

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“DEGRADACIÓN DEL CONTENIDO DE HIERRO (II) Y (III) EN
AGUA RESIDUAL DE LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE COBRE CON
CARBÓN ACTIVADO EN TANQUE AGITADO”**

POLICARPO AGATÓN SUERO IQUIAPAZA

CALLAO, 2020

PERÚ

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo a mis
queridos hijos.

ÍNDICE	3
TABLA DE CONTENIDOS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1. Descripción de la realidad problemática.	10
1.2. Formulación del problema.	12
1.3. Objetivos	12
1.4. Limitantes de la investigación	13
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes: Internacional y nacional.	14
2.1.1. Antecedentes internacionales recientes.	14
2.1.2. Antecedentes nacionales recientes.	15
2.2. Bases teóricas.	16
2.3. Conceptual.	24
2.3.1. El carbón.	24
2.3.2. Carbón activado	25
2.3.3. Elaboración de carbón activado.	35
2.3.4. Factores que influyen en la adsorción de compuesto	37
2.3.5. Usos de carbón activado en el tratamiento de aguas residuales.	37
2.4. Definición de términos básicos.	37
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	40
3.1. Hipótesis.	40
3.2. Definición conceptual de variables.	40
3.2.1. Operacionalización de variables.	41
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	42
4.1. Tipo y diseño de investigación.	42
4.2. Método de investigación.	42
4.3. Población y muestra.	43
4.4. Lugar de estudio y periodo de desarrollado	44
4.5. Técnicas e instrumentos para recolección de información.	44

4.6.	Análisis y procedimiento de datos	48
V.	RESULTADOS	52
5.1.	Resultados descriptivos	52
5.2.	Resultados inferenciales	58
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	69
6.2.	Contrastación de resultados con otros resultados	70
6.3.	Responsabilidad ética	71
	CONCLUSIONES	72
	RECOMENDACIONES	73
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXOS :	81
•	Anexo A : Instrumentos utilizados	81
•	Anexo B : Matriz de Consistencia	90

TABLA DE CONTENIDOS

Tabla N° 01. Resumen de algunos modelos de isotermas.	21
Tabla N° 02. Propiedades de algunos carbones.	34
Tabla N° 03 Análisis químico de un mineral de cobre oxidado.	42
Tabla N° 04. Caracterización de efluente usado en el experimento	.42
Tabla N° 05. Características de carbón activado estándar europea EN 12915	44
Tabla N° 06. Concentración final de cobre y fierro a diferentes concentraciones iniciales.	50
Tabla N° 07. Resultados de pH versus concentración final.	53
Tabla N° 08. Cantidad de carbón activado a diferentes diluciones.	55
Tabla N° 09. Parámetros de la isoterma del modelo Freundlich.	56
Tabla N° 10. Regresión factorial, análisis de ANOVA para cobre	57
Tabla N° 11. Regresión factorial, análisis de ANOVA para fierro.	60
Tabla N° 12. Regresión factorial, análisis de ANOVA para cobre: Concentración final versus tiempo y pH	62
Tabla N° 13. Regresión factorial, análisis de ANOVA para fierro: Concentración final versus tiempo y pH.	65

TABLA DE FIGURAS

Figura N° 01. Formas de presentación de carbón activado.	23
Figura N° 02. Esquema de las formas de presentación de carbón activado.	24
Figura N° 03. Carbón activado elaborado de vegetales.	30
Figura N° 04. Superficie de carbón activado hetero-átomo	.31
Figura N° 05. Agua residual de lixiviación de cobre.	40
Figura N° 06. Muestra de mineral oxidado de cobre para lixiviar.	41
Figura N° 07. Fotografía de cobre lixiviada y agua residual obtenida.	41
Figura N° 08. Secuencia de preparación de carbón activado.	43
Figura N° 09. Diagrama simplificado de proceso de activación de carbón.	45
Figura N° 10. Ejecución del proceso de adsorción por agitación.	46
Figura N° 11. Concentración final de Cu y Fe versus tiempo de operación.	50
Figura N° 12. Porcentaje remoción de Cu y Fe versus tiempo de operación.	51
Figura N° 13. Concentración final de Cu versus tiempo de operación a diferentes concentraciones iniciales.	51

Figura N° 14. Concentración final de Fe versus tiempo de operación a diferentes concentraciones iniciales.	52
Figura N° 15. Comparación de concentraciones finales de Cu y Fe versus tiempo.	52
Figura N° 16. Concentración final de cobre versus tiempo a diferentes pH.	53
Figura N° 17. Concentración final de hierro versus tiempo a diferentes pH.	54
Figura N° 18. Porcentaje removido de Cu versus tiempo a diferentes pH	54
Figura N° 19. Porcentaje removido de Fe versus tiempo a diferentes pH	55
Figura N° 20. Obtención de las isotermas obtenidos del carbón usado.	56
Figura N° 21. Diagrama de Pareto para cobre: Concentración fina versus tiempo y concentración inicial.	57
Figura N° 22. Superficie respuesta para cobre	58
Figura N° 23. Superficie respuesta para cobre en 3D	59
Figura N° 24. Diagrama de Pareto para hierro: Concentración final versus tiempo y concentración inicial.	60
Figura N° 25. Superficie respuesta para hierro	61
Figura N° 26. Superficie respuesta para hierro en 3D	62
Figura N° 27. Diagrama de Pareto para cobre: Concentración final versus tiempo y pH.	63
Figura N° 28. Superficie respuesta para cobre	64
Figura N° 29. Superficie respuesta para cobre en 3D	64
Figura N° 30. Diagrama de Pareto para hierro: Concentración final versus tiempo y pH.	65
Figura N° 31. Superficie respuesta para hierro	66
Figura N° 32. Superficie respuesta para hierro en 3D	66

RESUMEN

El presente trabajo de investigación es un aporte a los múltiples y diferentes problemas que presentan los aguas residuales provenientes de diferentes procesos industriales, en Perú provienen de plantas metalúrgicas de extracción primaria o secundaria de metales a partir de minerales sulfurados u oxidados, como en el presente caso, donde se obtiene el cobre por lixiviación o disolución ácida de minerales oxidados, por ello los metales especialmente el fierro y cobre están presentes como cationes (partículas subatómicas con carga positiva), el agua residual es producto de retroalimentación y con presencia de algunos metales presentes en el mineral, el objetivo eliminar la mayor parte de estos metales disueltos, probando a diferentes concentraciones iniciales y a un pH entre 2.5 a 6.9, se puede remover por adsorción con carbón activado preparado para este fin, entre 70 a 80% de Cobre y Fe respectivamente, donde se nota que la variable influyente es el tiempo de operación y la velocidad de agitación, en condiciones ambientales.

Palabras claves: Carbón activado, adsorción, adsorbato, adsorbente, efluente y agitación.

ABSTRACT

The present research work is a contribution to the multiple and different problems presented by wastewater from different industrial processes, in Peru they come from metallurgical plants of primary or secondary extraction of metals from sulphured or oxidized minerals, as in the present In this case, where copper is obtained by leaching or acid dissolution of oxidized minerals, that is why metals, especially iron and copper, are present as cations (subatomic particles with positive charge), the wastewater is a product of feedback and with the presence of some metals present in the mineral, the objective to eliminate most of these dissolved metals, testing at different initial concentrations and at a pH between 2.5 to 6.9, can be removed by adsorption with activated carbon prepared for this purpose, between 70 to 80% Copper and Fe respectively, where it is noted that the influential variable is the operating time and stirring speed, in environmental conditions.

Keywords: Activated carbon, adsorption, adsorbate, adsorbent, effluent and agitation.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento vertical de las edificaciones en la mayoría de las ciudades del Perú es manifiesta en los últimos dos décadas y la distribución de la población de zonas urbanas y rurales muestra una tendencia creciente hacia la concentración urbana en todo el mundo, por lo que América Latina no es la excepción. En tal sentido, un factor de supervivencia de las ciudades es el abastecimiento de agua potable, así como el adecuado nivel de saneamiento urbano, a fin de mantener a un ciclo de agua saludable y sostenible.

Con respecto al agua, sus fuentes nacen en las altas montañas del Perú y están próximas a explotaciones mineras, por lo que están expuestas a niveles peligrosos de metales pesados de esta actividad extractiva, contaminándose y afectando la salubridad de la producción agropecuaria de la zona y que sirve de abastecimiento a la población rural y urbana.

El objetivo de la presente investigación es contribuir como parte de la solución del estado situacional y la problemática del abastecimiento del agua y el tratamiento de aguas residuales en el Perú, desde una perspectiva de revisión de otros trabajos similares, vinculándolo con las posibles soluciones en el tratamiento de aguas residuales, que ciertamente el costo de operación puede ser elevado, pero en el futuro no lo será por la demanda creciente del agua para diferentes usos.

Según Yee-Batista (2013) el 80% de la población latinoamericana vive en ciudades y una gran proporción en asentamientos próximos a fuentes contaminadas. La autora agrega que, siendo América Latina una de las regiones más biodiversas del mundo y dueña de un tercio de las fuentes de agua del mundo, la contaminación del agua representa consecuencias ecológicas adversas. Yee-Batista (2013) también afirma que el 70% de las aguas residuales de la región latinoamericana no son tratadas, lo que evidentemente es preocupante por lo que esta investigación considero un aporte importante.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad de la problemática.

Con el crecimiento poblacional de las ciudades en las últimas décadas, existe una creciente demanda de la sociedad para el tratamiento de aguas contaminadas de diferentes orígenes, que es materializada en regulaciones gubernamentales cada vez más exigentes, ha impulsado a los investigadores al desarrollo de nuevas tecnologías y uso de insumos en la purificación de aguas residuales, especialmente de origen industrial con contenido de metales pesados. La aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente el tipo y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar. (Domenech, Jardim y Letter 2005)

Dentro de los efluentes líquidos industriales, uno de los contaminantes que más afectan al medio ambiente es el de metales pesados, éstos están considerados como uno de los grupos más peligrosos debido a su no biodegradabilidad, su alta toxicidad a bajas concentraciones y su capacidad para acumularse en diferentes organismos; aunque en este grupo se incluyen elementos esenciales para el crecimiento, reproducción y/o supervivencia de organismos, vivos otros muchos pueden causar graves problemas. (*Cañizares-Villanueva R.O.* 2002)

Para el tratamiento de los efluentes líquidos que contienen metales pesados, existen diferentes métodos físico químicos, siendo los de mayor auge en la actualidad los siguientes: precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa y adsorción. Han sido probados algunos métodos de remoción y recuperación de metales pesados por mecanismos de biosorción generando sepas con células de microorganismos usando como soporte el carbón activado o usando directamente en columnas de carbón activado bajo ciertos factores controlantes en un reactor. (Erick D. Reyes, et al; Patrick J. Cyr, et al 1996).

