



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**REMOCIÓN DE COBRE DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL RIO
PUTINA POR EL MÉTODO DE ADSORCIÓN CON CARBÓN
ACTIVADO DE EUCALIPTO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. GRISSEL FIORELLA LAMA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada con mucho cariño y gratitud a Dios, quien supo guiarme por el buen camino, por concederme la vida, salud, sabiduría y humildad, también por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. Con todo el amor y cariño a mis padres a quienes admiro por el esfuerzo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado mis metas. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser mis padres. Al igual que a mi abuela (QEPD) por estar siempre, acompañándome y por su apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

Grissel Fiorella



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Universidad licenciada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (Resolución de Consejo Directivo N° 101-2017- SUNEDU/CD), por brindarme nuevos conocimientos, en especial a la Facultad de Ingeniería Química a todos y cada uno de los docentes por la formación académica y forjarme como profesional. En particular, dar las gracias a mi director de tesis M.Sc. Ciro Hernán Vera Alatrística, por su apoyo en el proceso de desarrollo de la tesis y en la investigación. Y a mis jurados Dr. Gregorio Palomino Cuela, Dr. Teófilo Donaires Flores, M.Sc. Rene Justo Quispe Flores, por el interés y atención que han puesto en el trabajo de investigación y también por sus apreciaciones constructivas y sugerencias aportadas.

Grissel Fiorella



INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

RESUMEN 9

ABSTRACT..... 10

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO GENERAL 12

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 14

2.2. MARCO TEÓRICO 18

2.2.1. Adsorción 18

2.2.2. Características de un adsorbente 19

2.2.3. Carbón activado 20

2.2.4. Clases de carbón activado 21

2.2.5. Estructura y propiedades del carbón activado..... 22

2.2.6. Composición física..... 23

2.2.7. Características físicas del carbón activado..... 23

2.2.8. Composición química del carbono..... 24

2.2.9. Influencia de la porosidad en la adsorción en fase gas y líquida 25



2.1.10. El cobre	26
2.2.11. Agitación magnética	31
2.2.12. Remoción de metales pesados.....	33

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	35
3.2. MATERIALES.....	36
3.2.1. Materia prima.....	36
3.2.2. Materiales y equipo.....	36
3.2.3. Reactivos.....	36
3.2.4. Equipos e instrumentos	37
3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	37
3.3.1. Definir las condiciones de utilización del carbón activado para la recuperación de cobre proveniente de las aguas residuales del rio Putina.....	37
3.3.2. Tecnología propuesta, dando a conocer los parámetros óptimos de ph, velocidad de mezclado, tiempo de adsorción.....	38
3.3.3. Modelo matemático del proceso de remoción de cobre por adsorción con carbón activado	42
3.3.4. Matriz del diseño.....	44

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL RIO PUTINA	46
4.1.1. Caracterización de las aguas del rio Putina con cobre	46



4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DE PH, VELOCIDAD DE MEZCLADO Y TIEMPO DE ADSORCIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE DE LAS AGUAS DEL RIO PUTINA.....	47
4.3. MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE COBRE POR ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO.....	49
4.4. DISCUSION	50
V. CONCLUSIONES.....	51
VI. RECOMENDACIONES	52
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXOS.....	56

ÁREA: Medio Ambiente

LÍNEA: Tecnología Ambiental y Recursos Naturales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 02 de agosto de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura de los grupos funcionales de oxígeno en la superficie de un carbón	25
Figura 2.	Agitador magnético	33
Figura 3.	Ciudad de Putina.....	35
Figura 4.	Mapa de ubicación de Putina.....	35
Figura 5.	Número de pruebas con el agitador magnético	40
Figura 6.	Diagrama de flujo del proceso de adsorción con agitación magnética.....	41
Figura 7.	Eficiencia de recuperación de Cu con carbón activado a diferentes pH ...	47
Figura 8.	Pareto estandarizado para Y	65
Figura 9.	Efectos principales para Y	65
Figura 10.	Contornos de superficie de la respuesta estimada	66
Figura 11.	Toma de muestras de agua del rio Putina cerca al puente	67
Figura 12.	Toma de muestras de agua del rio Putina	67
Figura 13.	Toma de muestras de agua del rio Putina	67
Figura 14.	Pesando 50 mg de carbón activado para cada vaso de precipitado	68
Figura 15.	Preparando las muestras con carbón activado	68
Figura 16.	Determinado el pH de cada una de las 8 muestras	68
Figura 17.	Determinando el pH.....	69
Figura 18.	Proceso de agitación magnética con agua del rio, con Cu.....	69
Figura 19.	Proceso de filtración con cada muestra del proceso de adsorción de Cu ..	69



INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características físicas del carbón	24
Tabla 2.	Composición química	24
Tabla 3.	Propiedades fundamentales del cobre	28
Tabla 4.	Formas de encontrar el cobre en la naturaleza.....	29
Tabla 5.	Características de las técnicas de tratamiento de metales pesados en agua .	34
Tabla 6.	Valores límite de las aguas destinadas a la des carga de efluentes líquidos en los ríos y lagos y análisis químico de las aguas del rio Putina	38
Tabla 7.	Análisis químico de las aguas del río Putina	41
Tabla 8.	Variables para el diseño factorial.....	43
Tabla 9.	% de rendimiento de recuperación de Cu	44
Tabla 10.	Matriz del diseño factorial	45
Tabla 11.	Resultado de las pruebas de recuperación de Cu en las muestras de aguas del rio Putina.....	46
Tabla 12.	Cobre recuperado de la muestra tratada.....	47
Tabla 13.	Variables óptimas para la recuperación de cobre de las aguas del rio Putina tratado con carbón activado	48
Tabla 14.	Matriz del diseño factorial $2^3=8$ de las aguas del rio Putina.....	58
Tabla 15.	Cobre recuperado de la muestra tratada con carbón activado.....	59
Tabla 16.	Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial	60
Tabla 17.	Efectos estimados para Y	62
Tabla 18.	Análisis de varianza para Y	63
Tabla 19.	Coefficiente de regresión para Y.....	64
Tabla 20.	Optimizar respuesta	64



RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue el estudio de la recuperación de cobre de las aguas del río Putina, Provincia de San Antonio de Putina, ubicada en el Departamento de Puno, mediante el proceso de adsorción con carbón activado, utilizando como equipo el agitador magnético. Se definieron las muestras tomadas en las aguas del río Putina en diferentes puntos, se recolectaron un total de 8 muestras en recipientes de polietileno con capacidad de 250 cm³, los cuales fueron conservados en refrigeración hasta su traslado al laboratorio. Las propiedades físicas y químicas de las aguas del río Putina fueron caracterizados y superan los límites máximos permisibles con 0,217 mg/L. después del proceso de agitación magnética con carbón activado se recuperó 0,05042 mg/L. La tecnología propuesta para el proceso experimental determinó el proceso de agitación magnética a diferentes velocidades desde 100 a 500 rpm, con pH de 3 a 5,82 con un tiempo que varía de 25 a 180 min, con el objeto de variar el pH se utilizó ácido nítrico (HNO₃) e hidróxido de sodio (NaOH), los mismos que sirvieron para bajar o subir el pH. El modelo matemático definió el coeficiente de correlación obtenido fue de $R^2 = 90,0268 \%$ para las aguas del río Putina, lo cual nos indica que el proceso de adsorción con carbón activad de eucalipto es adecuado.

Palabras claves: Adsorción, agitación magnética, carbón activado, cobre, metales pesados.



ABSTRACT

The objective of the present investigation was the study of the recovery of copper from the waters of the Putina River, Province of San Antonio de Putina, located in the Department of Puno, through the adsorption process with activated carbon, using the magnetic stirrer as equipment. . The samples taken in the waters of the Putina River at different points were defined, a total of 8 samples were collected in polyethylene containers with a capacity of 250 cm³, which were kept refrigerated until transferred to the laboratory. The physical and chemical properties of the waters of the Putina River were characterized and exceed the maximum permissible limits with 0.217 mg/L. after the magnetic stirring process with activated carbon, 0.05042 mg/L was recovered. The technology proposed for the experimental process determined the magnetic stirring process at different speeds from 100 to 500 rpm, with a pH of 3 to 5.82 with a time that varies from 25 to 180 min, in order to vary the pH was used nitric acid (HNO₃) and sodium hydroxide (NaOH), the same ones that served to lower or raise the pH. The mathematical model defined the correlation coefficient obtained was $R^2 = 90.0268\%$ for the waters of the Putina River, which indicates that the eucalyptus activated carbon adsorption process is adequate.

Keywords: Adsorption, magnetic agitation, activated carbon, copper, heavy metals



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El problema de la escasez de agua en cantidad y calidad es una preocupación mundial. Alrededor de 1 200 millones de personas todavía no tienen acceso al agua potable y 2 400 millones de personas todavía no tienen servicios sanitarios adecuados. Cada año mueren cerca de 2 millones de niños a causa de enfermedades ocasionadas por el agua.

La capacidad de absorción del carbón vegetal de eucalipto activado se debe a su estructura porosa altamente desarrollada, que les confiere una gran área específica y a la química de su superficie. Esta última, juega un rol importante en la adsorción de los contaminantes (Obregón 2012).

La actividad industrial y minera genera aguas residuales que contienen metales tóxicos como cobre, plomo, mercurio, cadmio, arsénico y cromo, todos muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de formas de vida. Las aguas residuales no tratadas derivadas de estas actividades llegan a los ríos y mares, contaminando tanto las aguas superficiales como las subterráneas y acumulándose en las plantas y otros tejidos orgánicos, de aquí que pese a ser útiles sea imprescindible controlar su producción como los residuos generados.

A pesar de que sea necesario controlar la producción y emisión al medio de todos los metales tóxicos, existe una cierta prioridad a la hora de eliminarlos o recuperarlos. Los metales pesados son sustancias tóxicas capaces de causar graves daños en los organismos vivos. Una de las principales propiedades de los metales pesados es que no son biodegradables y permanecen durante mucho tiempo en el entorno, circulando y



acumulándose en el medio y los seres vivos, por lo que es necesario evitar su incorporación al entorno a través de vertidos contaminados.

Entre los metales pesados de mayor riesgo a la salud de origen ambiental y ocupacional, se encuentran el plomo, el cromo, el cadmio, el cobre, el mercurio, arsénico el manganeso entre otros. Teniendo cada uno de ellos síntomas y signos de intoxicación de acuerdo a sus las características toxicológicas.

La presencia de metales pesados en aguas superficiales puede ser resultado de actividades mineras, tales como la descarga de relaves (Lara2007).

Esta última actividad es responsable tanto en forma indirecta como directa del incremento de los niveles de estos compuestos en el ambiente (Urteaga 2011). En general, los organismos vivos requieren cantidades trazas de algunos de estos elementos, pudiendo tener efectos perjudiciales si se encuentran en concentraciones excesivas.

