dependiente la interacción de ambas.

*Tabla 3-VII, Análisis de Varianza (cobre)*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	3	355,774	118,591	49,22	0,001
Lineal	2	355,753	177,877	73,83	0,001
Concentración	1	285,008	285,008	118,30	0,000
Tamaño de partícula	1	70,746	70,746	29,36	0,006
Interacciones de 2 términos	1	0,021	0,021	0,01	0,930
Concentración*Tamaño de partícula	1	0,021	0,021	0,01	0,930
Error	4	9,637	2,409		
Total	8	365,411			

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

Como podemos apreciar la cola de significación ( $p$ ) para los factores de concentración y tamaño de partícula del medio filtrante, no superan el 0,05, por ende, podemos decir que las variables y la interacción entre ellas son significativos en el proceso de elaboración del medio filtrante.

La ecuación de regresión lineal nos servirá para poder ajustar los datos obtenidos a una línea recta, ya que La regresión lineal permite predecir el comportamiento de una variable dependiente a partir de otra independiente.

**Tabla 3-VIII, Ecuación de regresión en unidades no codificadas (cobre)**

% Remoción de Cobre	=	5,81 + 1,224 Concentración + 25,0 Tamaño de partícula - 0,082 Concentración*Tamaño de partícula
---------------------	---	---

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

A continuación, podemos ver el resumen del diseño factorial utilizado:

**Tabla 3-IX, Resumen del diseño (cobre)**

Factores:	2	Diseño de la base:	2. 4
Corridas:	8	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

En la tabla de resumen del modelo que podemos apreciar debajo, observamos que los porcentajes superan el 89% de aceptación del modelo.

**Tabla 3-X, Resumen de modelo (cobre)**

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1,55216	97,36%	95,38%	89,45%

**Fuente:** Resultados obtenidos en el software Minitab

### 3.4. PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos luego de las pruebas de adsorción de cada muestra y su repetición correspondiente.

*Tabla 3-XI, Resultados de adsorción del hierro*

N°	Tipo	Concentración Inicial de Hierro (g/l)	Concentración Final (g/l)	Porcentaje de Remoción (%)
1	Muestra	0,1	0,070	30
2			0,055	45
3			0,068	32
4			0,053	47
5	Répica		0,072	28
6			0,057	43
7			0,065	35
8			0,050	50

**Fuente:** Resultados del laboratorio de la UMSA, 2021

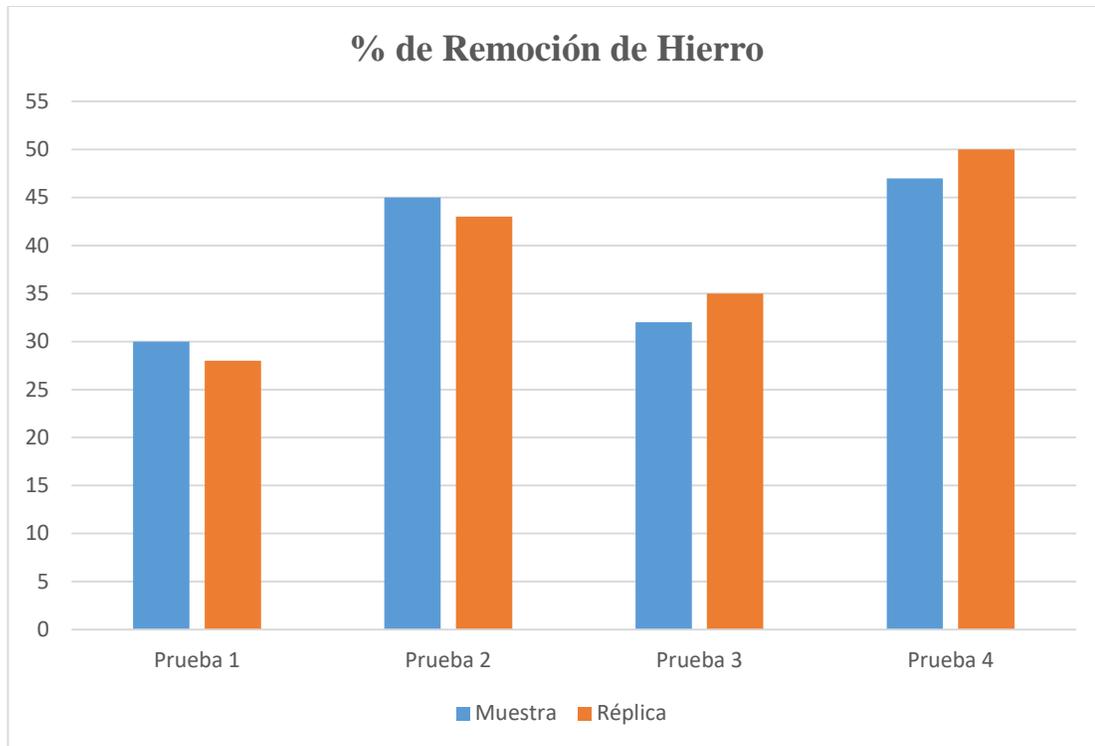
En la tabla veremos que del 1 al 4 son las primeras muestras y del 5 al 8 son las repeticiones, según los resultados obtenidos se puede ver que el porcentaje de remoción obtenido va de 28 hasta el 50%.