Otro de los métodos que se utilizan es por intercambio iónico con soporte de la zeolita, que depende de varios factores como la selectividad de la estructura de la zeolita, topografía de la red cristalina espacial y la densidad de carga, que depende de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. *Clarke 1980 y Breck 1980*

Se han estudiado el comportamiento de la adsorción de la zeolita ***clinoptilolita*** con relación a los iones Cd^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Mn^{+2} , se ha constatado que el fenómeno de adsorción depende de la densidad de carga y del diámetro de ion, asimismo se han establecido la secuencia de selectividad entre diferentes metales. (Edrem et al, 2004)

La preocupación por la contaminación ambiental ha dado como resultado investigación más intensa y el desarrollo de tecnologías sustentables, así como una normatividad cada vez más estricta. Como resultado, la introducción de tecnologías limpias en los procesos industriales ha logrado disminuir las descargas de sustancias contaminantes al ambiente. Sin embargo, en la mayoría de las empresas todavía se generan aguas residuales con concentraciones de sustancias contaminantes de consideración (*Reyes et al. 2006*).

La contaminación del agua, aire y suelo por metales pesados es uno de los problemas ambientales más severos, además de ser muy difícil de resolver. Las fuentes más comunes de contaminación por dichos metales son los procesos de refinación del petróleo, las plantas generadoras de energía y los procesos metalúrgicos (*Acosta et al.2007*).

La industria minera es una de las actividades económicas de mayor tradición en el Perú, la cual es mayoritariamente metálica y se dedica principalmente a la producción de Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Sn, Mo. Esta actividad tiene un alto impacto ambiental, ya que afecta desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua. Debido al procesamiento de los recursos minerales, se han generado grandes cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que han ocasionado una gran cantidad de sitios contaminados a lo largo de todo el país (*Volke et al. 2004*).

Muchos efluentes industriales contienen metales pesados disueltos, como los que provienen de operaciones metalúrgicas, aguas ácidas de minas de minerales sulfurados, y de otro tipo de procesos químicos, muchos de estos metales son dañinos para todos los seres vivos, en concentraciones más allá de los límites fijados por organismos gubernamentales relacionados con el cuidado del medio ambiente. Existen técnicas conocidas para la remoción de algunos metales pesados contenidos en efluentes industriales, e insumos para capturar en diferentes formas y concentraciones en diferentes condiciones, pero todavía los esfuerzos que realizan muchos investigadores sobre este no han tenido el éxito deseado para mitigar los daños ocasionados por la actividad minera en el mundo.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera se debe degradar el contenido de cobre y hierro en agua residual de lixiviación ácida de cobre empleando carbón activado en tanque agitado?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cómo se debe caracterizar el carbón activado?
- b. ¿Cómo se debe caracterizar el efluente?
- c. ¿De qué forma se debe seleccionar y definir los factores para optimizar el proceso de remoción de hierro (II) y hierro (II)?
- d. ¿Cómo se establecerá los factores que optimicen el proceso?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Degradar el contenido de hierro en agua residual de lixiviación ácida de cobre empleando carbón activado en tanque agitado.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar el carbón activado.

- b. Caracterizar el agua residual que se somete al tratamiento.
- c. Seleccionar y definir los factores para optimizar el proceso de remoción de hierro (II) y hierro (II).
- d. Establecerá los factores que optimicen el proceso.

1.4. Limitantes de la investigación

Una de las limitaciones relevantes en este tipo de trabajos de investigación son los costos de análisis químico de los resultados experimentales, ya que se requiere realizar varias pruebas experimentales, para validar estos análisis deben ser certificadas, específicamente en este caso se requiere realizar mínimo 30 pruebas experimentales, 5 pruebas por factor.

Otra de las limitaciones es mencionar la procedencia de la muestra, debido a que muchas empresas no hacen conocer el grado de contaminación que ocasionan especialmente en los ríos o los afluentes de los ríos, para lo se requiere pedir autorización o participación de la DIGESA, para obtener muestra.

En cuanto a las facilidades, se cuenta con la disponibilidad de laboratorio de Operaciones y procesos unitarios (LOPU) de la Facultad de Ingeniería Química de la universidad Nacional del Callao, que cuenta con equipos e infraestructura para adecuar la instalación de laboratorio experimental para este fin.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Investigaciones Internacionales recientes

Basso, E.G. Cerrella, A.L. Cukierman (2000), en su artículo publicado "*REMOCION DE CADMIO (II) DE SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE CARBON ACTIVADO PREPARADO A PARTIR DE CAÑA*" Buenos Aires, Argentina), con la finalidad de alcanzar los niveles sanitarios admisibles en distintos contaminantes presentes en el agua, una aplicación en particular aislaron los iones metálicos pesados como el plomo(II), mercurio(II), cadmio(II), utilizando métodos clásicos de separación por precipitación modificando el pH de soluciones. (Periasamy Namasivayam, 1994 y Cuper 1999)

Patrick J. Cyr, Rominder P.S. Suri, Edward D. Helmig, (2002); evaluaron a escala piloto el uso de carbón activado granulado, para la remoción de mercurio orgánico, mercurio (II), y el cobre (II), las pruebas se hicieron en columnas de mercurio con diferentes flujos de circulación del efluente, concluyen que el uso de este método es y de bajo costo conveniente para remoción de estos metales y otras aplicaciones similares.

Heschel y Klose (1995); Barthon (1998), Blanco Castro et al (2000), investigaron sobre el los carbones activados obtenidos a partir de varios residuos agroindustriales, especialmente en los materiales biomásicos (lignocelulósicos) que tienen carácter renovable, tales como cáscaras de nueces, carozos de frutas, bagazo de caña de azúcar, aserrín de algunos cortezas de rápido crecimiento han sido investigados como posibles precursores mediante diferentes métodos de activación de carbón para adsorber eficientemente algunos metales pesados.

M.C. Basso, E. G. Cerella, A. L. Cukierman, (2008), exploran la factibilidad de remover iones cadmio (II) de soluciones diluidas mediante carbón activado obtenido a partir de una especie de caña fácil crecimiento y de rápido reproducción, mediante el proceso de activación química con ácido fosfórico, determinando algunas características químicas y propiedades de superficie.

Reyes Toris E., Cerino Córdova F., Suarez Herrera M., (2005) en sus estudios realizados, sobre la remoción de metales pesados con carbón activado, utilizando como soporte de biomasa como método más efectivo, en efluentes de origen minero metalúrgico, y otros efluentes industriales, este método también se denomina biosorción.

Rivera Utrilla J. et al. (2003), efectuaron estudios del uso de carbón activado, con y sin biomasas, para la remoción de metales plomo (II), cadmio (II), y cromo (II), usando cepas microbianas con soporte de carbón activado.

Arriagada Renan, Garcia Rafael, Cid Ruby, (2009), realizaron estudios a nivel de laboratorio sobre la retención de mercurio (II) y cromo (II) en carbones activados de origen lignocelulósico, estableciendo los rangos de pH, para una remoción eficiente de estos metales a bajas concentraciones.

2.1.2. Investigaciones nacionales recientes

Mendieta Narváez E. Tesis titulado (2008). "Estudio de la capacidad de adsorción de carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite para la remoción de arsénico en aguas de pozo con alto contenido de arsénico" ; donde se activa el carbón con hidróxido de sodio, obteniendo buenos resultados a bajas concentraciones de arsénico, en un rango de pH 4 a 9.

Rodríguez. A., Soto B., Saúl et. al .Tesis de pregrado "Obtención del carbón activado a partir de residuos orgánicos con alto poder calorífico Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios". Perú 2009. En los resultados de sus pruebas experimentales muestran que la remoción del mercurio con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de la nuez de castaña removió mayor cantidad de mercurio que el obtenido a partir de la cáscara de coco (el que no tuvo ningún efecto en fase líquida).

Ferradas B. y Villavicencio L. en su tesis.(2013) "Estudio de un sistema de tratamiento para la remoción de fenoles del efluente industrial de la refinería de Iquitos con carbón activado granular" Lima-Perú. En sus resultados de este estudio permitan a la Refinería Iquitos de Petroperú-Operaciones Selva, implementar la unidad que mejore la calidad de los efluentes vertidos al cuerpo

natural, dejando de emitir concentraciones de fenoles que superen los LMP. Asimismo, se confía en que los resultados puedan ser utilizados en otros procesos productivos.

Uechi L. Julio A. en su Tesis titulado, (2016). "Estudio del proceso de adsorción de cadmio y cromo presentes en soluciones acuosas utilizando carbones activados modificados". PUCP, Al analizar los factores que pueden influir en la retención del adsorbato, han determinado que la adsorción es mejor a pH = 5 y a bajas temperaturas (10°C). Los resultados cinéticos en la gran mayoría de los carbones modificados presentan el mejor ajuste con el modelo de pseudo segundo orden, lo que indica que el proceso de adsorción depende de la disponibilidad de los sitios de adsorción.

De los antecedentes de trabajos de investigación nacionales se ha considerado interesantes y tienen cierta relación con la propuesta de mi investigación, es un aporte interesante.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Teoría de las disoluciones.

La presencia de sustancias metálicas disueltas en algunas aguas residuales, tiene un sustento físico y químico, el primero explica la formación de partículas con carga eléctrica o distribuida a través de las fuerzas de Van Der Waals, el segundo la formación de partículas atómicas basadas en las teorías de ácido y base, como se describe a continuación:

La teoría de las disoluciones de los metales se basa en la teoría de Brønsted J. M. (Danés) y Lowry T. M. (Inglés) en 1923 definen sustancias llamados base o álcali capaces de ceder protones y sustancias llamadas ácidas capaces de aceptar protones, antes el Danés Sørensen en 1909 ya había planteado el concepto y fundamento del pH estableciendo la escala de la fuerza de un ácido o de una base mediante la constante de equilibrio de ionización. Según Brønsted y Lowry al disolverse una sal metálica, ésta se disocia formando iones con carga

positiva o negativa, y frente al agua se comportan como disoluciones ácidas o básicas. (Castellan, G. 1998)

Svante Arrhenius (1927), químico Sueco, propuso la teoría de la disociación electrolítica, llamando ácido a toda sustancia que al disolverse en agua, se disocia produciendo iones hidrógeno H^+ (protones) y llamando base, a toda sustancia que, al disolverse en agua, se disocia produciendo iones oxidrilos, OH^- . La teoría de Arrhenius se puede resumir como sigue:

- Las disoluciones de electrolitos contienen iones.
- Los electrolitos se separan o disocian en iones cuando se colocan en agua.
- Los iones son responsables de la conducción de la corriente eléctrica (flujo de electrones) a través de una disolución electrolítica.
- La conductividad de una disolución electrolítica depende del grado de concentración de los iones del electrolito que hay en dicha disolución. (Castellan, G. 1998).