El objetivo principal de este proyecto es la recuperación del cobre (Cu), de las aguas del río Putina, utilizando carbón activado de eucalipto, por el método de agitación magnética.

Los resultados obtenidos en dichos experimentos serán han sido comparados con estudios anteriores de remoción de cobre por coagulación y floculación, agitación magnética con el fin de estudiar si existen diferentes mecanismos para este proceso.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la remoción del cobre de las aguas residuales del río Putina por el método de adsorción con carbón activado de eucalipto.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las condiciones de utilización del carbón activado para la recuperación de cobre proveniente de las aguas residuales del río Putina.



- Determinar la tecnología propuesta, dando a conocer los parámetros óptimos de pH, velocidad de mezclado, tiempo de adsorción para la recuperación de cobre proveniente de las aguas residuales del río Putina.
- Determinar el modelo matemático del proceso de remoción de cobre por adsorción con carbón activado.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

(Garzón & Gonzales 2012), el carbón activo resulta ser excelente adsorbiendo metales pesados en las industrias contaminantes, alcanzando una remoción del Cr (VI) del 83,05% en tan sólo 60 minutos. A diferencia de la cáscara de naranja, el modelo de pseudo segundo orden se ajustó al mecanismo de adsorción del carbón, comprobándose así que el metal es adsorbido en dos sitios activos de la biomasa correspondiente. Con los datos de equilibrio, se pudo determinar que la isoterma que se adaptó al mecanismo fue la de Langmuir, considerando que desarrolla una máxima adsorción en monocapa.

(Ordoño 2020), la investigación tuvo los siguientes resultados: la caracterización de la zeolita acondicionada contiene 8,36% de $(K_{0,92}Na_{0,08})(AlSi_3)O_8$, componente similar a la zeolita clinoptilolita. La cantidad óptima del adsorbente es de 2g/L para el Cu (II) y As(V), el tiempo óptimo de adsorción fue de 30 minutos para el Cu(II) y 70 minutos para el As(V), y el pH óptimo, fue de 5,5 y 6,2 respectivamente. En las muestras de aguas residuales de mina, utilizando los valores óptimos se obtuvo una remoción del 99,36% de Cu (II) y 52,78% de As (V), concluye que, en aguas residuales de mina, la remoción obtenida para el Cu (II) y As (V), son menores a los (LMP) D.S. 031-2010. SA., y D.S. 004-2017. MINAM. concluye que, en aguas residuales de mina, la remoción obtenida para el Cu (II) y As (V), son menores a los (LMP) D.S. 031-2010. SA., y D.S. 004-2017. MINAM.



(Berrospi 2019), los metales totales antes de la aplicación de la dolomita superaban en gran parte el ECA-Categoría 4, con 25 g de dolomita, en el P-1 descendió mucho más el contenido de Plomo, Hierro, Cobre, Zinc, en 0,0006 mg/L, 0,3002 mg/L, 0,03452 mg/L, 8,1359 mg/L, respectivamente, para el caso del P-2 descendió el plomo, Hierro, Cobre, Zinc, en 0,0021mg/L, 0,2449 mg/L, 0,02479 mg/L, 6,7898 mg/L, respectivamente. Por lo tanto, la dosis de 25 g de dolomita es adecuado para 500 ml de aguas ácidas para cumplir los ECA -Categoría 4. Además, la dolomita ha demostrado ser eficiente alcanzando porcentajes de remoción de metales, con 25 g de dolomita, en P-1, 96,16% de plomo, 99,85% de Hierro, 99,32% de Cobre y 59,2% de Zinc, y en el caso de P2 el porcentaje de remoción fue de 99,68% de plomo, 99, 88% de hierro, 99,12% de Cobre y 66,05% de Zinc.

(Valladolid 2019), determinaron que el mayor porcentaje de remoción corresponde al efluente de 25 mg/L de Cu y que también es el que menor composición de cobre muestra en el efluente y que sin embargo el tiempo donde hay mejor remoción y menor composición de Cu en el efluente es a los 25 minutos aproximadamente, aproximadamente 71 % de remoción y una composición final de cobre de 7 mg/L. También podemos, indicar que la capacidad de adsorción con efluentes más contaminados, tienen el mismo patrón, pero su porcentaje de remoción no es el adecuado y esto debido a la mayor concentración de contaminante.

Podemos determinar que el mayor porcentaje de remoción corresponde al efluente de 25 mg/L de Cu y que también será el que menor composición de cobre muestra en el efluente y que sin embargo el tiempo donde hay mejor remoción y menor composición de Cu en el efluente es a los 25 minutos aproximadamente.



(Cortez 2017), determinó a nivel laboratorio la capacidad que tiene el micelio “*Pleurotus sajorcaju*” para remover cobre de aguas residuales de la industria galvánica. Para lo cual se reprodujo e inoculó la cepa del hongo en un medio de cultivo líquido de extracto de malta; luego de aproximadamente 15 días se filtró y separó el micelio. A un volumen determinado de agua residual con una concentración inicial de 1359 ppm de cobre determinada mediante espectroscopia UV-VIS; se añadió una cantidad constante de micelio. Las variables estudiadas fueron: el pH en niveles 2, 3, 4 y el tiempo de contacto en 30, 60, 90 minutos. Se mantuvieron constantes la velocidad de agitación a 100 rpm y la temperatura a 18°C. Se logró la mayor remoción de cobre de alrededor de 40% cuando se trabajó a pH 4 y tiempo de contacto de 90 minutos; en función de estas condiciones y variando la concentración de cobre del agua residual se obtuvieron los datos experimentales con los que se elaboraron las isotermas de bioadsorción.

(Condori 2011), preparó carbones activados a partir de astillas de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), especie muy abundante en el Valle del Mantaro (departamento de Junín, Perú) mediante activación química usando como agente activante al hidróxido de potasio (KOH). Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante adsorción de N₂ a -196°C y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Analizó la influencia de los siguientes parámetros de activación sobre las propiedades adsorbentes del carbón: razón [agente activante (g)/ precursor (g)], tiempo de contacto y pH. Se estudió la capacidad de adsorción de Pb (II) contenido en un efluente industrial del carbón activado que presentó mejores capacidades adsorptiva. Los carbones activados preparados presentaron altas áreas superficiales de hasta 650,7 m²/g, capacidad de adsorción de hasta 78 mg Pb/g carbón activo, el pH fue el parámetro que mayor influencia tuvo en la adsorción de plomo, se logró remover el 99,8% del Pb (II) y Zn contenido en las aguas residuales de la mina San Ignacio.



(Tapia *et al* 2015), ha obtenido gel de pectina en forma de perlas esféricas, al hacer gotear una solución al 4,0% de pectina, que se encuentra a un pH=3, 4, sobre una mezcla de alcohol al 96% con una solución 0,2 M de cloruro de calcio en la relación 1:1. El pH óptimo para la adsorción de los iones de Cu (II) se encuentra en el intervalo de 4,5 a 5. Los datos experimentales de la adsorción del Cu (II) por perlas de pectina se describen por el modelo de Langmuir. El valor de las constantes de la ecuación de Langmuir es: para la máxima capacidad de adsorción es $q_{max}=8,77$ mg/g y para la constante de Langmuir $b=0,027$. Del estudio de la cinética del proceso de adsorción se ha determinado que el equilibrio del proceso de adsorción se alcanza a los 250 min

(Gutiérrez *et al* 2005), aplicó el modelo de Thomas para la adsorción de cadmio y plomo en columna empacada con carbón activado. La cinética de adsorción nos muestra que el plomo tiene mayor afinidad por el carbón activo proveniente de la pirolisis de lodos residuales ya que presenta un punto de ruptura mayor plomo (80 min) que el mostrado por cadmio (4 min). Basados en los cálculos del modelo de Thomas se puede observar que el carbón activo proveniente de la pirolisis de lodos residuales presenta mayor afinidad por el plomo y esto es directamente proporcional a la velocidad de adsorción, representada por la constante K.

(Bustamante 2011), los resultados de la caracterización mostraron una mayor cantidad de grupos carboxílicos (2.2 mmol/g) cuando se modificaron con ácido cítrico 0,6 M en comparación con la modificación con ácido cítrico 0,1 M (0.47mmol/g). Además, las constantes de equilibrio de los grupos funcionales cuantificados corresponden a las reportadas para grupos carboxílicos del ácido cítrico. La capacidad de adsorción máxima de Pb (II) a pH 4 y de Cu (II) a pH 5, estimada con la isoterma de Langmuir, para los RC modificados con ácido cítrico 0,6 M fue 158,7 y 97,1 mg/g, respectivamente. En general, la capacidad de adsorción de Pb (II) y Cu (II) disminuye al



bajar el pH de la solución, ya que los protones y los cationes compiten por los mismos sitios de adsorción (grupos carboxílicos). Basado en los estudios de cinética de adsorción, se requieren 8 y 10 horas para alcanzar el equilibrio de adsorción de Cu (II) y Pb (II) respectivamente. Las pruebas de desorción demuestran la factibilidad de reutilizar el biosorbente. Los espectros de infrarrojo corroboran el aumento de la cantidad de grupos carboxílicos debido a la modificación química de los RC, siendo este grupo funcional el principal responsable del proceso de adsorción.

(Soto *et al* 2005), la alternativa para remover metales pesados de aguas residuales que genera la industria galvánica de la ciudad de Monterrey tales como el Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} , Cu^{+2} en cantidades que rebasan las normas, utilizó un equipo de jarras y como coagulantes el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeSO_4 , FeCl_3 , este último mostro el mejor nivel de remoción de los metales estudiados, así como una velocidad de sedimentación más rápida. También encontró una relación entre el nivel de remoción con el tamaño de los flóculos.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Adsorción

El método de adsorción es el mejor método de tratamiento de aguas residuales, debido a su naturaleza universal, económica, fácil operación en comparación con otras tecnologías. La capacidad de remoción de este método puede llegar a ser del 99,9%. Esta técnica consiste en la retención selectiva de uno o más componentes (adsorbatos) de un gas o un líquido en la superficie de un sólido poroso (adsorbente). Es un proceso dinámico, de forma que las moléculas de adsorbato están continuamente chocando con la superficie del sólido adsorbente, adsorbiéndose parte de ellas. En este equilibrio puede ocurrir que la concentración de adsorbato en la fase solida sea mayor que en la fase liquida o gaseosa, o viceversa. Esta propiedad es la que se aprovecha para el uso de adsorción como técnica de separación y purificación (Donoso M. 2015).

En el caso del tratamiento de agua, el proceso ocurre entre la interface del sólido adsorbente y el agua contaminada (Ali *et al.*, 2012) y puede ser considerada como una de las tecnologías más interesantes, puesto que diferentes materiales pueden ser usados como adsorbentes (Erto *et al.*, 2013).