*Tabla 3-XII, Especificaciones de cada prueba de adsorción de Hierro*

N°	Tipo	Cantidad de medio filtrante (gramos)	Tamaño de partícula (m/m)	Porcentaje de Remoción (%)
1	Muestra	10	0,25	30
2		20	0,25	45
3		10	0,5	32
4		20	0,5	47
5	Réplica	10	0,25	28
6		20	0,25	43
7		10	0,5	35
8		20	0,5	50

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

En la tabla podemos ver qué cantidad de medio filtrante y tamaño fue utilizado en cada prueba de adsorción y cuanto fue el porcentaje de adsorción resultado de cada experimento, en el cual podemos observar que el mejor porcentaje de adsorción obtenido de las muestras fue 47% usando 20 gramos y 0,5 m/m del tamaño del medio filtrante, mientras que en las réplicas se obtuvo un 50 % de adsorción de igual manera con 20 gramos de medio filtrante y 0,5 m/m de tamaño de partícula.

**Gráfico 3-II, Porcentajes de adsorción de Hierro**

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

En la gráfica se puede apreciar la efectividad del medio filtrante para adsorción de hierro en un 50% con la réplica de la prueba 4, la cual usó 20 gramos de medio filtrante con 0,5 m/m de tamaño de partícula.

*Tabla 3-XIII, Resultados de adsorción del cobre*

N°	Tipo	Concentración Inicial de Cobre (g/l)	Concentración Final (g/l)	Porcentaje de Remoción (%)
1	Muestra	0,0534	0,0413	22,66
2			0,0340	36,33
3			0,0377	29,40
4			0,0302	43,45
5	Répica		0,0397	25,54
6			0,0342	35,95
7			0,0369	30,90
8			0,0318	40,52

**Fuente:** Resultados del laboratorio de la UMSA, 2021

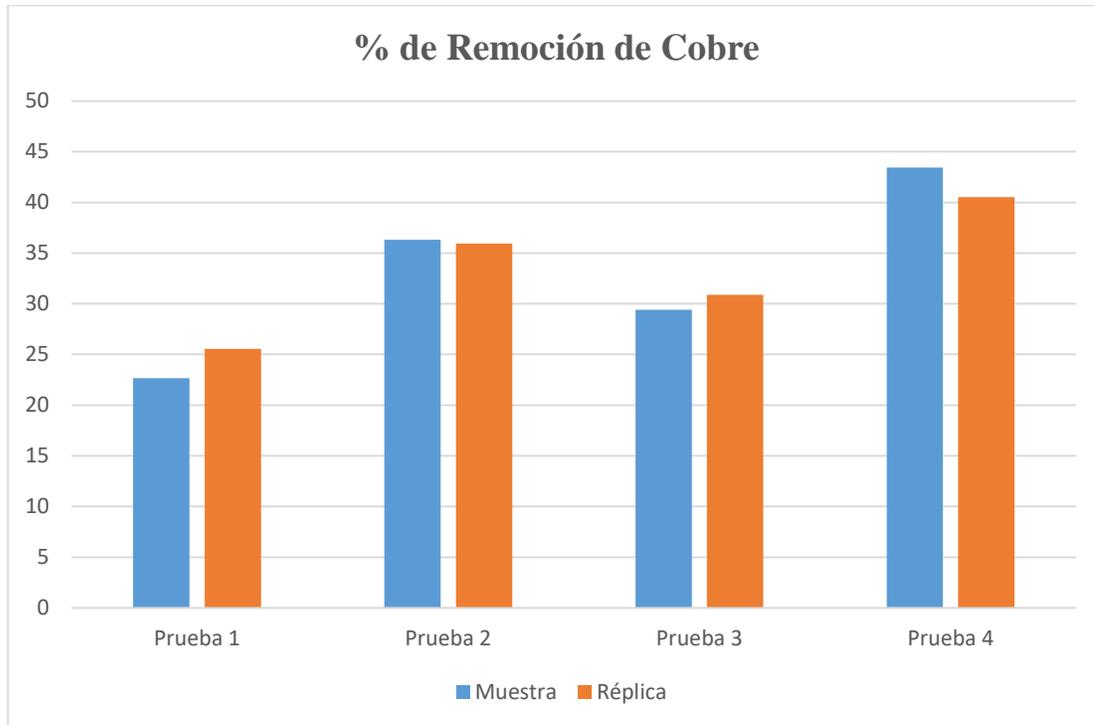
En la tabla veremos que del 1 al 4 son las primeras muestras y del 5 al 8 son las repeticiones, según los resultados obtenidos se puede ver que el porcentaje de remoción obtenido va de 22,66 hasta el 43,45%.