2.2.2. Teoría de adsorción

La adsorción, es un fenómeno fisicoquímico por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos, mediante fuerzas de atracción conocidas como "fuerzas de Van Der Waals", por lo tanto, al ser un fenómeno que ocurre en la superficie, cuanto mayor sea el área superficial disponible tenga un sólido, mejor es su capacidad de fijar sustancias sobre ésta. (Giraldo L., García V. y Moreno J.C. 2008).

En términos generales el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución, pudiendo constituirse dicha interfase entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes. El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG. El equilibrio se

alcanza cuando se igualan las tasas de sorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio de carbón activo se puede determinar calculando su isoterma de adsorción. (Aguapedia.net, 2005).

2.2.3. Fundamentos de la degradación de metales disueltos en aguas residuales

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción. (Ullmann's, 1986).

Las moléculas en fase gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macrotransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activo.
- Microtransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activo.
- Adsorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los mesoporos y microporos del carbón activo

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (o lo que es lo mismo soluble en agua) no puede ser eliminada o es mal eliminada por el carbón activo. Cada clase de carbón tiene su propia isoterma de adsorción. (Aguapedia.net, 2005).

Se requiere conocer principios y fundamentos que se basan en la estructura química del carbono, activación de carbono, el fenómeno de adsorción y la teoría de las disoluciones de los metales.

El éxito y el continuo uso de carbones activados son una consecuencia directa de la originalidad y la versatilidad de los carbones activados. Para decirlo de otro modo, no existe ningún otro material que sea tan poderosamente adsorbente y que, al mismo tiempo, pueden mostrar detalles muy específicos de aplicación a través de variaciones en la estructura, estas variaciones son relativamente fácil de conseguir (Marsh y Rodríguez, 2006).

Con los principios y fundamentos señalados por los estudios realizados se puede señalar que el carbón activado es un término general que se aplica a toda una serie de productos derivados de materiales carbonosos; es un material amorfo que presenta un área superficial excepcionalmente alta, medida por adsorción de nitrógeno, y se caracteriza por tener una proporción de microporos (poros menores que 2 nanómetros). Estas características le confieren propiedades adsorbentes excepcionales que pueden ser aprovechadas en diferentes áreas (Giraldo L., García V. y Moreno J.C. 2008).

Este material único y versátil, naturalmente, ha atraído la atención de una amplia gama de investigadores, ingenieros de agua, grupos ecologistas, ingenieros de diseño, para los químicos, físicos, matemáticos, diseñadores de modelos de computadora, etc.

La degradación de los iones de metales pesados tóxicos de aguas residuales ha recibido ha adquirido mayor importancia en los últimos diez años a nivel mundial conciencia del detrimento que sufre el medio ambiente debido a la presencia de metales pesados. Aplicaciones de las técnicas tradicionales de tratamiento necesitan enorme costo y continuo uso de productos químicos, que se convierten en impracticables y no convencionales y también causa de más preocupación ambiental. Por otra parte, más allá de cierto límite por ejemplo los métodos convencionales como, precipitación química, la deposición de electrodos, la separación de membrana, la evaporación, disolventes de extracción, etc., son tecnológicamente inaplicables. Por lo tanto, el interés radica más en lo eficaz, económico y ecológico que las técnicas a desarrollar para el ajuste de los efluentes y tratamiento de aguas residuales (Tiwari D. et al, 2008).

En este sentido, intercambiadores de iones desempeñan un destacado papel para la eliminación, especiación de varios cationes, especies aniónicas en las aguas residuales y si el adsorbente se seleccionara de forma cuidadosa y la solución química se ajustase en consecuencia, puede proporcionar un medio eficaz de tratamiento de residuos, incluso en la amplia gama de pH de la solución. Curiosamente, el proceso de adsorción también puede ofertar para eliminar de forma eficaz, eficiente inorgánicos y orgánicos complejos de metales que no se elimina por los métodos convencionales de tratamiento (Tiwari D. et al, 2008).

2.2.4. Isotermas que relacionan la capacidad de adsorción del carbón activado.

Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrolladas por Freundlich, por Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller. (Aguapedia.net, 2005)

a. Isotherma de Freundlich

De todas las fórmulas empleadas para el tratamiento de datos experimentales de las isotermas, la más usual para describir las características de adsorción del carbón activado empleado en el tratamiento de aguas residuales es la Isotherma de Freundlich.

La isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n}$$

Donde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

Ce= concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción.

K_f, n= constantes empíricas.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación entre (x/m) y C, empleando la ecuación anterior reescrita de la siguiente forma:

$$\text{Log } (x/m) = \text{log } K_f + 1/n \text{ log } C_e$$

b. Isotherma de Langmuir

La isoterma de Langmuir se define de la siguiente manera:

$$\frac{x}{m} = \frac{K_L C_e}{(1 + K_L C_e)}$$

Donde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

K_L = constante empírica

C_e = concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción.

La isoterma de adsorción de Langmuir se desarrolló adoptando las siguientes hipótesis:

- Existe un número fijo de puntos accesibles disponibles en la superficie adsorbente, todos los cuales poseen la misma energía.
- La adsorción es reversible.

El equilibrio se alcanza cuando la velocidad de adsorción de las moléculas sobre la superficie es la misma que la velocidad de desorción de las mismas. Así pues, la velocidad a la que se lleva a cabo la adsorción es proporcional a la fuerza que la produce, que corresponde a la diferencia entre la cantidad adsorbida para una cierta concentración y la capacidad de adsorción a dicha concentración. A la concentración de equilibrio, esta fuerza es nula.

La correspondencia de los datos experimentales con la fórmula de Langmuir no significa que las hipótesis realizadas sean válidas para el sistema particular que se estudie, puesto que la no validez de la hipótesis puede traducirse en un efecto cancelatorio. Las constantes de la ecuación de Langmuir se pueden determinar dibujando $C_e/(x/m)$ frente a C_e empleando la ecuación anterior expresada de la siguiente forma:

$$\frac{1}{(x/m)} = \frac{1}{K_L C_e} + 1$$

c. Teoría BET

La teoría BET responde a sus autores, Brunauer, Emmett y Teller quienes desarrollaron las ideas de Langmuir para describir la adsorción multimolecular o en multicapas.

El modelo para la formación de infinitas capas moleculares conduce a la bien conocida ecuación BET:

$$\frac{p}{n^a(p_0 - p)} = \frac{1}{n_m^a C} + \frac{C - 1}{n_m^a C} \left[\frac{p}{p_0} \right]$$

Donde:

n^a y n_m^a es la cantidad absorbida a la presión de equilibrio p/p_0 y la cantidad absorbida en la monocapa respectivamente.

C es una constante la que está relacionada proporcionalmente con la fuerzas de la interacción adsorbente-adsorbato y puede usarse para caracterizar la forma de la isoterma BET.

La ecuación anterior da una adecuada descripción para carbones con micro, meso y macroporosos sobre un rango limitado de presión relativa, normalmente entre 0.05 y 0.3.

El área de superficie aparente BET (ABET), se calcula a través de la siguiente expresión:

$$ABET = (n_m^a) (N) (a_m) \quad (3)$$

Donde:

N es la constante de Avogadro.

a_m es la sección transversal de la molécula.

La aplicabilidad de la teoría BET a carbones con microporos estrechos puede tener fuertes limitaciones al asumir la adsorción en multicapa, por lo que puede ser inapropiada en poros muy estrechos. Lo que hizo que aparecieran nuevas teorías sobre la adsorción en microporos como la ideada por Dubinin y col. acerca del llenado del volumen de microporos, que constituye a priori una teoría más realista. (Aguapedia.net, 2005).

Tabla N° 01.

Resumen algunos modelos de isotermas

Modelo	Representación matemática	Linealización
Langmuir	$\theta_i = \frac{K_L P_i}{1 + K_L P_i}$	$\frac{1}{C_{ads,i}^*} = \frac{1}{C_{ads,i,1}} \frac{1}{P_i} + \frac{1}{C_{ads,i,1}}$
Temkin	$\theta_i = K_{T1} \ln P_i + K_{T2}$	$C_{ads,i}^* = C_{ads,i,1} K_{T1} \ln P_i + C_{ads,i,1} K_{T2}$
Freundlich	$\theta_i = K_F P_i^{\frac{1}{n_F}}$	$\ln C_{ads,i}^* = \frac{1}{n_F} \ln P_i + \ln C_{ads,i,1} K_F$
BET	$\theta_i = \frac{K_L P_i}{1 - P_i} \frac{K_{BET}}{[1 + (K_{BET} - 1) P_i]}$	$\frac{P_i}{(1 - P_i) C_{ads,i}^*} = \frac{(K_{BET} - 1)}{C_{ads,i,1} K_{BET}} P_i + \frac{1}{C_{ads,i,1} K_{BET}}$

Fuente: Manual de carbón activado. Aguapedia.net, 2005

La capacidad de adsorción de un determinado carbón se puede estimar a partir de los datos de la isoterma. Si se representan los datos de la isoterma, se obtiene una gráfica como la de la siguiente figura. A partir de esta gráfica la capacidad de adsorción del carbón se puede determinar prolongando la isoterma hasta la intersección con la línea vertical trazada por el punto correspondiente a la concentración inicial C_0 . El valor de $(x/m) C_0$ correspondiente a ese punto se puede entonces leer en el eje de ordenada en el gráfico. (Marsh H., 1989)

Este valor de $C_0 (x/m)$ representa la cantidad de materia adsorbida por unidad de peso de carbón activado una vez alcanzado el punto de equilibrio con la concentración inicial de constituyente. Esta condición se debe cumplir en la parte superior de un lecho de carbón correspondiente a un tratamiento en columna de contacto, por lo que representa la capacidad de adsorción última del carbón para un constituyente determinado. (Marsh H., 1989)

2.2.5. Investigaciones nacionales de teorías importantes.

Sobre los principios y fundamentos de la adsorción de carbones activados, investigaciones nuevas no se ha encontrado.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. El carbón

El carbón es un material de origen orgánico constituido fundamentalmente por el elemento carbono, su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años, las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba, existen tres tipos principales de carbón:

- a. Lignito, que se forma una vez comprimida la turba, es el carbón de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30%) y más agua, es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.
- b. Hulla, se origina por la compresión del lignito y tiene un importante poder calórico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía, es dura y quebradiza, de color negro, cuya concentración de carbón fijo está entre el 75 y el 80%.
- c. Antracita, procede de la transformación de la hulla, es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calórico, arde con dificultad, pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro, tiene una concentración de hasta el 95% de carbón fijo. (Marsh, 1989)

Genéricamente el carbón se conoce a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente cuyos átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor, los átomos de carbono de una estructura cristalina se atraen unos a otros, adquiriendo una estructura ordenada. (Marsh, 1989),

Una de las maneras más sencillas de diferenciar los carbones que se encuentran en la naturaleza de aquellos obtenidos artificialmente, es

de acuerdo al grado de ordenamiento de sus átomos, en el extremo de mayor orden se encuentra el diamante y poco antes de éste el grafito, de acuerdo con esto un carbón estará más ordenado mientras su proceso de formación se haya llevado a cabo a mayor temperatura y a mayor tiempo. (Marsh, 1989).