La adsorción ha sido probada como una técnica efectiva por sus muchas ventajas, como su aplicabilidad sobre un amplio rango de concentración del material que se desea adsorber, remoción efectiva, eficiencia, bajo costo de instrumentos y la presencia de parámetros de tasas controlables. Además de que se puede utilizar para tratar aguas potables y residuales (Donoso M. 2015; Zhao *et al.*, 2012).

2.2.2. Características de un adsorbente

Para que un material pueda ser utilizado a escala industrial como adsorbente debe poseer las siguientes características (Donoso M. 2015):

- **Elevada capacidad de adsorción**, para que esta se realice con una menor cantidad de adsorbente, debido al costo económico. Esta característica está relacionada con la superficie y volumen de los poros que presenta el sólido.
- **Selectividad**, propiedad dependiente de la estructura y naturaleza química del sólido.
- **Propiedades mecánicas**, el adsorbente debe presentar gran resistencia mecánica y resistencia a la abrasión, para que no cambie su forma y tamaño durante los sucesivos ciclos de adsorción.
- **Mayor vida útil**, esta dependerá de la naturaleza del adsorbente, del sistema con el que se trabaja y el tipo de regeneración escogido.
- **Costo**, que deberá ser lo menor posible, ya sea que se considere utilizar uno sintético o uno de origen natural.



2.2.3. Carbón activado

El carbón activado es un material de carbón que se preparan en la industria, el objetivo es que tenga una elevada superficie interna y poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en disolución como en fase gaseosa. (Afenya P. 1991).

El carbón activado es una sustancia de amplio uso en la industria debido a que es un material con excelentes propiedades adsorbentes. Este material se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros, propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas. (Padrón, et al.2013)

Los carbones activados son materiales porosos con una gran área superficial interna, se usan en variedad de aplicaciones industriales como. la separación y purificación de líquidos y gases; así como, la eliminación de sustancias tóxicas, entre otras. (Henning & Schafer 1993).

Las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado son

- Elevada capacidad y baja selectividad de retención. La capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, la porosidad y distribución de tamaños de los poros juegan un papel importante. Los micro poros (tamaño inferior a 2 nm) le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mezo poros (tamaño comprendido entre 2-50 nm) y macro poros (tamaño >50 nm) son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y para favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido.



- Tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molécula (hidrocarburos, fenoles, colorantes etc.), mientras que sustancias polares como el nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente. Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y porosidad. En particular, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón.

Cuando la sustancia a eliminar tiene una polaridad apreciable, bajo volumen molecular y está muy diluida en aire, la retención a temperatura ambiente por el carbón solo es efectiva si se impregna con reactivos específicos o se aprovechan las propiedades catalíticas del carbón. De esta manera, tras la adsorción se producen unas reacciones químicas que transforman los productos tóxicos en inertes que se desorben o quedan retenidos en la porosidad del carbón. (Mohanty et al 2005).

2.2.4. Clases de carbón activado

2.2.4.1. Carbón activado granular

Este carbón activado es un tipo de carbón amorfo que se produce al calentar madera u otro material orgánico en ausencia de aire. Su estructura es micro porosa y esta característica lo hace absorber moléculas orgánicas tanto gaseosas como las disueltas en los líquidos.

En los procesos de purificación de las aguas sirven para eliminar las sustancias orgánicas disueltas que producen olor y color.



En el mercado existen dos tipos de carbón activado granular que son, los de lignito, que es sintético y producido de sustancias bituminosas; y las de coco, hechos a partir de la madera del árbol de coco. (Mohanty *et al* 2005).

2.2.4.2. Carbón activado pulverizado

El carbón activado pulverizado, se caracteriza por tener tamaños de gránulos comprendidos de 140 a 200 mallas ASTM, el tamaño no debe ser demasiado pequeño para no interferir en otras etapas del proceso, deben ser altamente porosos, relativamente blandos y deben poseer poros grandes. Los buenos carbones pulverizados son empleados como decolorantes debido a que estos carecen de estructura definida y en especial son usados en fase líquida. (Mohanty *et al* 2005).

2.2.5. Estructura y propiedades del carbón activado

El carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, encontrándose en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, colorantes en la industria textil, plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos. (Barreto2013).

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado:

- Elevada capacidad y
- Baja selectividad de retención.

Es un adsorbente “universal” por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retiene preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee. En general, los microporos le contienen la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son



necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido. (Rodríguez & Molina, 2012).

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y la porosidad. En particular, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En estos casos, la fijación del carbono de ``heteroátomos`` principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, etc., elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie de adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón. (Rodríguez & Molina 2012).

2.2.6. Composición física

El carbón activado posee una estructura microcristalina que es en gran medida similar a la del grafito. Esta estructura que presenta el carbono activado da razón a una distribución de poros de tamaños bien determinados. Así, se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: macroporos ($r > 25$ nm), mesoporos ($25 > r > 1$ nm) y microporos ($r < 1$ nm). (Perdomo 2015).

2.2.7. Características físicas del carbón activado

El carbón utilizado en este estudio fue fabricado por extrusión en forma de cilindros, el cual es de cáscaras de coco. En la Tabla N° 1 se presentan las propiedades físicas del carbón activado.

Tabla 1

Características físicas del carbón

Propiedad	Valor
Largo del cilindro (*)	5.6mm
Diámetro del cilindro (*)	3mm
Volumen de poros	0.43-0.47(cm ³ /grs.)
Superficie específica total	900-950(m ² /grs.)
Densidad real	1.104(grs./cm ³)
Mesoporos	3-5%
Microporos	95-97%

Fuente: Barreto, C. 2013.

(*) Valores promedio

2.2.8. Composición química del carbono

El carbón activado otorga un amplio rango de materiales que se diferencian particularmente en las dimensiones granulométricas y en su estructura interna (poros y superficie específica).

Tabla 2

Composición química

Componente	Porcentaje
Carbono	70-80 %
Cenizas	5-10 %
Oxígeno	60 %
Hidrógeno	0,5 %

Fuente: Perdomo 2015

Esta composición es prácticamente pura, al igual que lo es el grafito, el diamante y los diversos carbones minerales o de leña. (Perdomo 2015). Todos ellos tienen la propiedad de adsorber, la misma que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que se encuentran contenidas en un medio líquido o gaseoso. Los grupos

funcionales se forman durante el proceso de activación por interacción entre los radicales libres de la superficie del carbón que hacen que la superficie del carbón se haga químicamente reactiva y es la razón por la que afecta las propiedades adsorbentes, especialmente para moléculas de cierto carácter polar. Así, el carbón activado puede ser considerado en principio como hidrófobo, por su poca afinidad al agua, lo que es muy importante en aplicaciones de adsorción de gases en presencia de humedad, o de especies en disolución acuosa; pero las presencias de grupos funcionales en su superficie hacen que puedan reaccionar con el agua, haciendo que la superficie sea más hidrófila. Las oxidaciones de un carbón producen la formación de grupos hidroxilo (OH), carbonilo ($RCHO$), carboxilo ($RCOOH$), etc., que le dan al carbón un carácter anfótero, esto es, carácter ácido y básico, a la vez. Esto influye en la adsorción de moléculas. (Luna, et al 2007).

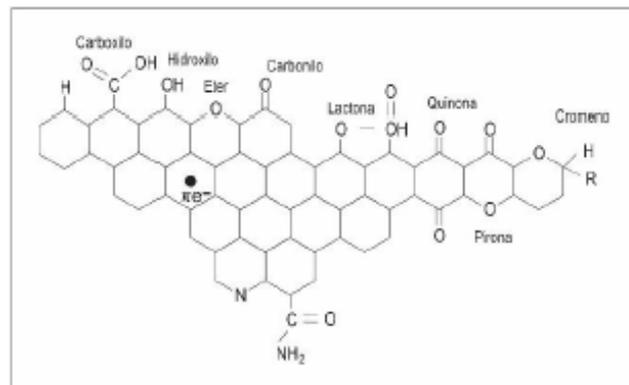


Figura 1. Estructura de los grupos funcionales de oxígeno en la superficie de un carbón

Fuente: Rodríguez 2007

2.2.9. Influencia de la porosidad en la adsorción en fase gas y líquida

Una forma simple de seleccionar un carbón activado para su uso en procesos de eliminación de gases apolares (p.e. hidrocarburos) o de sustancias disueltas (p.e. fenoles) es cuantificando su superficie. En general, una mayor superficie conlleva mayor capacidad de retención de contaminantes, y la forma de aumentarla es prolongando



el nivel o grado de activación (cuantificado a través del porcentaje de carbono perdido durante el proceso o porcentaje de quemado). (Rodríguez & Molina 2012)

2.2.9.1. Aplicaciones del carbón activado

- Tratamiento terciario de aguas residuales y tratamiento de aguas servidas.
- Tratamiento de agua en procesos industriales, como por ejemplo en la industria química,
- industria alimentaria y farmacéutica.
- Potabilización de aguas.
- Purificación de aire y gases.

La aplicación de carbón activado constituye un tratamiento terciario y tiene por propósito, obtener una calidad de efluente mejor que la conseguida en los tratamientos primarios y secundarios convencionales. Su aplicación se realiza en lechos empacados, tipo columnas, cargados con gránulos del material adsorbente (carbón activado) y se bombea, a través del filtro empacado, el efluente a tratar. A medida que el agua fluye a través de la columna, los químicos se adsorben a la superficie porosa de los gránulos. Cuando la superficie disponible del carbón activado se llena de químicos, se dice que el carbón está gastado. Este carbón gastado debe reemplazarse o limpiarse para permitir que el filtro se reutilice. La limpieza del carbón gastado comprende el calentamiento del carbón y el bombeo de aire limpio a través del mismo. El calor suelta los químicos del carbón, y el aire los expulsa de la columna. (Bansal & Goyal 2005).

2.1.10. El cobre

2.2.10.1. Propiedades del cobre

Elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus



propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos. Un metal comparativamente pesado, el cobre sólido puro, tiene una densidad de 8.96 g/cm^3 a 20°C . El cobre no es magnético; o más exactamente, es un poco paramagnético. Sus conductividades térmica y eléctrica son muy altas. Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo, resistente al desgaste y muy dúctil (Lenntech, 2017). En la tabla 3 se muestran las principales propiedades del cobre.