*Tabla 3-XIV, Especificaciones de cada prueba de adsorción de Cobre*

N°	Tipo	Cantidad de medio filtrante (gramos)	Tamaño de partícula (m/m)	Porcentaje de Remoción (%)
1	Muestra	10	0,25	22,66
2		20	0,25	36,33
3		10	0,5	29,40
4		20	0,5	43,45
5	Réplica	10	0,25	25,54
6		20	0,25	35,95
7		10	0,5	30,90
8		20	0,5	40,52

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

En la tabla anterior podemos ver qué cantidad de medio filtrante y tamaño fue utilizado en cada prueba de adsorción y cuanto fue el porcentaje de adsorción resultado de cada experimento, en el cual podemos observar que el mejor porcentaje de adsorción obtenido de las muestras fue 43,45% usando 20 gramos y 0,5 m/m de tamaño del medio filtrante, mientras que en las réplicas se obtuvo un 40,52 % de adsorción con 20 gramos de medio filtrante y 0,5 m/m tamaño.

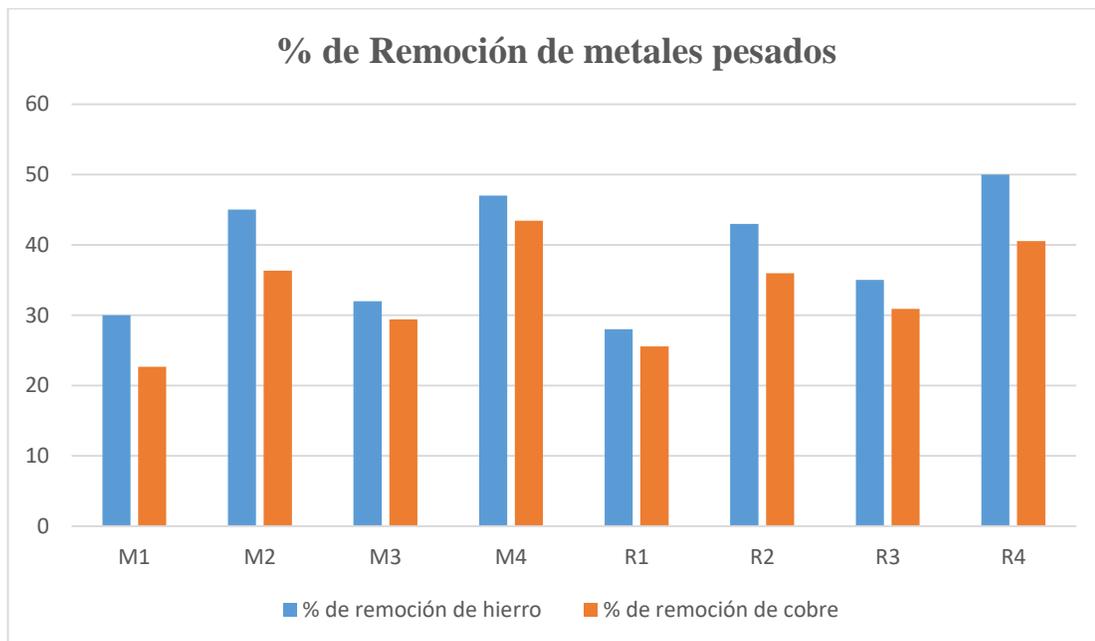
**Gráfico 3-III, Porcentajes de adsorción de Cobre**