2.3.2. Carbón activado

a. Activación de carbón

La activación de un carbón consiste en mejorar la capacidad y selectividad de la superficie del carbón mediante procedimientos físicos y químicos.



Figura N° 01. Formas de presentación de carbón activado. H. Marsh, in "Introduction to Carbon Science", (H. Marsh, Ed.), 1, Butterworth, London (1989).

El carbón activado es un material que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, es muy poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales alrededor de 1,500 metros cuadrados, por gramo de carbón. Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseable; el carbón activado se diferencia en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción, en otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en generar mayor área superficial creando una estructura porosa. (Kadirvelu K. et al 2005).

Es importante señalar que el área superficial del carbón activado es interna, asumiendo un gramo de carbón en trozo el cual que se reduce a tamaños muy fino para incrementar su superficie, como resultado obtendremos un área aproximada de 3 a 4 metros cuadrados, en cambio, al activar el carbón logramos multiplicar de 200 a 300 veces este valor. Por todo ello, cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla. (Giraldo L., García V. y Moreno J.C. 2008).

La diferencia entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura, o arreglo de sus átomos. En el caso del carbón activo, éstos se encuentran combinados en forma de placas graníticas, que pueden representarse de acuerdo a la siguiente figura.

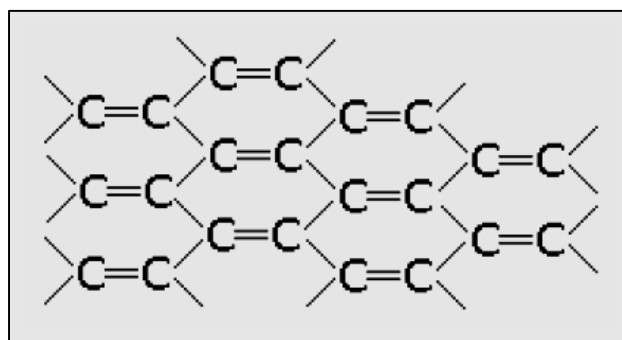


Figura N° 02. Formas de presentación de carbón activado. H. Marsh, in “Introduction to Carbon Science”, (H. Marsh, Ed.), 1, Butterworth, London (1989).

En las diferentes orientaciones que presenta las placas están separadas, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denominan poros, que brindan al carbón activo su principal característica: una gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente. El área de la mayoría de los carbones activados comerciales puede variar entre 500 a 1500 m²/g. (Kadirvelu K. 1998)

El carbón activado es un material de origen vegetal que se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener

sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución. (Kadirvelu K., 1998).

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos (tamaño inferior a 2nm) le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos (tamaño comprendido entre 2-50nm) y macroporos (tamaño >50nm) 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 (Smisek M., Cerny S. 1970). Por otra parte, el carbón activado 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 molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes, etc.), mientras que sustancias como el nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no se retienen por el carbón a temperatura ambiente. (Smisek M., Cerny S. 1970)

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 sólo 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. (Smisek M., Cerny S. 1970)

De acuerdo a las normas IUPAC, los poros cuyo tamaño no excede de 2 nm son llamados microporos, que son donde ocurre el fenómeno de adsorción en mayor medida, los que exceden de 50 nm son llamados macroporos, éstos juegan un papel importante en el transporte del adsorbato a través de los mesoporos hasta los microporos, los mesoporos son de tamaño intermedio a los valores

mencionados (entre 2 y 50 nm). El volumen de los microporos es en general mayor de 0,2 cm³/g pudiendo alcanzar elevados valores de área de superficie específica interna. (Aguapedia.Net, 2005).

b. Propiedades de carbón activado

El carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual lo podemos encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos. (Smisek M., Cerny S. 1970).

La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos le confieren 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. (Smisek M., Cerny S. 1970)

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 al 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 del adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón. (Smisek M., Cerny S. 1970)

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 sólo 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. (Smisek M., Cerny S. 1970)

c. Características físico-químicas

El término carbón activo designa un amplio espectro de materiales que se diferencian fundamentalmente en su estructura interna (distinción de poros y superficie específica) y en su granulometría. Desde el punto de vista de la composición química, el carbón activo es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo y los diversos carbones minerales o de leña. Todos ellos poseen la propiedad de adsorber, 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 están contenidas en un líquido o gas. La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75-80% en carbono, 5–10% en cenizas, 60% en oxígeno y 0,5% en hidrógeno. (Aguapedia.net, 2005)

d. Estructura física

El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito. Esta estructura que presenta el carbón activo da lugar normalmente a una distribución de tamaño de poro bien determinada. 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). (Aguapedia.net, 2005)

e. Tamaño de poros

El carbón activo tiene una gran variedad de tamaños de poros, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y poros de transporte. Los primeros consisten en espacios entre placas graníticas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.

Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaño, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0.1mm. En esta clase de poros, sólo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una

atracción mayor. Por lo tanto aunque tiene poca influencia en la capacidad del carbón activo afectan a la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción. (Aguapedia.net, 2005)

Otra clasificación de los poros, es el de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), que se basan en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente:

- Microporo: Menores a 2 nm
- Mesoporos: Entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: Mayores a 50 nm (típicamente de 200 a 2000 nm)

Los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes. Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son cloradas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica. Los mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores. (Aguapedia.net, 2005)

Por lo tanto, la capacidad de un carbón activo para retener una determinada sustancia no solo depende de su área superficial, sino también de la proporción de poros internos que tenga dicho carbón, y del tamaño de los mismos (un tamaño adecuado para un poro debe oscilar entre 1 y 5 veces el diámetro de la molécula a retener). La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación, y la duración del proceso de activación. (Aguapedia.net, 2005).

f. Importancia de la textura poros de los carbones activos

Los carbones activados, pueden presentar elevadas superficies específicas, del orden de 1000 m²/g e incluso llegar a los 3000 m²/g. Los elevados valores de superficie específica se deben en gran medida a la porosidad que presentan los materiales carbonosos, siendo los microporos los que mayor contribución tienen en la superficie específica. (Ullmann's, 1986).

En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica, mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, puesto que también deberíamos tener mayor número de espacios para adsorber el adsorbato. Sin embargo, esto no es siempre cierto, ya que debemos tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Así, dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato, puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros, y por tanto, no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas.

Por otro lado, también hay que tener en cuenta, tanto la geometría del poro, como la del adsorbato. Así, por ejemplo, determinadas moléculas pueden penetrar en poros con geometrías del tipo “rendija” y no hacerlo en poros de dimensiones similares y geometrías cilíndricas. (Aguapedia.net, 2005)

En numerosas ocasiones también se ha observado que determinados compuestos se adsorben muy bien en un cierto carbón activado, mientras que la adsorción es mucho menor en otros carbones activados, a pesar de poseer éstos una textura porosa, por ejemplo, una distribución de tamaños de poros y superficie específica, muy similar. Esto se debe al importante hecho de que: una elevada superficie específica, con una buena distribución de tamaños de poros que la hagan fácilmente accesible al adsorbato, es una condición necesaria, pero no suficiente, para optimizar la preparación de un carbón activado. Sin embargo, es necesario tener en cuenta otros factores. (Habit N. 2007)