Tabla 3*Propiedades fundamentales del cobre*

Propiedad	Valor
Masa atómica	63,5 g/mol
Densidad	Densidad 89,6 Kg/m ³
Punto de fusión	1358 K
Punto de ebullición	3200 K
Conductividad eléctrica	58,1 * 10 ⁶ S/m
Aspecto	Metálico, rojizo
Estructura cristalina	Cúbica

Fuente: Lenntech, 2017

2.2.10.2. Cobre en la naturaleza.

El cobre se encuentra principalmente en forma de compuestos minerales en los que el isótopo ⁶³Cu constituye el 69,1% y el ⁶⁵Cu el 30,9% del elemento. El cobre está ampliamente distribuido en todos los continentes y forma parte de la mayoría de los organismos vivos. Aunque se han descubierto algunos depósitos naturales de cobre metálico, generalmente se extrae en forma de sulfuros, como es el caso de la covelita (CuS), la calcocita (Cu₂S), la calcopirita (CuFeS₂) y la bornita (Cu₃FeS₃); o de óxidos, como la malaquita (Cu₂CO₃(OH)₂); la crisocola (CuSiO₃ x 2H₂O) y la calcantita (CuSO₄ x 5H₂O). En la tabla 4 se muestra las principales formas en las que se encuentra al cobre en la naturaleza (Nordberg G. 1998)

Tabla 4*Formas de encontrar el cobre en la naturaleza*

	Forma Natural	Forma Antropocéntrica
Corteza terrestre	60 mg/Kg presencia media	Actividades mineras
Mar	2,5 * 10 ⁻⁴ mg/L	Residuos industriales Combustión de carbón
Actividades volcánicas		Desde productos hechos de cobre

Fuente: Nordberg G. 1998

2.2.10.3. Usos del cobre

El sulfato de cobre (II) es el compuesto de cobre de mayor importancia industrial, se utiliza como algicida en la depuración del agua, como conservante de la madera (fungicida natural), como agente espumante para la separación por flotación del mineral de sulfuro de zinc, como agente para el curtido del cuero y la conservación de pieles y como abono y pesticida en agricultura. Debido a sus propiedades de conducción eléctrica, más del 75% del cobre que se produce se usa en la industria eléctrica. La utilización puede ser empleando el metal puro o en aleaciones. El metal puro se destina principalmente en la fabricación de cableado eléctrico. Algunos de los principales usos de las aleaciones metálicas del cobre son: acuñación de monedas, bisutería, ampolletas y tubos fluorescentes, electroimanes, interruptores eléctricos y enchufes, fontanería, motores eléctricos, entre muchos otros. El cobre metálico también se utiliza como pigmento y como precipitante del selenio (Martín M. 2008; Nordberg G. 1998).

El óxido cúprico se utiliza como componente del fundente en la metalurgia del cobre, en los compuestos pirotécnicos, en los fundentes para la soldadura del bronce y en productos agrícolas, como insecticidas y fungicidas. El hidróxido cúprico se utiliza en la fabricación de los electrodos de baterías y para el tratamiento y la coloración del papel.



También se utiliza como pigmento, mordente para teñir textiles y como componente de fungicidas e insecticidas (Nordberg G. 1998).

Como se ha visto los usos comerciales del cobre, sus aleaciones y sus sales son muy variados, forma parte de componentes eléctricos, materiales de construcción, productos químicos y en diversos productos de uso cotidiano. Asimismo, puede utilizarse como aditivo alimentario y en fertilizantes. Como consecuencia de su gran variedad de aplicaciones, el cobre está presente en las corrientes residuales de numerosas empresas de diversos sectores productivos (Izquierdo M. 2010).

2.2.10.4. El cobre y salud humana

Los eventos de toxicidad aguda no suelen ser comunes, en diversos artículos se indica que las sales de cobre son tóxicas, en la práctica esto sólo es cierto cuando las disoluciones se utilizan de forma descontrolada, con fines suicidas o como tratamiento tópico de áreas con quemaduras graves. Cuando se ingiere sulfato de cobre en cantidades del orden de gramos, se producen náuseas, vómitos, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal; en raras ocasiones, se observan también convulsiones, coma y la muerte (Nordberg G. 1998). Por otra parte, (Bustamante E. 2011) indica que las sales de cobre producen irritaciones en la piel e incluso dermatitis, en los ojos provocan conjuntivitis y ulceraciones de la córnea, pero también agregando que raros son los casos en que la vida está en riesgo. Asimismo, aunque es un metal esencial para la vida, en dosis elevadas puede provocar anemia, irritación de estómago e intestino, daños renales y/o hepáticos.

La exposición crónica a este metal es peligrosa para personas que posean la rara enfermedad llamada enfermedad de Wilson (síntomas de la enfermedad: anemia, recuento bajo de glóbulos blancos y anillos de Kayser-Fleischer, que son anillos marrones alrededor de la córnea). Esta enfermedad impide la eliminación de cobre en el hígado



desbordándose a riñones, cerebro y ojos, pudiendo producir hepatitis, alteraciones renales, daños neurológicos e incluso la muerte, si no es diagnosticada y tratada adecuadamente (Martín M. 2008). La cantidad de cobre distribuida en los seres humanos va desde los 50-80 mg en promedio por persona, pueden llegar a observarse concentraciones hasta 10 veces superiores a lo normal. La inhalación de polvos, humos o nieblas de sales de cobre puede causar congestión nasal y de las mucosas y ulceración con perforación del tabique nasal. Los humos desprendidos durante el calentamiento del cobre metálico pueden producir fiebre, náuseas, dolor de estómago y diarrea (Bustamante E. 2011).

2.2.11. Agitación magnética

Usualmente el agitador magnético cuenta con un motor eléctrico que gira de forma tal que se pueda controlar las revoluciones por minuto (rpm). El equipo cuenta con un dispositivo electrónico microprocesado, que se encarga de controlar de forma fácil y eficiente las revoluciones del motor.

Este dispositivo se compone de una pequeña barra magnética o barra de agitación y una placa debajo de la cual se tiene un magneto rotatorio o una serie de electromagnetos dispuestos en forma circular a fin de crear un campo magnético rotatorio.

La barra magnética se sumerge en el recipiente contenedor de la solución a mezclar. Normalmente estas barras magnéticas se encuentran recubiertas de teflón, el cual es un material inerte y así se evita alterar la composición de la solución a mezclar.

Las barras magnéticas se encuentran disponibles en distintas medidas que se adaptan a distintos contenedores (vasos, matraces, etc.) así como agitadores magnéticos con distintas capacidades giratorias, que rondan desde las 100rpm hasta las 1500 o incluso más. Algunos modelos de agitadores no cuentan con piezas móviles (motor), lo que los



hace mucho más silenciosos. Ya que no presentan fricción y no cuentan con piezas móviles.

Este equipo se usa en laboratorios de biología y química usualmente. Es un instrumento que sirve para mezclar líquidos entre sí o con polvos, para producir soluciones, dispersiones fluidas o viscosas, así como suspensiones.

También se encuentran agitadores magnéticos con un sistema de calentamiento, lo cual lo hace mucho más versátil. Ya que puede agitar o mezclar soluciones y calentarlas al mismo tiempo. Adicionalmente que se puede usar únicamente como agitador o como plancha de calentamiento.

Los agitadores magnéticos son importantes para reducir el riesgo de contaminación ya que sólo entran en contacto con una barra magnética en la muestra y los componentes del instrumento son fáciles de limpiar.

Si desea continuar con el procedimiento de diálisis de proteínas, debe realizar este proceso en una muestra y se colocará en el agitador magnético durante un período más prolongado. Varios laboratorios eligen un proceso de mezcla durante la noche para utilizar su valioso tiempo de una mejor manera y esto sería imposible de hacer si se emplea un agitador manual.



Figura 2. Agitador magnético

2.2.12. Remoción de metales pesados

Las técnicas nombradas en la Tabla 5 son las principales para la eliminación de iones metálicos en aguas. La selección del tratamiento de aguas contaminadas en general y con metales en particular, debe realizarse teniendo en cuenta la composición de la corriente a tratar, el rendimiento global de la operación, los límites de vertido, la flexibilidad y fiabilidad del tratamiento y su impacto ambiental. Asimismo, deben contemplarse los parámetros económicos como la inversión inicial y los costes de operación (Izquierdo M. 2010).



Tabla 5

Características de las técnicas de tratamiento de metales pesados en agua

Técnica	Cambio de pH	Selectividad	Influencia de Sólidos suspendidos	Tolerancia a Moléculas Orgánicas
Precipitación química como hidróxido	Tolerante	No selectiva	Escasa	Moderada
Oxido-reducción	Tolerancia limitada	Moderada	Escasa	Moderada
Intercambio Iónico	Tolerancia limitada	selectiva	Importante	Moderada
Tratamientos electroquímicos	Tolerante	Moderada	Según el diseño	Puede adaptarse
Procesos de membrana	Tolerancia limitada	Moderada	Importante	Escasa
Extracción con solventes	Algunos sistemas son tolerantes	Selectiva	Importante	Escasa
Adsorción con carbón activado	Tolerancia limitada	Moderada	Importante	Moderada
Bioadsorción	Tolerancia limitada	Moderada	Importante	Moderada

Fuente: Izquierdo M. 2010

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El Distrito de Putina, es uno de los cinco distritos que conforman la Provincia de San Antonio de Putina, ubicada en el Departamento de Puno, se encuentra ubicada al nor-este del lago Titicaca a 3 825 m.s.n.m.; su posición geográfica es $14^{\circ}54'50''\text{S}$ $69^{\circ}52'25''\text{O}$ / -14.91388889, -69.87361111 y su población total es de 20 792 habitantes.

La muestra contaminada con cobre se tomó del río Putina de la ciudad de Putina.

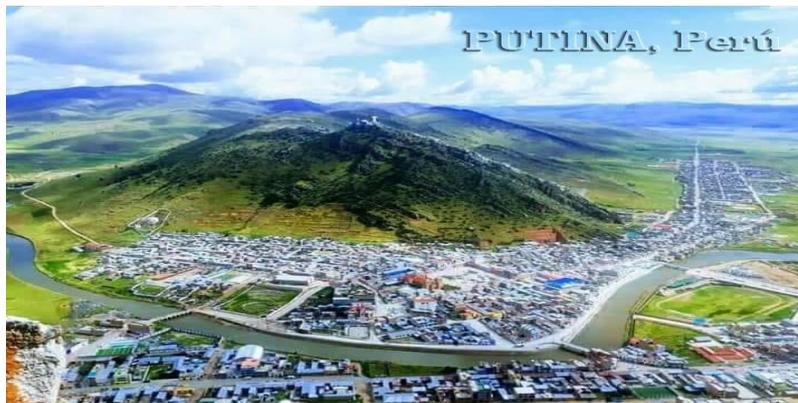


Figura 3. Ciudad de Putina



Figura 4. Mapa de ubicación de Putina

El trabajo de recuperación de cobre de las aguas del río Putina se ejecutó en el Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno.



Ubicación:

Provincia: Puno

Departamento : Puno

Dirección : Av. Sesquicentenario N° 1150

Los análisis se realizaron en los Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.)-ciudad de Juliaca

3.2. MATERIALES

3.2.1. Materia prima

Aguas del río Putina de la ciudad de Putina, aguas contaminadas con metales pesados con cobre.

3.2.2. Materiales y equipo

- Probetas de 100 y 50 ml.
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml.
- Embudo de vidrio.
- Vasos de precipitados.
- Tubos de ensayo.
- Embudos
- Papel filtro Whatman N° 42.
- Bureta
- Mortero de Ágata
- Pipetas de 50, 20 y 5 ml.