**Fuente:** Elaboración propia, 2021

En la gráfica se puede apreciar la efectividad del medio filtrante para adsorción de cobre en un 43% con la muestra de la prueba 4, la cual usó 20 gramos de medio filtrante con 0,5 m/m de tamaño de partícula.

Los resultados del porcentaje de adsorción de los metales pesados hierro y cobre, los podemos observar de mejor manera en la siguiente gráfica.

**Gráfico 3-IV, Porcentaje de remoción de hierro en cada muestra**



**Fuente:** Elaboración propia, 2021

**CAPÍTULO IV**

**CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

Después del trabajo realizado “Elaboración de un Medio Filtrante a partir de la Cáscara de Banana para Eliminar Metales Pesados en una Muestra Patrón” y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. Se realizó la caracterización de la materia prima demostrando así que el principal componente existente es el agua, seguido de hidratos de carbono, los cuales, según bibliografía, son los que poseen cargas negativas capaces de adsorber metales pesados presentes en una muestra.
2. Se realizó la selección de tres operaciones unitarias básicas para el proceso de elaboración de un medio filtrante, a partir de la cáscara de banana, las cuales consistieron en secado, para eliminar la humedad de la materia prima, molienda, para reducir el tamaño de la materia prima y tamizado, para conocer el tamaño de las partículas de la materia prima, obteniendo de esta manera un medio filtrante para usarlo en las pruebas de adsorción.
3. Se elaboró el diseño experimental tomando en cuenta dos factores: la cantidad de medio filtrante en la muestra de metal pesado y el tamaño de partícula del medio filtrante, se tomó en cuenta dos niveles para cada factor, el resultado del diseño experimental fue un  $2^2$  dando como variable respuesta el % de adsorción de metal pesado, dato fundamental para comprobar la efectividad del mismo. El resultado de este diseño fueron 4 experimentos tanto para las pruebas de adsorción del hierro y del cobre, cada uno con sus 4 réplicas correspondientes.

4. El medio filtrante posee hidratos de carbono en su composición lo que hacen que sea efectivo para la adsorción de metales pesados por adsorción física, éste se obtuvo en estado sólido, tiene granulometría de 0,25 y 0,5 m/m, es de color café y al entrar en contacto con las soluciones de metales pesados le da una coloración de tonalidad café a la muestra.
5. Se comprobó que el medio filtrante a partir de cáscara de banana, tiene una efectividad de remoción de hierro de hasta un 50% y de cobre hasta 43,45% de remoción. Se concluye que a mayor cantidad de medio filtrante y mayor tamaño de partículas el porcentaje de remoción de metal pesado es mayor.
6. El rendimiento del proceso de obtención del medio filtrante fue del 13%, es decir, del 100% de materia prima solo el 13% se convierte en medio filtrante, debido a que el 87 % de la composición de la cáscara de banana es agua, por ende, se obtendrá menos materia prima utilizable para la elaboración del medio filtrante.

## 4.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando el tema, así también tomar en cuenta más parámetros que influyan en la adsorción, ya que el presente trabajo solo consideró el tamaño de partícula y cantidad de medio filtrante.

Se recomienda incursionar en la efectividad de este medio filtrante al realizar pruebas de adsorción de metales pesados en reiteradas ocasiones, en la misma muestra, para comprobar si logra un porcentaje mayor de remoción de metales pesados al estar en contacto “n” cantidad de veces con la misma solución y de esta manera alcanzar tal vez el 100% de adsorción.

Para futuras investigaciones se recomienda utilizar este medio filtrante con otros metales pesados y analizar cuál es su comportamiento frente a ellos.

Se sugiere evaluar la efectividad del medio filtrante en aguas residuales/industriales.

Otra recomendación es diseñar y elaborar filtros con este medio filtrante para así poder implementar esta tecnología a gran escala.