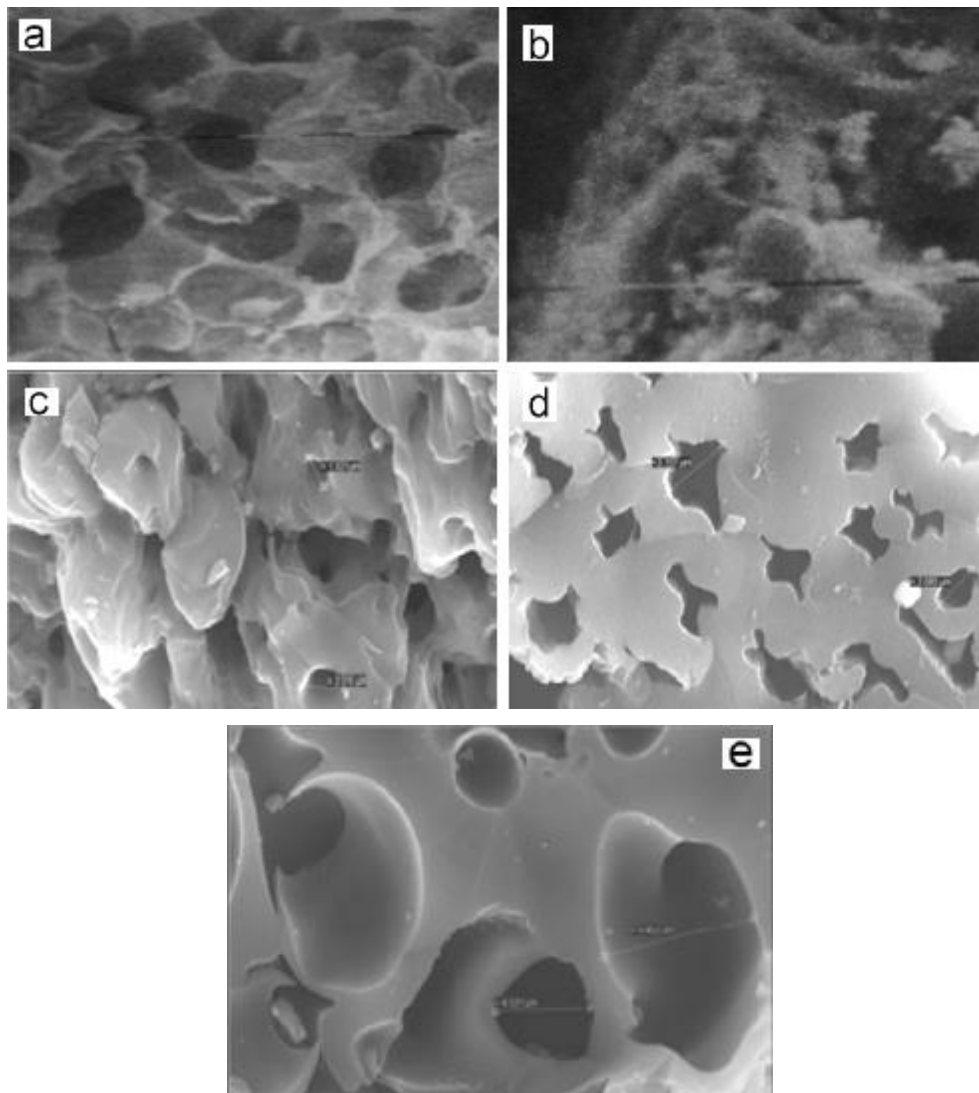


Figura N° 03. Carbón activado elaborado de vegetales Microscopía electrónica de barrido de carbón activado de (a) cáscara de nuez (b) semilla de olivo, (c) manojo de palma de aceite de palma, (d) cáscara de coco y (e) vástago de bambú M.A.Yahya et al./Renewable and Sustainable Energy Reviews 46(2015) 218-235 227

g. Importancia de la química superficial de los carbones activados

La superficie de los carbones puede encontrarse combinada en mayor o menor proporción con otros átomos distintos al carbono (heteroátomos), dando lugar a diferentes grupos superficiales.

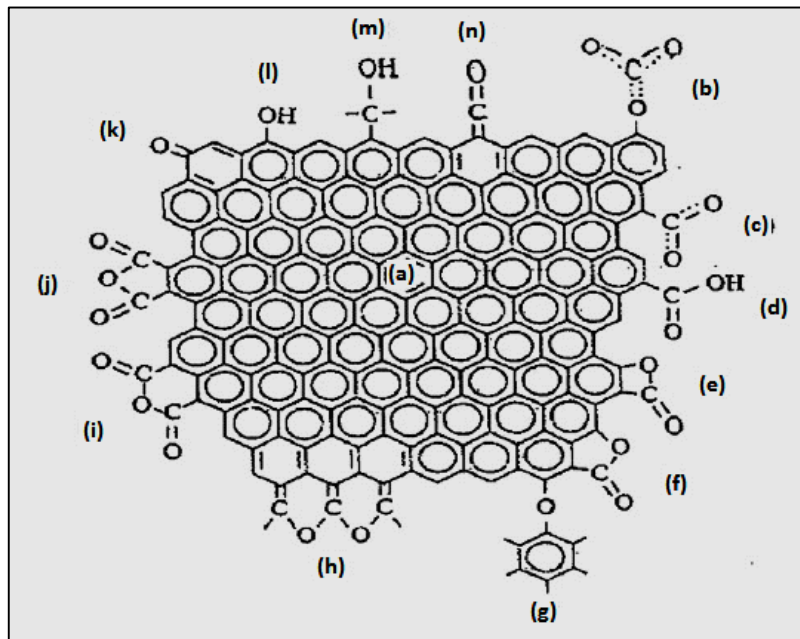


Figura N° 04. Superficie de carbón activado heteroátomo (a)Enlace aromático C = C; (b) y (c) carboxilo carbonatos, (d) ácido carboxílico, (e) lactosa (4 miembros); (F) lactosa (5 miembros), (g) oxidrilos aromáticos, (h) éter cíclico, (i) hidrato de cíclica (Anillo de 5 miembros), (j) hidrato de cíclica (anillo de 6 miembros), (k) quinina; (l) fenol, (m) alcohol y (n) cetona (Jabit N., 2007)

Por ejemplo, todos los carbonos presentan en principio un carácter hidrófobo, no obstante, podemos disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares.

Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante. Los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno. De esta forma se aumenta el carácter hidrófilo y la “mojabilidad” de los carbonos. (Habit N. 2007)

En el caso de la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa esto podría resultar beneficioso. Sin embargo, en el caso de que el carbón activado vaya a ser usado para adsorber compuestos en fase gas, el hecho de que los

poros estén ocupados, o incluso bloqueados, por moléculas de agua puede llegar a disminuir sustancialmente la capacidad de adsorción del carbón. De hecho este efecto combinado de oxidación/adsorción de humedad de los carbones activados se conoce como efecto de envejecimiento (ageing effect) y es algo a evitar en la medida de lo posible, especialmente para las aplicaciones en fase gas. (Aguapedia.net, 2005)

Otra faceta importante de la química superficial de un carbón activado es su naturaleza anfótera, lo cual significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico. (Aguapedia.net, 2005)

El que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá tanto de la concentración de estos grupos como de la fuerza como ácido o base de los mismos. De forma intuitiva, se puede deducir que un carbón de tipo básico será preferible para la adsorción de compuestos ácidos que un carbón de tipo ácido y viceversa.

Por otro lado, los grupos ácidos tienden a liberar protones, especialmente en los medios básicos, mientras que los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De esta forma pueden aparecer cargas positivas o negativas en la superficie del carbón. De forma genérica: si el pH del medio es mayor que el punto de carga cero del carbón ($pHPZC$, pH en el cual el número de cargas positivas es igual al de cargas negativas de forma tal que la carga neta sobre la superficie del carbón es cero), tendremos un predominio de las cargas negativas en la superficie del carbón; por el contrario, si $pH < pHPZC$ obtendremos una superficie cargada positivamente. Las condiciones en las que un carbón tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones. (Aguapedia.net, 2005)

Dado que el modificar el pH de los efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo es preferible optimizar la química superficial del carbón activado teniendo en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea máxima.

Optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón activo no siempre es una tarea sencilla máxime si tenemos en cuenta que la textura porosa y la química superficial pueden estar interrelacionadas. Por ejemplo, un aumento en el contenido en grupos superficiales oxigenados puede modificar la textura porosa de un carbón, ya que se pueden bloquear parte de los microporos lo que disminuye la accesibilidad al sistema poroso. Un tratamiento térmico a temperaturas elevadas para eliminar grupos superficiales puede también producir un colapso de la textura porosa disminuyendo también el volumen de poros. Así, a veces puede ser necesario llegar a soluciones de compromiso cuando se pretende optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón. (Aguapedia.net, 2005)

2.3.3. Elaboración de carbón activado

Para la elaboración de carbón activado se parte de materiales tales como las cortezas de almendros, nogales o palmeras, otras maderas y carbón mineral.

El carbón amorfo susceptible de activación puede ser vegetal o mineral:

- Carbones minerales:
- Antracitas
- Hulla bituminosa
- Lignito
- Turba
- Carbones vegetales:
- Madera (Pino, Acacia)
- Residuos de madera
- Cáscara de coco
- Bagazo
- Huesos de frutas

Aunque el carbón activo puede fabricarse a partir de un sin número de materiales carbonosos, solamente se utilizan unos cuantos, a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo coste, y a que los productos obtenidos a partir de ellos tienen

las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el carbón activo puede tener. (Aguapedia.net, 2005)

En la tabla 02 se muestran las principales materias primas y tecnologías de activación utilizados en la producción, así como la dureza y el tamaño de poro de los productos obtenidos.

Tabla N^o 02.

Propiedades de algunos carbones

MATERIA PRIMA	ACTIVACIÓN	RESISTENCIA(*)	TAMAÑO POROS
Madera de pino	Deshidratación (1)	30-50	Macroporo
Madera de pino	Térmica(2)	40-60	Mesoporo
Bituminoso	Térmica(2)	70-80	Mesoporo
Coco	Térmica(2)	90-99	Microporo

- 1 Típicamente con ácido fosfórico y en ocasiones con cloruro de zinc.
- 2 En atmósfera saturada de vapor de agua o con gases de combustión.
(+) Dureza resistencia a la abrasión.
Cortesía de Aguapedia.net 2005

Este carbón se obtiene calentando el material de que se trate al rojo vivo para expulsar los hidrocarburos, pero sin aire suficiente para mantener la combustión. A continuación, y con el objeto de activar el carbón formado se expone este a un gas oxidante a altas temperaturas. Este gas desarrolla una estructura porosa en el carbón natural favoreciendo la aparición de superficies internas. Las propiedades superficiales que se obtienen como resultado dependen del material inicialmente empleado y del proceso exacto de elaboración, de modo que las variaciones posibles son muchas. El tipo de material base con el que se produce el carbón activado también puede afectar al tamaño de los poros y a las características de regeneración del carbón activado. Tras el proceso de activación, el carbón se puede separar o dividir en diferentes tamaños con diferentes capacidades de adsorción. Los dos tipos de clasificación son: carbón activado en polvo y granular. (Aguapedia.net, 2005)

2.3.4. Factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el agua

- El tipo de compuesto que desea ser eliminado, los compuestos con elevado peso molecular y baja solubilidad se absorben más fácilmente
- La concentración del compuesto que desea ser eliminado, cuanto más alta sea la concentración, más carbón se necesitará.
- Presencia de otros compuestos orgánicos que competirán con otros compuestos por los lugares de adsorción disponibles.
- El pH del agua, por ejemplo, los compuestos ácidos se eliminan más fácilmente a pH bajos.

2.3.5. Usos del Carbón activado en el tratamiento de aguas residuales

La adsorción sobre carbón activo, es un método de tratamiento avanzado de agua residual que se emplea para la eliminación tanto de compuestos orgánicos refractarios, como de las concentraciones residuales de compuestos inorgánicos como nitrógenos, sulfuros y metales pesados.

Normalmente las aguas por encima de los lechos de carbón activo se disponen filtros de medio granular, con el objeto de eliminar la materia orgánica soluble asociada a los sólidos suspendidos presentes en efluentes secundarios. Las elevadas concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente provocan la aparición de depósitos en los granos de carbón, lo cual causa pérdidas de presión, canalización y obstrucción del flujo, y pérdida de capacidad de adsorción. Si la eliminación de la materia orgánica soluble no se mantiene a límites bajos, puede ser necesario aumentar la frecuencia del proceso de regeneración del carbón. La variabilidad en las condiciones de pH, temperatura y caudal también pueden afectar al rendimiento del carbón activado. (Marsh H., 1989).