3.2.3. Reactivos

- Carbón activado (adsorbente).
- NaOH (0,05M)



- HNO_3 (0,1M)
- H_2O destilada

3.2.4. Equipos e instrumentos

- pHmetro digital de calibración marca HANNA INSTRUMENTS, HI 9321 MICROPROCESADOR, sensibilidad 0.1
- Agitador magnético STIRRER TYPE OP-9/2/3
- Balanza analítica.
- Termómetro.
- Espectrofotómetro de adsorción atómica PERKIN ELMER FTIR 1600

3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1. Definir las condiciones de utilización del carbón activado para la recuperación de cobre proveniente de las aguas residuales del río Putina

3.3.1.1. Técnicas de muestreo

Las muestras fueron tomadas en las aguas del río Putina en diferentes puntos, se recolectaron un total de 8 muestras en recipientes de polietileno con capacidad de 250 cm^3 , los cuales fueron conservados en refrigeración hasta su traslado al laboratorio.

3.3.1.2. Caracterización física y química de las aguas del río Putina contaminado con Cobre

Las propiedades físicas y químicas de las aguas del río Putina fueron caracterizados a través del análisis químico, se determinó las cantidades de Cu de acuerdo a la Ley General de Aguas D.L. N° 17752 y sus modificaciones al reglamento según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM. (anexo A₁)

La cantidad de cobre supera los límites máximos permisibles de acuerdo al análisis químico efectuados de las aguas del río Putina.

Tabla 6

Valores límite de las aguas destinadas a la des carga de efluentes líquidos en los ríos y lagos y análisis químico de las aguas del río Putina

Metal	Valor límite de agua de descarga en lagunas y lagos D.S. 004-2017- MINAM	Concentración Promedio de 8 muestras de Cu en el río Putina
Cu	Max. 0,1 mg/L	0,217 mg/L

Fuente: Informe de ensayo-Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.)

3.3.2. Tecnología propuesta, dando a conocer los parámetros óptimos de ph, velocidad de mezclado, tiempo de adsorción

3.3.2.1. Proceso experimental para determinar la cantidad de cobre adsorbido con carbón activado de eucalipto

- Preparación de la muestra: en un vaso de 200 mL se vierten 150 mL de la muestra a tratar. A continuación, se añade la dosis correspondiente de carbón activado y se determina el pH hasta el valor seleccionado mediante la adición de hidróxido de calcio o ácido nítrico según sea el pH adecuado.
- Adsorción: se coloca el vaso en el equipo de agitación magnética a diferentes velocidades desde 100 a 500 rpm a la temperatura ambiente durante 25 a 180 minutos, para determinar el tiempo de equilibrio.
- Sedimentación: se deja reposar el contenido de cada vaso de precipitado durante 15 minutos, para luego filtrarlos.

3.3.2.2. Método de agitación magnética

Los ensayos de adsorción de cobre se llevaron a cabo por el proceso de



agitación magnética, de acuerdo a los siguientes parámetros:

1. Se prepararon ocho muestras de 150 mL con el agua a analizar del río Putina que contienen cobre, en 8 vasos de precipitados con agitación magnética. Se ajustó del pH, para provocar un desplazamiento del equilibrio químico que no favorezca la solubilidad. El pH para la precipitación del cobre a un inicio fue de 3 y para la parte experimenta se fue variando de a 5,69.
- Para la evaluación de la concentración de Cu, se tomó 150 mL de soluciones estándar y se pusieron en contacto con 50 mg de carbón activado de eucalipto (adquirido en Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C. , siendo su principal cualidad es que es de los combustibles más abundantes, lo que lo hace menos costoso comparado con otras fuentes de energía, es abundante en todo el mundo y económico en comparación con otras fuentes de energía, como el petróleo y el gas natural) en frascos de Erlenmeyer de 250 mL con agitación de 100 a 500 rpm y a pH de 3,3 a 5,69 como se muestra en la figura, por un tiempo de 25 minutos para la primera experiencia, luego se fue variando el tiempo hasta 180 minutos para la última prueba con agitación magnética a temperatura constante. Al cabo de este tiempo, la solución fue filtrada con papel filtro Waltman N°40. Las concentraciones finales de cobre en las aguas del río Putina, se determinaron por absorción atómica.

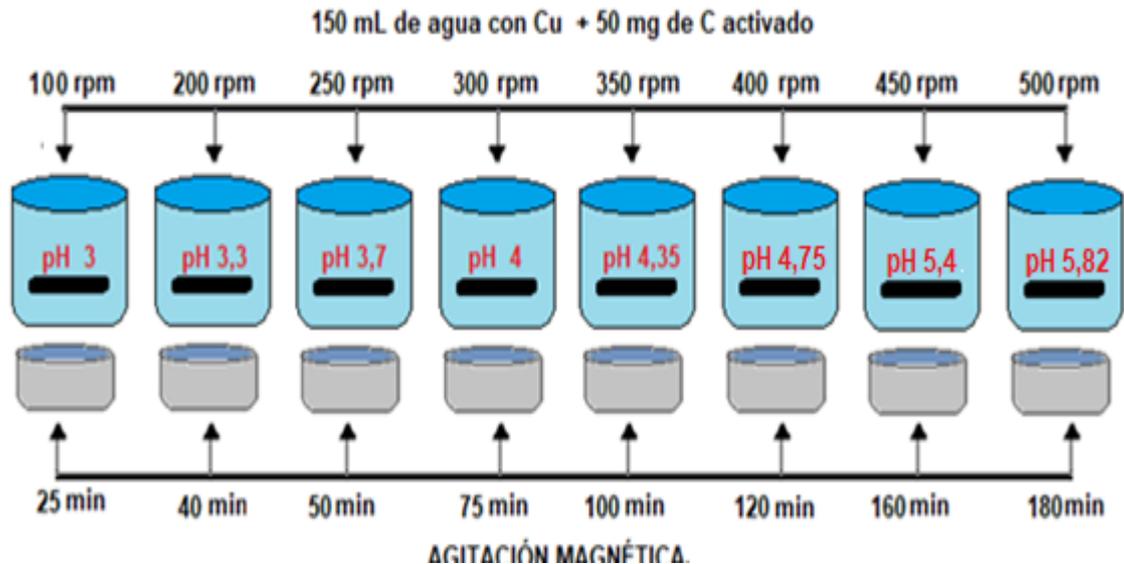


Figura 5. Número de pruebas con el agitador magnético

2. El estudio del efecto del pH sobre la remoción de cobre se realizó variando el valor del pH de la solución inicial en el rango de 3 – 5,69. Para ajustar al pH inicial deseado, se utilizaron soluciones de NaOH y HNO₃ 0,1 M según fuera conveniente, la masa de carbón activado utilizado fue de 50 mg
3. Se introdujo el carbón activado al interior de cada vaso de precipitado e inmediatamente se comienza a agitar la solución-carbón activado a una velocidad de 100 a 500 rpm, durante el transcurso de cada experiencia se tomaron muestras a tiempos prefijados. Los tiempos de muestreo fueron, 25; 40; 50; 75; 100; 120; 160; 180 min. Finalizado el tiempo de agitación, se desconectó el agitador.
La solución se filtró y la solución se guardó en recipientes tapados para su posterior análisis.

Tabla 7

Análisis químico de las aguas del río Putina

Concentración Cu (mg/L) D.S. 004-201 MINAM	Concentración Promedio 8 muestras Rio Putina (mg/L)	pH	Velocidad de mezcla (rpm)	Tiempo (min)	Cantidad carbón activado (mg)
0,1	0,217	3,0	100	25	50
0,1	0,217	3,3	200	40	50
0,1	0,217	3,70	250	50	50
0,1	0,217	4,0	300	75	50
0,1	0,217	4,35	350	100	50
0,1	0,217	4,75	400	120	50
0,1	0,217	5,4	450	160	50
0,1	0,217	5,82	500	180	50

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA AGITACION MAGNETICA

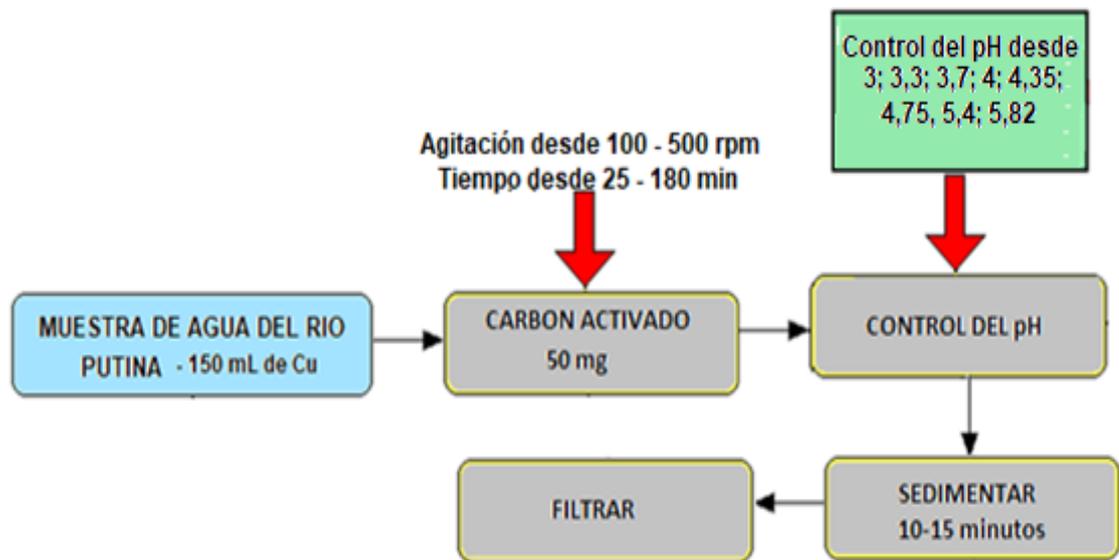


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de adsorción con agitación magnética



3.3.3. Modelo matemático del proceso de remoción de cobre por adsorción con carbón activado

3.3.3.1. Desarrollo del modelo matemático

Se basa en el diseño factorial de Kafarov, es una técnica de análisis estadístico que nos permitirá planificar y estimar adecuadamente los factores investigados, se utilizará el programa estadístico Statgraphics Centurión XVI.

El diseño factorial de experimentos constituye un caso especial de regresión múltiple, en el que la obtención de la inversa de la matriz de regresión es sencilla, siempre y cuando los experimentos cumplan la condición de ortogonalidad. El diseño factorial se basa en generar datos ortogonales.

$$N = 2^k$$

Donde:

N = Número total de experimentos

k = Número de variables

En nuestro caso, como hemos mencionado, se realiza un experimento que depende de tres factores y se plantea dos niveles, por lo que se requerirán:

Número de experimentos = $N = 2^3 = 8$ experimentos

Cuya resolución será la siguiente:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_2^2 + B_5X_2^2 + B_6X_2^2 + B_7X_1X_2 + B_8X_1X_3 + B_9X_2$$

X_3

Donde:

Y = Variable respuesta rendimiento

X_1 , X_2 y X_3 = Variables codificadas de entrada: pH, velocidad de mezclado y tiempo de adsorción.