2.4. Definición de términos básicos.

Absorción, es un proceso fisicoquímico el cual átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra incorporándose al volumen de la segunda fase.

Adsorción, es un fenómeno fisicoquímico por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son atrapados o retenidos en una superficie

Activación, mejorar la capacidad y selectividad de la superficie del carbón.

Adsorbato, es un contaminante soluble contenido en agua y es eliminado mediante adsorción.

Apolar, moléculas neutras, no tienen carga eléctrica, o no tienen orientación polar por carecer de carga eléctrica.

Ácido, son sustancias que ayudan a disolver a otras sustancias inorgánicas (metales) con agua, o sustancias capaces de liberar iones de hidrógeno con carga positiva.

Aniones, partículas con carga eléctrica negativa, presentes en una solución acuosa.

Bagazo, residuo de la caña.

Base, sustancias capaces de captar iones hidrógeno con carga positiva (protones), o proporcionan electrones.

Catión, partículas con carga positiva.

Coloide, es un sistema conformado por dos o más fases, una fluida (líquido) y otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas muy finas.

Ion metálico, partículas metálicas con carga positiva, que se encuentran en una solución ácida.

Disolvente, sustancia química que diluye un sólido.

Heteroátomos, sustancias formados por átomos diferentes.

Hidrófobo, sustancias que rechazan al agua

Hidrófilo, sustancias que se mojan con facilidad con el agua.

Polar, moléculas con carga positivo y negativo.

Macro poro, tamaños de poros mayores a 2 nanómetros (nm)

Micrópilo, tamaño de poros inferiores a 2 nanómetros (nm)

Microcristalina, cristales observados al microscopio.

Solvente, es una sustancia que puede disolver, donde la mezcla homogénea entre un solvente y un soluto se le conoce como solución.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

En el tratamiento de aguas residuales procedentes de .la lixiviación de cobre, que tienen contenido de metales deben ser removidos mediante adsorción con carbón activado.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- a. La caracterización del carbón activado se realizará mediante un método adecuado.
- b. La caracterización del efluente es imprescindible para aplicar un proceso de agitación con carbón activado.
- c. Se debe seleccionar los factores más importantes para llevar a cabo la operación.
- d. Se debe establecer los factores que optimicen el proceso usando herramientas adecuados.

3.2. Definición conceptual de variables

Variable dependiente (Y1): Degradación del contenido de un metal pesado contenido en agua residual, en la disolución o lixiviación ácida, para obtener cobre como solución líquida de sulfato de cobre, en el agua residual quedan muchos metales como: cobre, fierro y otros metales pesados, que depende de la naturaleza del mineral tratado.

Variables Independientes:

- a. **Agua residual (x1)**, se le conoce también como variable de entrada, es una variable controlante, por lo tanto no se puede prescindir, proporciona la cantidad de metal(es) que contiene éste.
- b. **Carbón activado (x2)**, también es variables controlantes, proporciona el área disponible sobre el cual debe fijarse el metal a degradarse del contenido de agua residual.

c. **Variables de operación**, selecciona el investigador basado en criterios teóricos conceptuales y tipo de operación, entre ellos se consideran:

- Temperatura (x3)
- Velocidad del agitador (x4).
- Grado de acidez o pH (x5)
- Tamaño de partícula del carbón (x6).

3.2.1. Operacionalización de variables

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICION	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
VARIABLE DEPENDIENTE (Y)				
Tratamiento de aguas residuales de lixiviación de cobre.	Es agua drenado después de extraer el cobre disuelto por lixiviación, que todavía tienen contenido de metales pesados.	Cantidad de metal removido del efluente, condicionado a factores de operación	Contenido metálico en carbón activado.	Porcentaje, gramos por litro de metal o porcentaje (%)
VARIABLE INDEPENDIENTE				
Caracterización de carbón.	Identificar las características físicas del carbón usado en el proceso.	Superficie disponible para la adsorción.	Área	M ²
Caracterización de efluente.	Identificar las características físico químicas del efluente.	Concentración de metales en efluente.	Contenido de metal disuelto por volumen de efluente.	g/i
Factores que intervienen en el proceso.	Selección de factores más relevantes para obtener respuestas óptimas del proceso.	Rango de valores asignados a cada factor que interviene en el proceso.	Temperatura	°C
			pH	1 a 7
			Velocidad de agitación	RPM
			Tamaño de grano de carbón	N° malla del tamiz
			Tiempo requerido para la operación	Minutos u horas

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de Investigación

La investigación se considera como cuantitativa, se ha seguido un procedimiento de recolección de datos, con la obtención de resultado de la medición numérica del comportamiento de variables independientes, para proporcionar respuestas a la variable dependiente, mediante el diseño experimental a partir de la hipótesis planteada, luego se ha inferido estadísticamente estos resultados, para probar que las variables seleccionadas han sido adecuadas mediante comparación de medias y para lo cual se ha elaborado un método y estrategia del desarrollo del proceso.

4.2. Método de la investigación

Es experimental, por lo que, la secuencia de operaciones se describe en forma ordenada:

Se ha preparado la muestra lixiviando un mineral oxidado de cobre, procedente de Nazca, luego se ha precipitado el cobre con polvo de fierro metálico, en las plantas industriales se retroalimenta, por lo que el agua residual final ciertas características como en la tabla 04, a partir de la lixiviación de minerales de 03.

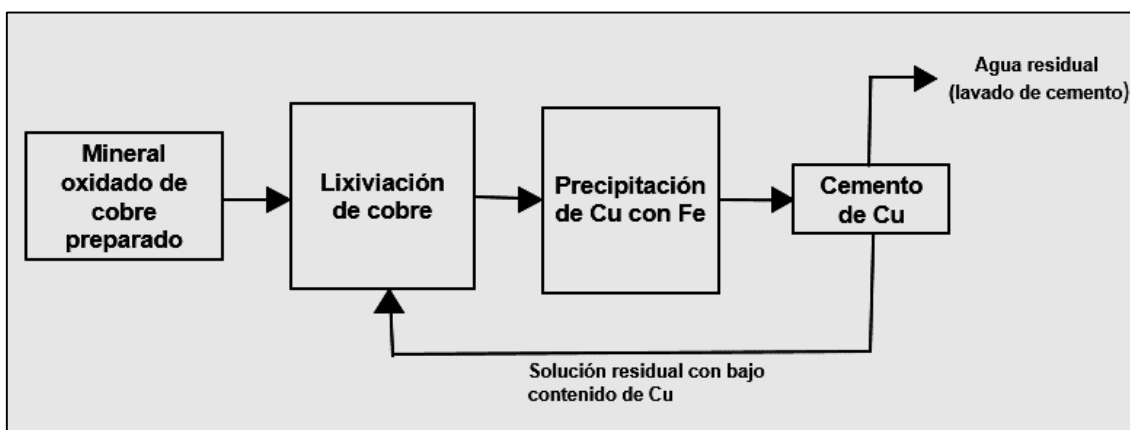


Figura N° 05. Agua residual de lixiviación ácida de cobre

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Población y muestra

La muestra se refiere al agua residual (lavado de cemento de cobre)



Figura N° 06. Muestra de minerales oxidados de cobre para lixiviar
Fuente: Fotografía tomada 2008 por el autor.



Figura N° 07. Fotografía de cobre lixiviado y agua residual obtenida
Fuente: Elaboración propia en laboratorio de operaciones y procesos unitarios de FIQ- UNAC. 2008

- (a) Solución lixiviada de cobre, (b) Agua residual después de precipitación de cobre

Del mineral oxidado de cobre del cual procede nuestra muestra efluente tiene las siguientes características, mostrada en la figura 07.

TABLA N° 03. ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERAL

ELEMENTO	Cu tot.	CuOx	Pb	Zn	Au (*)	CO2	SiO2	Fe	CaO	S
Contenido (%)	4.2	3.82	0.04	0.03	<0.005	0.4	37.5	24.24	18	0.12

Fuente: Realizado en laboratorio MILAB. 2008.

(*) Onza/Ton

Tabla N° 04. Caracterización del efluente

Parámetro	Cantidad	Unidad
Sólidos suspendidos	148.4	ppm
pH	2.5	Escala
Conductividad	1320	μS-cm
Temperatura	20	°C
Cobre total	23	ppm
Fierro total	146	ppm

Fuente: Elaboración propia

4.4. Lugar de estudio y período desarrollado

Universidad Nacional del Callao. Laboratorio de operaciones y procesos unitarios (LOPU) de la Facultad de Ingeniería Química.

Período: 01-04-2019 a 31-03-2020.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la Información.

. Materiales y equipos

N°	Materiales	Cantidad	Unidad
1	Agua residual (muestra)	10	litros
2	Carbón activado preparado	5	Kg.
3	Carbonato de sodio	25	gramos
4	Cloruro de sodio	5	gramos

5	Solución buffer (pH=4)	50	ml
6	Solución buffer (pH=7)	51	ml
7	Ácido sulfúrico	20	ml
8	Agua destilada	5	litros

Procedimientos.

Caracterización de carbón activado

Antes de comenzar el proceso de adsorción, es preciso seleccionar los materiales adsorbentes para sugerir el tipo de carbón activado (CA), para el tipo de efluente que se tiene con contenido de cobre y hierro mayoritariamente, para lo cual se ha recurrido a algunos materiales ya estudiados y comerciales, la selección se hizo en base a la capacidad de adsorción o sea cantidad de carbón activado usado por la cantidad de sustancia eliminada y también la mayor disponibilidad de materiales para obtener el CA requerida.

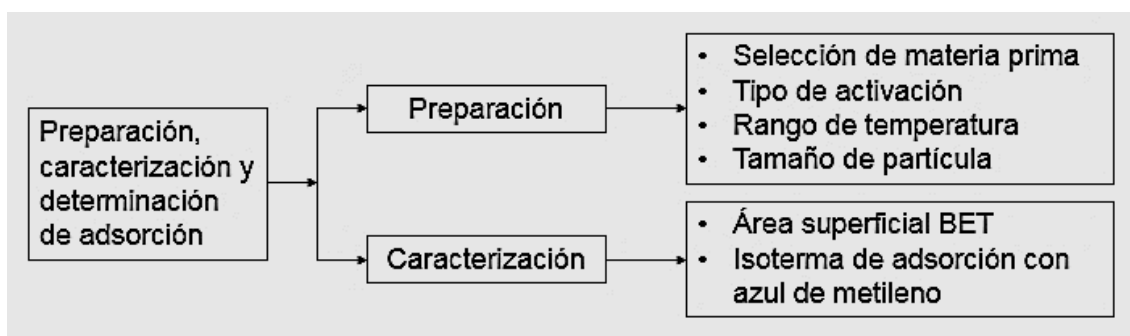


Figura N° 08. Secuencia de preparación de CA

Fuente: Elaboración propia

Para este tipo de aplicaciones, muchos estudios como Fernández M.L. (2011), que realizó estudio sobre CA procedente de pino pátula, entre otros la mayoría recomiendan como precursores de CA a vegetales de corteza dura y resistentes, y con el potencial de efectividad asociado para retener los contaminantes objetivos a depurar.

Procedimiento de activación

La preparación de un carbón está direccionada de acuerdo al uso y aplicación, para la eliminación de metales disueltos en efluentes residuales, Fernández M.L.

(2011) sugiere un procedimiento de aplicación generalizado, que consiste de cuatro etapas:

1. Reducción de tamaño del material de origen, malla +14 Tyler.
2. Impregnación se realiza con una solución de 10% en volumen de ácido fosfórico H_3PO_4 , con factor de impregnación de 30 a una temperatura de $90^\circ C$, durante 10 horas.
3. Activación se somete a una atmósfera inerte de nitrógeno a un flujo de 100 ml/min, incrementando la temperatura $5^\circ C$ cada minuto aproximadamente hasta estabilizar en $400^\circ C$, durante 2 horas.
4. Lavado del material activado, esta operación se realiza con agua destilada hasta un pH neutro.

Tabla N° 05. Características de CA Estándar europea EN 12915

Densidad aparente del CA preparado	440 Kg/m ³
Área total (método BET)	900 m ² /g aprox.
Dureza	> 90%
Cloruro migración medio	4 cm
Granulometría	0.4 a 1.7 mm
Humedad promedio	< 5% en peso
Ceniza	< 15 %
Adsorción de lodo	1000 +- 50 mg/g

Fuente: Para este caso se ha utilizado un carbón comercial Hydriffin 40 N un carbón activado (CA) granular

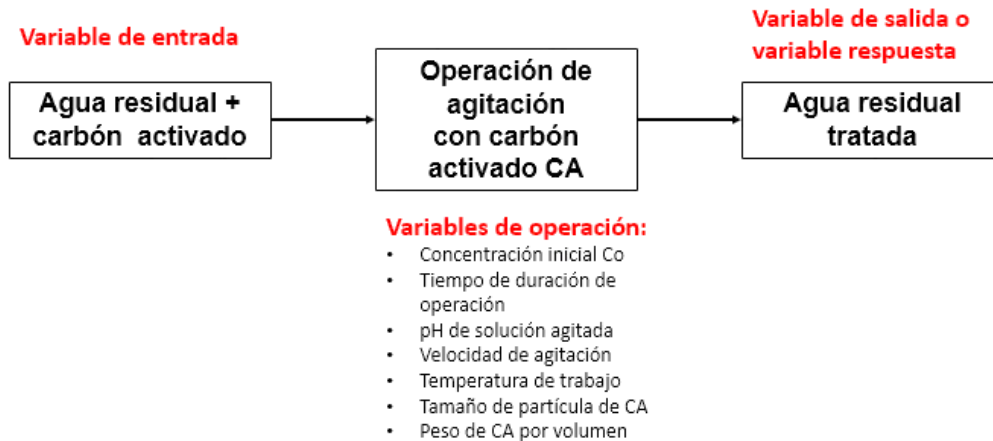


Figura N° 09. Diagrama simplificado del proceso

Fuente: Elaboración propia

Se ha realizado la descripción y fundamentos del método seleccionado para ejecutar las pruebas experimentales, incluyendo los cálculos a base de los modelos o ecuaciones del método elegido cuyo procedimiento secuencial será lo siguiente:

1. Preparación de agua residual a diferentes concentraciones, para la prueba experimental.
2. Preparación y caracterización de carbón activado, mediante un tratamiento físico químico, usando los protocolos correspondientes.
3. Realizar las operaciones complementarias de adecuación del equipo principal.
4. Preparar y seleccionar los variables de operación de acuerdo al diseño experimental y elaborar un formato especial para el control y medición.
5. Durante la operación realizar el control de tiempo, tomando muestras en cada intervalo de tiempo, para cada concentración del agua residual, el número de mediciones se debe realizar de acuerdo al protocolo establecido.

6. Realizar un mínimo de tres réplicas de cada prueba experimental, en caso de obtenerse incongruencias en los resultados, se debe replicar hasta obtener mediciones similares.
7. Terminados la operación experimental, se debe procesar los resultados y realizar comparaciones y contrastar con la teoría y otros referentes, para validar los resultados.



Figura N° 10. Ejecución del proceso

Fuente: Fotografía tomado en Laboratorio LOPU-UNAC. Agosto 2019

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para la recolección de los datos experimentales, se ha ejecutado de acuerdo al diseño experimental presentado en el plan de tesis, (ver anexo), para lo cual se ha usado técnicas e instrumentos de medición, en cada experimento se tiene lo siguiente en orden:

Técnicas

1. Variando factor tiempo

Volumen del efluente en (ml)

pH del efluente

Peso del carbón en (g)

Tamaño de partícula del CA (μm) o número de tamiz.

Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)

Velocidad de agitación (RPM)

Tiempo (minutos)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)
0	Co	Co
30	Cf	Cf
60	Cf	Cf
90	Cf	Cf
120	Cf	Cf
150	Cf	Cf
180	Cf	Cf

Durante la ejecución del experimento cada 30 minutos se toma una alícuota de 1 ml para diluir en 100 ml de agua des ionizada, para el respectivo análisis de cobre y hierro en laboratorio por absorción atómica.

2. Variando factor peso de adsorbente CA

Volumen del efluente en (ml)

pH del efluente

Tamaño de partícula del CA (μm) o número de tamiz.

Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)

Velocidad de agitación (RPM)

Tiempo crítico (180 minutos)

Concentración inicial del efluente preparado (mg/l)

Peso de CA (g)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)
5	Cf	Cf
10	Cf	Cf
15	Cf	Cf

En este caso se ha trabajado para un volumen definida de 1000 ml de efluente con una alícuota de 10 ml de muestra original, para cada peso de CA, en algunos casos se ha replicado hasta 3 veces, este experimento se combina con el factor tiempo.

3. Factor pH

Volumen del efluente en (ml)

Peso de CA (g)

Tamaño de partícula del CA (μm) o número de tamiz.

Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)

Velocidad de agitación (RPM)

Tiempo crítico (180 minutos)

Concentración inicial del efluente preparado (mg/l)

pH	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)
2.5	Cf	Cf
5	Cf	Cf
6.7	Cf	Cf

Al igual que los demás experimentos se ha mantenido constante la temperatura del efluente (ambiental), la velocidad de agitación de 800 RPM, el volumen de agitación de 1000 ml, este experimento también se combina con el factor tiempo.

Instrumentos

Durante la experimentación se ha utilizado instrumentos de medición en forma directa, como:

1. Balanza analítica de 1000 g de precisión, para medir el peso de carbón activado a diferentes diluciones.
2. pH-metro, electrónico en forma de cátodo, cuya calibración se con solución buffer pH 4 y 7, para medir y trabajar a diferentes pH, al efluente muestra.
3. Instrumento electrónico similar al pH-metro para medir partículas suspendidas.
4. Buretas de precisión para tomar una muestra alícuota durante intervalos de tiempo de cada experimento, asimismo fiolas de 100 ml para recibir y precisar el volumen de las muestras para análisis de laboratorio.
5. Tamices de malla 500 1000 μm , para medir tamaño de partícula del CA.
6. Termómetro para medir la temperatura de trabajo.
7. El agitador tiene incorporado medidor de velocidad de agitación hasta 1200 RPM.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados experimentales

Tabla N° 06. Concentración de Cu y Fe a diferentes concentraciones iniciales.

Volumen del efluente: 1000 ml

pH del efluente: 2.7

Peso del carbón: 30 g

Tamaño de partícula del CA: 1000 μ m.

Temperatura de trabajo: 18 °C

Velocidad de agitación: 800 RPM

Para diferentes concentraciones iniciales (C_i)

t (horas)	COBRE			FIERRO		
	C1(ppm)	C2(ppm)	C3(ppm)	C1(ppm)	C2(ppm)	C3(ppm)
0	23	10	3.4	146.7	90.32	30.28
1	21	8.72	3.15	122.3	82.3	24.3
2	12	3.82	1.75	36	22.3	14.32
3	9	1.8	0.82	24	14.8	6.24
4	8	1.4	0.81	23.12	13.72	5.62