X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 y $X_1X_2X_3$ = Interacciones entre las tres variables principales

Primero hallaremos los valores de X_1 , X_2 y X_3 en función a las variables de entrada del proceso y luego los valores de b_0 , b_1 , b_2 , b_3, \dots, b_7 (estimadores de los coeficientes de regresión) en función a la variable respuesta Rendimiento (Y).

- **Identificación de las variables de trabajo**

El modelo factorial propuesto predice adecuadamente todos los puntos de diseño, por lo cual elegimos 3 variables que según muestras pruebas exploratorias intervienen y mejoran la adsorción de iones cobre con carbón activado. Estas variables son: pH, velocidad de mezclado y tiempo de adsorción.

Se realizaron pruebas preliminares para determinar los niveles de cada variable, las que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8
Variables para el diseño factorial

SIMBOLO	NOMBRE DE LAS VARIABLES	UNIDAD	X mín. (-)	X máx. (+)
X_1	• pH	• Escalar	3	5,82
X_2	• Velocidad de mezcla	• rpm	100	500
X_3	• Tiempo de adsorción	• Minutos	25	180

3.3.3.2. Rendimiento de adsorción de cobre por agitación magnética

La variable respuesta del diseño factorial se cuantifica en el porcentaje de rendimiento de cobre (ver resultados en anexo A₃), el cual se determinó de la siguiente manera:

$$\% \text{ RENDIMIENTO} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Dónde:

%R = Rendimiento de Cu

W₁ = Peso inicial de Cu

W₂ = Peso de Cu recuperado

Tabla 9

% de rendimiento de recuperación de Cu

Nº de prueba	W ₁ (mg)	W ₂ (mg)	Rendimiento (%) (Y)
1	0,217	0,05052	76,7188
2	0,217	0,05065	76,6589
3	0,217	0,05042	76,7649
4	0,217	0,05078	76,5990
5	0,217	0,05063	76,6682
6	0,217	0,05099	76,50223
7	0,217	0,05077	76,6036
8	0,217	0,05113	76,4377

El diseño tiene 8 combinaciones de acuerdo a las tres variables con las que se trabajó, se muestra a continuación la matriz de nuestro diseño.

3.3.4. Matriz del diseño

De acuerdo a los datos obtenidos en las tablas 9 y 10, se combinó los valores mínimos y máximo para nuestro diseño que es de $N=2^k=2^3= 8$ pruebas experimentales



Tabla 10

Matriz del diseño factorial

N° de pruebas	DISEÑO	COMBINACIÓN DE NIVELES			Rendimiento (Y)
		pH (X1)	Velocidad de mezcla (X2)	Tiempo de Adsorción (X3)	Variable respuesta (%)
1	[1]	3,00	100	25	76,7188
2	A	5,82	100	25	76,6589
3	B	3,00	500	25	76,7649
4	Ab	5,82	500	25	76,5990
5	C	3,00	100	180	76,6682
6	Ac	5,82	100	180	76,5023
7	Bc	3,00	500	180	76,6036
8	abc	5,82	500	180	76,4377



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL RIO PUTINA

4.1.1. Caracterización de las aguas del rio Putina con cobre

La caracterización se llevó a cabo a través del análisis físico químico de las aguas del rio Putina, Provincia de San Antonio de Putina, Departamento de Puno. Los análisis de las 8 muestras fueron realizados en los laboratorios en los Laboratorios RHLAB S.A.C.-RH-M83-0417 de la ciudad de Juliaca.

Tabla 11

Resultado de las pruebas de recuperación de Cu en las muestras de aguas del rio Putina

Parámetro (mg/L)	Aguas del rio Putina		% promedio de remoción
	Valor inicial, promedio de 8 muestras	Valor final promedio de 8 muestras	
Cobre	0,217 mg/L	0,05073 mg/L	76,6192 %

Fuente: Laboratorio RHLAB S.A.C.-RH-M83-0417-Juliaca

La tabla 11 indica los valores iniciales promedio de las muestras tomadas en las aguas del rio Putina, así como valores promedio del agua tratada con carbón activado y el porcentaje promedio de la remoción de cobre.

Tabla 12

Cobre recuperado de la muestra tratada

Nº de muestras	pH	Concentración de recuperación de Cu	Rendimiento de Cu de las aguas del rio Putina (%)
1	3,0	0,05052	76,7188
2	3,3	0,05065	76,6589
3	3,70	0,05042	76,7649
4	4,0	0,05078	76,5990
5	4,35	0,05063	76,6682
6	4,75	0,05099	76,5023
7	5,40	0,05077	76,6036
8	5,82	0,05113	76,4377

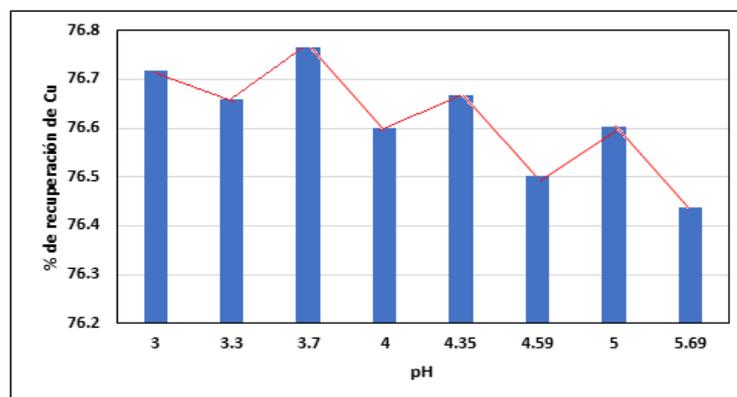


Figura 7. Eficiencia de recuperación de Cu con carbón activado a diferentes pH

La figura 7 muestra que la mayor concentración de cobre recuperado por el proceso de agitación magnética, utilizando carbón activado se efectuó a un pH de 3,7 que corresponde a un porcentaje de recuperación de 76,7649.

4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DE PH, VELOCIDAD DE MEZCLADO Y TIEMPO DE ADSORCIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE DE LAS AGUAS DEL RIO PUTINA

El proceso de adsorción por agitación magnética con carbón activado depende de las características físico-químicas del Cu, especialmente del pH.

El pH junto a la velocidad de agitación y al tiempo de agitación, son los factores que más influyen en el proceso de adsorción. Su influencia es determinante ya que afecta a todos los equilibrios de hidrólisis que se producen, como consecuencia de la adición de catión metálico.

Otra de las causas por las que el pH es tan determinante en el proceso, es que la adición del catión metálico provoca un aumento automático del pH, tanto más alta sea la dosis del coagulante, y en mayor sea la alcalinidad del agua.

Con objeto de establecer la influencia que el pH ejerce en el proceso de adsorción del cobre de las aguas del río Putina, se efectuó el modelo matemático por experimentación y estadística, con un pH que varía de 3 a 5,82; la velocidad de agitación de 100 a 500 rpm y el tiempo de adsorción de 25 a 180 min, según el cuadro siguiente.

Tabla 13

Variables óptimas para la recuperación de cobre de las aguas del río Putina tratado con carbón activado

N° de pruebas	COMBINACIÓN DE NIVELES			Y Variable respuesta (%)
	pH (X1)	Velocidad de mezcla (X2)	Tiempo de adsorción (X3)	
1	3,00	100	25	76,7188
2	5,82	100	25	76,6589
3	3,00	500	25	76,7649
4	5,82	500	25	76,5990
5	3,00	100	180	76,6682
6	5,82	100	180	76,5023
7	3,00	500	180	76,6036
8	5,82	500	180	76,4377

La tabla 13 muestran las cantidades de cobre recuperado luego del proceso de adsorción con carbón activado, donde el mayor rendimiento de recuperación con un



porcentaje de rendimiento del 76,7649 % para una dosis de carbón activado de 50 g, lo cual corresponde a una recuperación de 0,05042 mg/L .

4.3. MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE COBRE POR ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

El modelo matemático se ha demostrado a través de los resultados experimentales y de acuerdo al modelo estadístico Statgraphics Centurión XVI, donde se concluye que el pH es la variable más significativa en el proceso de adsorción de Cu de las aguas del río Putina con un valor de 3,0.

El coeficiente de correlación obtenido ha sido $R^2=90,0268$ % y el modelo matemático hallado es:

$$Y = 76.908 - 0.0476635 * \text{pH} + 0.0000445689 * \text{Velocidad de mezcla} - 0.000829518 * \text{Tiempo de adsorción}$$



4.4. DISCUSION

Según Soto *et al* (2005), la alternativa para remover metales pesados de aguas residuales que genera la industria galvánica de la ciudad de Monterrey tales como el Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , utilizó un equipo de jarras y como coagulantes el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeSO_4 , FeCl_3 , este último mostro el mejor nivel de remoción de los metales estudiados, así como una velocidad de sedimentación más rápida. También encontró una relación entre el nivel de remoción con el tamaño de los flóculos.

En nuestro trabajo de investigación, utilizando carbón activado, se adsorbió cobre con una dosis de carbón activado de 50 g, lo cual corresponde a una recuperación de 0,05042 mg/L a un pH de 3,7 y un rendimiento de 84,5798 %

Para Berrospi (2019), los metales totales antes de la aplicación de la dolomita superaban en gran parte el ECA-Categoría 4, con 25 g de dolomita, en el P-1 descendió mucho más el contenido de, Cobre, Zinc, en 0.03452 mg/L, para el caso del P-2 descendió el Cobre, en 0.02479 mg/L. Por lo tanto, la dosis de 25 g de dolomita es adecuado para 500 ml de aguas ácidas para cumplir los ECA -Categoría 4. Además, la dolomita ha demostrado ser eficiente alcanzando porcentajes de remoción de metales, con 25 g de dolomita, en P-1, 99,32% de Cobre.

En nuestro trabajo se aplicó el ácido nítrico e hidróxido de calcio para determinar los diferentes pH para la agitación magnética, dando buenos resultados en las 8 pruebas, siendo la prueba 3 la más eficiente a una velocidad de 500 rpm.



V. CONCLUSIONES

- Se definieron las muestras tomadas en las aguas del río Putina en diferentes puntos, se recolectaron un total de 8 muestras en recipientes de polietileno con capacidad de 250 cm³, los cuales fueron conservados en refrigeración hasta su traslado al laboratorio.

Las propiedades físicas y químicas de las aguas del río Putina fueron caracterizados a través del análisis químico, se determinó las cantidades de Cu de acuerdo a la Ley General de Aguas D.L. N° 17752 y sus modificaciones al reglamento según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM, superan los límites máximos permisibles con 0,217 mg/L. después del proceso de agitación magnética con carbón activado se recuperó 0,05042 mg/L.

- La tecnología propuesta para el proceso experimental, fue el determinar la cantidad de cobre adsorbido con carbón activado, se prepararon 8 muestras con aguas contaminadas con cobre se utilizó el proceso de agitación magnética a diferentes velocidades desde 100 a 500 rpm, con pH de 3 a 5,82 con un tiempo que varía de 25 a 180 min, con el objeto de variar el pH se utilizó ácido nítrico (HNO₃) e hidróxido de sodio (NaOH), los mismos que sirvieron para bajar o subir el pH

- El modelo matemático definió el coeficiente de correlación obtenido fue de $R^2 = 90,0268 \%$ para las aguas del río Putina, lo cual nos indica que el proceso de adsorción con carbón activado de eucalipto es adecuado, obteniéndose el siguiente modelo matemático.

$$Y = 76.908 - 0.0476635 * \text{pH} + 0.0000445689 * \text{Velocidad de mezcla} \\ - 0.000829518 * \text{Tiempo de adsorción}$$



VI. RECOMENDACIONES

- El Gobierno Regional de Puno, deben establecer programas de control, para evitar la liberación de estos contaminantes en el río a través de trabajos de recuperación de sus relaves.
- La Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano debe analizar los trabajos de investigación sobre metales pesados que han sido evaluados en los trabajos de investigación, que pueden ser un buen aporte para la región sobre contaminación de metales.
- Se hace necesario realizar estudios para saber la concentración de las fuentes de aguas subterráneas, con el objeto de hacer una evaluación de los pobladores aledaños, ganado y plantas que se encuentran en las riberas del río y determinar el grado de contaminación en la zona.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bansal R. & Goyal M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. United States of America, USA.
- Barreto C. (2013). Obtención de carbón activado a partir de la pepa de la aceituna para adsorción de metales pesados (Pb, As) en efluentes líquidos. (*Tesis de pre grado*). Universidad Nacional del Callao, Lima.
- Berrospi Alania. Liz Yannela. (2019). Remoción de metales pesados presentes en las aguas ácidas de la laguna Yanamate mediante la aplicación de la dolomita como agente remediante a escala experimental. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco.
- Bustamante A. (2011). Adsorción de metales pesados de residuos de café modificados químicamente. Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León.
- Condori C. (2011). Remoción de plomo (II) y zinc de las aguas residuales de la mina San Genaro por adsorción con carbón activado del eucalipto. (*Tesis de pre grado*). UNA-PUNO, Puno.
- Donoso M. O. (2015). Utilización de un adsorbente de bajo costo, aserrín de pino natural y modificado con reacción Fenton, para la remoción de contaminantes orgánicos traza (Carbamazepina y Atrazina). (*Tesis de pre grado*). Universidad de Concepción, Chile.
- Erto A. Giraldo L. Lancia A. & Moreno-Pirajan JC. (2'13). *A comparison between a low-cost sorbent and an activated carbon for the adsorption of heavy metals from water. Water Air Soil Pollut.*
- Garzón G. (2012). Adsorción de cromo (VI) utilizando carbón activado a partir de la cascara de naranja. (*Tesis de pre grado*). Universidad de Cartagena, Cartagena.



- Gutierrez E.S. Cruz A:C. Garcia F. A. (2005). Aplicación del modelo de Thomas para la adsorción de cadmio y plomo en columna empacada con carbón activado. (*Tesis de pre grado*). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Henning K. & Schafer S. (1993). *Impregnated activated carbon for environmental protection. Gas Separation and Purification*. Cuba.
- Izquierdo M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso. (*Tesis de Doctor*). Universidad de Valencia, España.
- Lenntech. (2017). *Propiedades químicas del cobre-Efectos del cobre sobre la salud-Efectos ambientales del cobre*. (<http://www.lenntech.es/periódica/elementos/cu.htm>).
- Luna D. Gonzales A. Gordon M. & Martín N. (2007). Obtención de Carbón Activado A partir de la Cascara de Coco. (*Tesis de pre grado*). UAM-Azcapotzalco, México.
- Martín M.A. (2008). Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. (*Tesis de Doctorado*). Universidad de Granada, Granada.
- Mohanty K. Jha M. Meikap BC. (2005). *7. Eliminación de cromo (VI) de soluciones acuosas diluidas mediante carbón activado desarrollado a partir de nueces de Terminalia arjuna activadas con cloruro de zinc*. Ciencias de la Ingeniería Química-Elsevier.
- Nordberg. (1998). *Metales: Propiedades químicas y toxicidad. Por Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales*. España: España. Enciclopedia de Salud IV edición.
- Obregón V.D. (2012). Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. (*Tesis de pre grado*). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.



- Ordoño B. M. A. (2020). Remoción de cobre (II) y arsénico (V) de aguas residuales de mina, por adsorción con zeolita natural en proceso Bach. (*Tesis de pregrado*). UNA-PUNO, Puno.
- Padrón R. Rodríguez C. Gómez A. García A. & Dr. Gonzales L. (2013). *El carbón activado, un material adsorbente*. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Cuba.
- Perdomo Gualberto A. Carviedes Rubio Muñoz Calderon Rodriguez Acosta, R. S. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados probablemente presentes en aguas residuales industriales. Revista de ingeniería y Region Universidad Surcolombiana Colombia.
- Soto R. E. Lozano R. T. Barbarín C. J. A. Rodríguez M. (2005). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. (*Tesis de Maestría*). UANL-México, México.
- Tapia H. N. Yarango R. N. Rojas P. (2015). Estudio de la adsorción de cobre (II) a partir de solución acuosa por perlas de pectina. (*Tesis de pre grado*). UNMSAM-LIMA, Lima.
- Urteaga Patricia (2011). *Agua e industrias extractivas cambios y continuidades en los Andes*, Instituto de Estudios Peruanos, Lima
- Valladolid Jove. B. J. Zuuniga P. Pedro D. (2017). Remocion de iones cobre (II) de soluciones acuosas sintéticas e indiferentes concentraciones usando lana de oveja como adsorbente. (*Tesis de pregrado*) Universidad Nacional de San Agustin, Arequipa.



ANEXOS



ANEXO A

Marco legal: D.S. 004-2017-MINAM aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establece Disposiciones Complementarias.

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Estuarios	Marinos		
Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos			
FÍSICOS- QUÍMICOS						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(μ S/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO ₃ -) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoniaco Total (NH ₃)	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
INORGÁNICOS						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081

ANEXO B

MATRIZ DE DISEÑO FACTORIAL DE AGUAS DEL RIO PUTINA

De acuerdo a lo establecido, el diseño factorial es de 08 corridas experimentales previamente combinadas, lo que nos da una visión de los efectos de las variables que permitirá visualizar los efectos y resultados finales.

Tabla 14

Matriz del diseño factorial $2^3=8$ de las aguas del rio Putina

N° de pruebas	DISEÑO	COMBINACIÓN DE NIVELES			Rendimiento (Y)
		pH (X1)	Velocidad de mezcla (X2)	Tiempo de Adsorción (X3)	Variable respuesta (%)
1	[1]	3,00	100	25	76,7188
2	a	5,82	100	25	76,6589
3	b	3,00	500	25	76,7649
4	ab	5,82	50	25	76,5990
5	c	3,00	100	180	76,6682
6	ac	5,82	100	180	76,50223
7	bc	3,00	100	180	76,6036
8	abc	5,82	100	180	76,4377

Determinamos con los valores de la tabla 14 el número de pruebas experimentales a realizar (combinando los valores máximo y mínimo de dos factores establecidos). Para un diseño 2^3 se tiene 8 pruebas experimentales.

Diseño que cumple la condición de ortogonalidad en tanto la sumatoria de sus vectores X_1 , X_2 , X_3 de su producto es cero. (Montgomery 1996).

Conforme a lo establecido, el diseño factorial es de 08C corridas experimentales previamente combinadas, lo que nos da una visión de los efectos de las variables que permitirá visualizar los efectos y resultados finales.



Tabla 15

Cobre recuperado de la muestra tratada con carbón activado

N° de Prueba	pH)	Concentración de Cu recuperado (mg/L)	Rendimiento (%) (Y)
1	3,00	0,05052	76,7188
2	5,82	0,05065	76,6589
3	3,00	0,05042	76,7649
4	5,82	0,05078	76,5990
5	3,00	0,05063	76,6682
6	5,82	0,05099	76,5023
7	3,00	0,05077	76,6036
8	5,82	0,05113	76,4377

ANEXO C

TABLA CORRESPONDIENTE A LOS CÁLCULOS DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

➤ RENDIMIENTO DE RECUPERACIÓN DEL COBRE

El rendimiento de recuperación del cobre se calculó con la siguiente

$$\% = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Dónde:

C_i= concentración inicial del metal en el agua

C_f= concentración final del metal en el agua después de la agitación magnética

Tabla 16

Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial

Concentración inicial de Cu (mg/L)	Concentración final de Cu (mg/L)	Rendimiento %
0,217	0,05052	76,7188
0,217	0,05065	76,6589
0,217	0,05042	76,7649
0,217	0,05078	76,5990
0,217	0,05063	76,6682
0,217	0,05099	76,5023
0,217	0,05077	76,6036
0,217	0,05113	76,4377



1. $\% = \frac{0,217-0,05052}{0,217} x 100 = 76,7188$
2. $\% = \frac{0,217-0,05065}{0,217} x 100 = 76,6589$
3. $\% = \frac{0,217-0,05042}{0,217} x 100 = 76,7649$
4. $\% = \frac{0,217-0,05078}{0,217} x 100 = 76,5990$
5. $\% = \frac{0,217-0,05063}{0,217} x 100 = 76,6682$
6. $\% = \frac{0,217-0,05099}{0,217} x 100 = 76,5023$
7. $\% = \frac{0,217-0,05077}{0,217} x 100 = 76,6036$
8. $\% = \frac{0,217-0,05113}{0,217} x 100 = 76,4377$

ANEXO D

**DATOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR EL MODELO
MATEMÁTICO- ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL COBRE**

Este modelo matemático resume los resultados del ajuste a un diseño factorial modelo estadístico relacionando a la capacidad de adsorbente. La tabla ANOVA particiona la variabilidad de la capacidad de adsorción de Cu entre los valores de respuesta observados.

Tabla 17*Efectos estimados para Y*

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	76.6261	0.0269737	
A: Tiempo	-0.134411	0.0356564	1.23754
B: pH	0.0178276	0.0555433	1.38123
C: Tiempo de adsorción	-0.128575	0.0342779	1.1437

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1.

Tabla 18*Análisis de varianza para Y*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: pH	0.0291972	1	0.0291972	14.21	0.0196
B: Velocidad de mezcla	0.000211674	1	0.000211674	0.10	0.7643
C: Tiempo de adsorción	0.0289091	1	0.0289091	14.07	0.0199
Error total	0.00821879	4	0.0020547		
Total (corr.)	0.0824084	7			

R-cuadrada = 90.0268 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 82.5468 porciento

Error estándar del est. = 0.0453288

Error absoluto medio = 0.0272888

Estadístico Durbin-Watson = 1.78096 (P=0.4022)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0851694

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Y en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 90.0268 % de la variabilidad en Y. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 82.5468%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0453288. El error medio absoluto (MAE) de 0.0272888 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en

el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Tabla 19

Coefficiente de regresión para Y

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	76.908
A: pH	-0.0476635
B: Velocidad de mezcla	0.000044568
C: Tiempo de adsorción	-0,000829518

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$Y = 76.908 - 0.0476635 * \text{pH} + 0.000044568 * \text{Velocidad de mezcla} - 0.000829518 * \text{Tiempo de adsorción}$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

Tabla 20

Optimizar respuesta

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	3.0	5.82	3.0
Velocidad de mezcla	50.0	500.0	500.0
Tiempo de adsorción	25.0	180.0	25.0

Meta: maximizar Y

Valor óptimo = 84.5852

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Y sobre la región indicada.

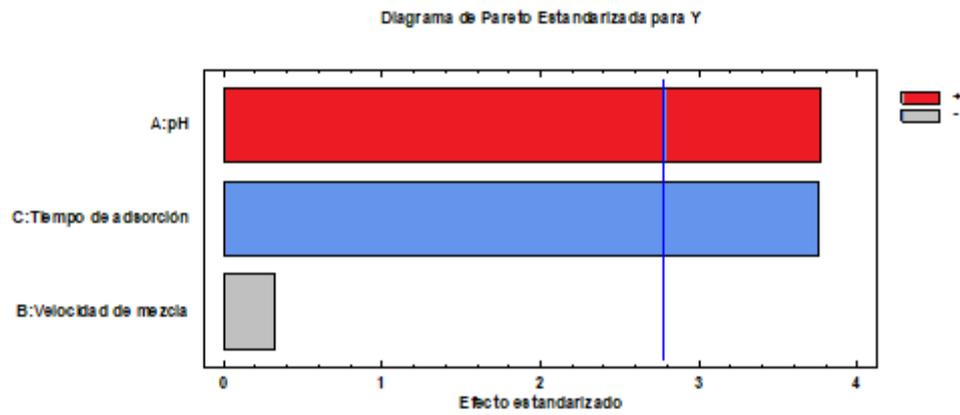


Figura 8. Pareto estandarizado para Y

Esta figura ha sido elaborada en base a los datos de la tabla 14, la cual muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones, entre las variables, pH y tiempo, la más significativa para la variable respuesta es el pH, cualquier cambio en esta afecta a la variable respuesta Y en mayor grado.

La línea azul indica el margen sobre el que varía el sistema

Los colores indican cuan representativos son las variables y sus combinaciones.

No hay indicios de correlación de serie en los residuos

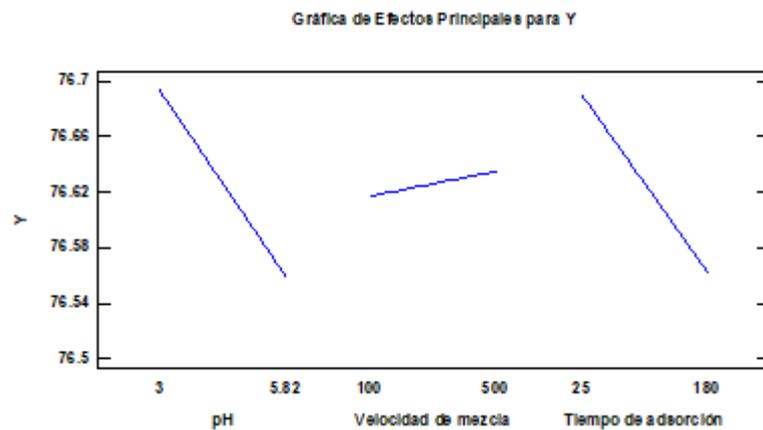


Figura 9. Efectos principales para Y

En la figura 11 se puede visualizar que no existe interacción entre los factores, por lo que estas variables son independientes lo que corresponde a la superficie respuesta, nos indica que la pendiente correspondiente a todas las variables es negativa.

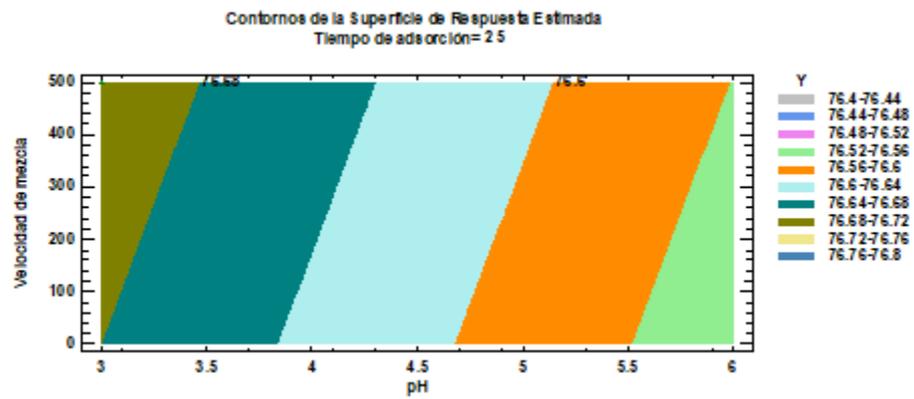


Figura 10. Contornos de superficie de la respuesta estimada

Visualizando el grafico (isolíneas), podemos interpretar lo siguiente: El valor óptimo para el tiempo es 25 minutos y un pH de 3,0.

Esta ventana muestra la ruta ascendente. Este Indica localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales si su objetivo es aumentar o disminuir el Rendimiento.

ANEXO E



Figura 11. Toma de muestras de agua del río Putina cerca al puente



Figura 12. Toma de muestras de agua del río Putina



Figura 13. Toma de muestras de agua del río Putina

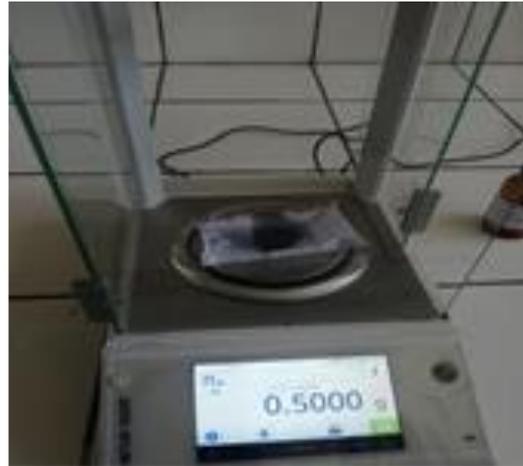


Figura 14. Pesando 50 mg de carbón activado para cada vaso de precipitado



Figura 15. Preparando las muestras con carbón activado



Figura 16. Determinado el pH de cada una de las 8 muestras



Figura 17. Determinando el pH

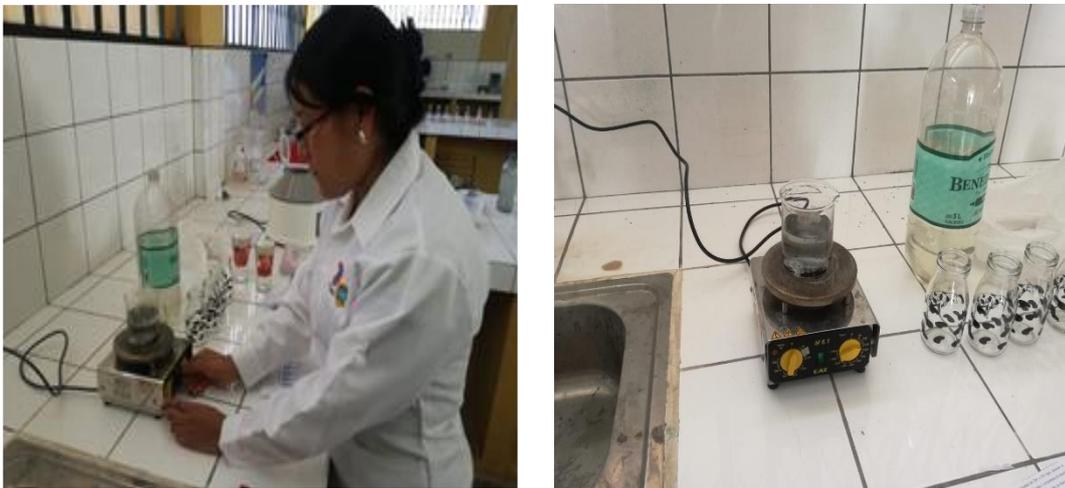
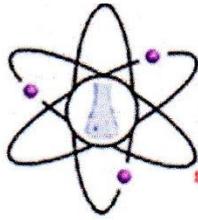


Figura 18. Proceso de agitación magnética con agua del río, con Cu



Figura 19. Proceso de filtración con cada muestra del proceso de adsorción de Cu



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M83-0420

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE

: Srta. FIORELLA GRISEL LAMA MAMANI

ASUNTO

: Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra de agua

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA

CANTIDAD DE MUESTRAS

: 01

SOLICITUD DE ENSAYO

: Análisis químico elemento cobre (Cu)

RECEPCION DE MUESTRAS

: Botella de vidrio

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO

: 18/04/2022 al 19/04/2022

DETALLE DEL INFORME

RESULTADO DE ENSAYO

N°	N° RH	Código de Cliente	Cobre (Cu)
			mg/L
1	RH-M82485	Agua del rio Putina	0,217

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

METODOS DE REFERENCIA

- * Determinación de cobre (Cu) en muestras de agua – Método Absorción Atómica




Ing. Fidel Huaynapata Luque
CIP 167755
GERENTE DE OPERACIONES

Av Mártires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno – Frente a Covisur)
Cel 978645481 - 935008040



RH-M83-0437

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE : Srta. FIORELLA GRISEL LAMA MAMANI
ASUNTO : Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra de agua

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA

CANTIDAD DE MUESTRAS : 8
SOLICITUD DE ENSAYO : Análisis químico elemento cobre (Cu)

RECEPCION DE MUESTRAS : Botella de vidrio, debidamente conservado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO : 20/04/2022 al 23/04/2022

DETALLE DEL INFORME

RESULTADO DE ENSAYO

Cu ⁺² recuperado de las aguas municipales	
(mg/L)	% de Cu ⁺²
0,05052	76.7188
0,05065	76.6589
0,05042	76.7649
0,05078	76.5990
0,05063	76.6682
0,05099	76.5023
0,05077	76.6036
0,05113	76.4377

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

METODOS DE REFERENCIA

- * Determinación de Cobre (Cu) en muestras de agua – Método Absorción Atómica



Fidel Huaynapata Luque
Ing. Fidel Huaynapata Luque
CIP 167755
GERENTE DE OPERACIONES

Av Mártires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno – Frente a Covisur)
Cel 978645481 - 935008040