Fuente: Elaborado en base a los análisis de laboratorio anexo

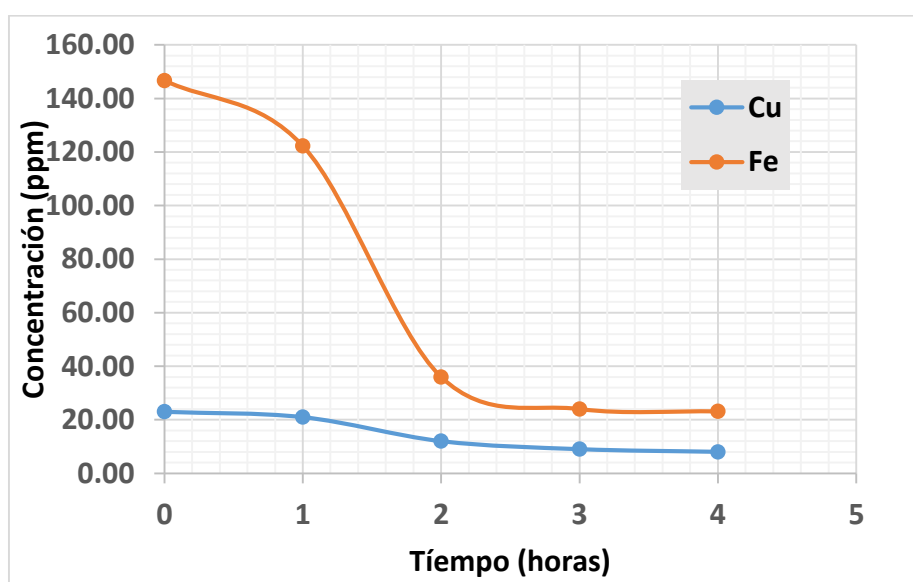


Figura N° 11. Concentración de Cu y Fe vs tiempo de operación

Fuente: Elaborado en base a la tabla 6

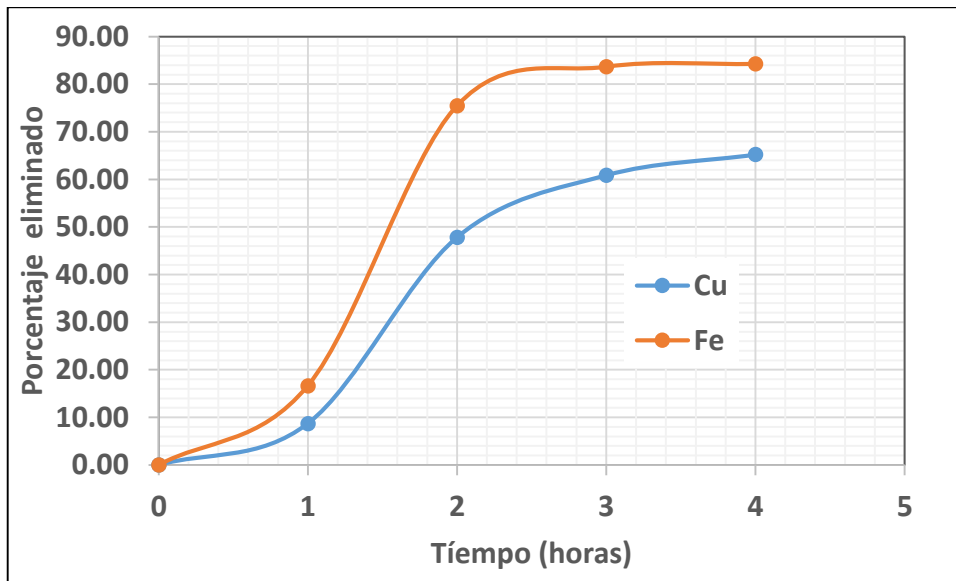


Figura N° 12. Porciento de remoción de Cu y Fe vs tiempo de operación

Fuente: Elaborado en base a la tabla 6

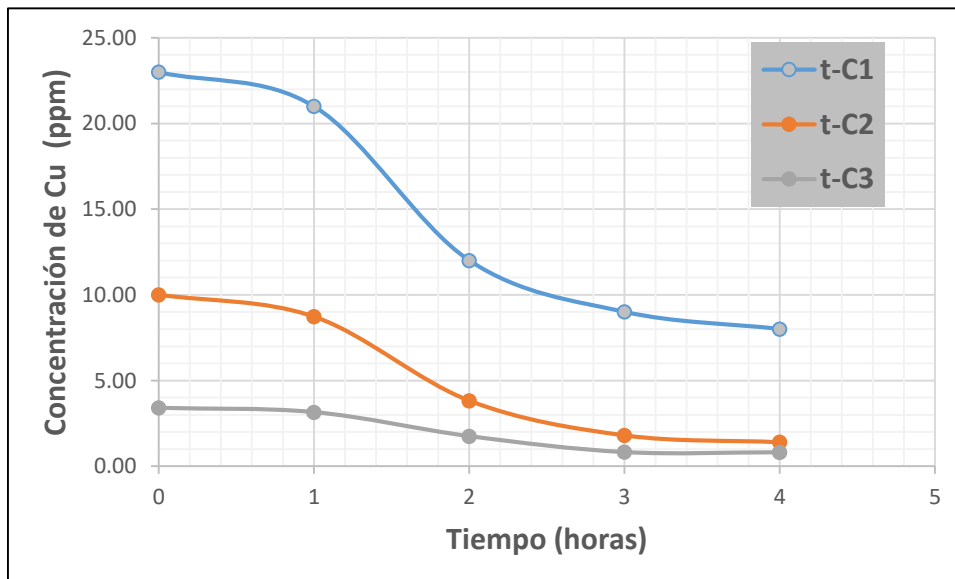


Figura N° 13. Concentración de Cu vs tiempo de operación a diferentes concentraciones iniciales. Fuente: Elaborado en base a la tabla 6

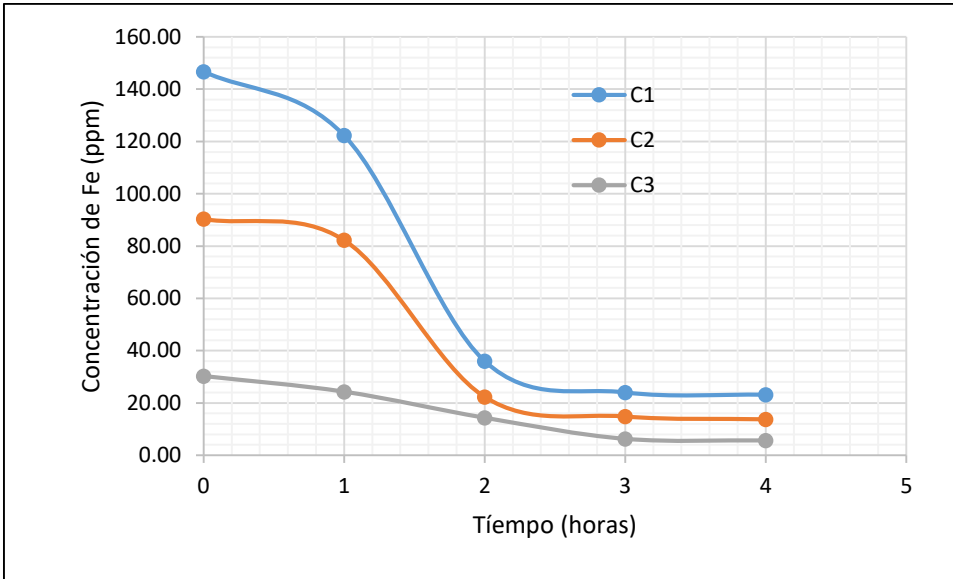


Figura N° 14. Concentración de Fe vs tiempo de operación a diferentes concentraciones iniciales. Fuente: Elaborado en base a la tabla 6

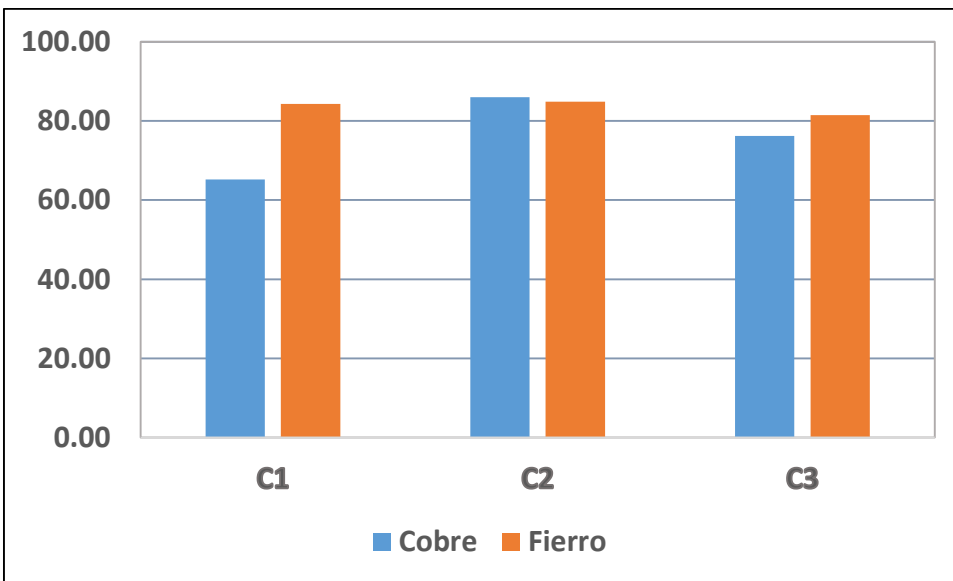


Figura N° 15. Comparación en las concentraciones finales de Cu y Fe vs tiempo de operación a diferentes concentraciones iniciales. Fuente: Elaborado en base a la tabla 06

Tabla N° 07. Resultados de pH versus Concentración

Volumen del efluente: 1000 ml

Peso del carbón: 30 g

Tamaño de partícula del CA: 1000 µm.

Temperatura de trabajo: 18 °C

Velocidad de agitación: 800 RPM

t (horas)	COBRE			FIERRO		
	2.7	5.5	6.9	2.7	5.5	6.9
0	23.00	23.00	23.00	146.70	146.70	146.70
1	15.8	18.00	21.00	65	82.30	102
2	7.2	9.00	12.00	14.32	30.00	65
3	4.3	6.40	9.00	6.24	20.00	60
4	3.8	5.50	8.00	17.6	44.00	102.7

Fuente: Resultados de laboratorio de análisis químico

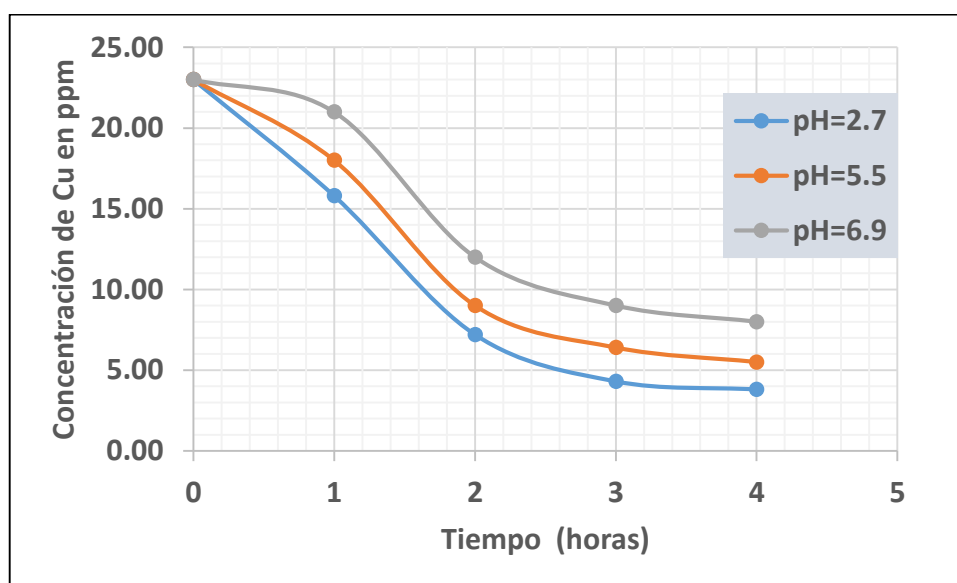


Figura N° 16. Concentración de Cu versus tiempo a diferentes pH

Fuente: Elaborado en base a la tabla 07

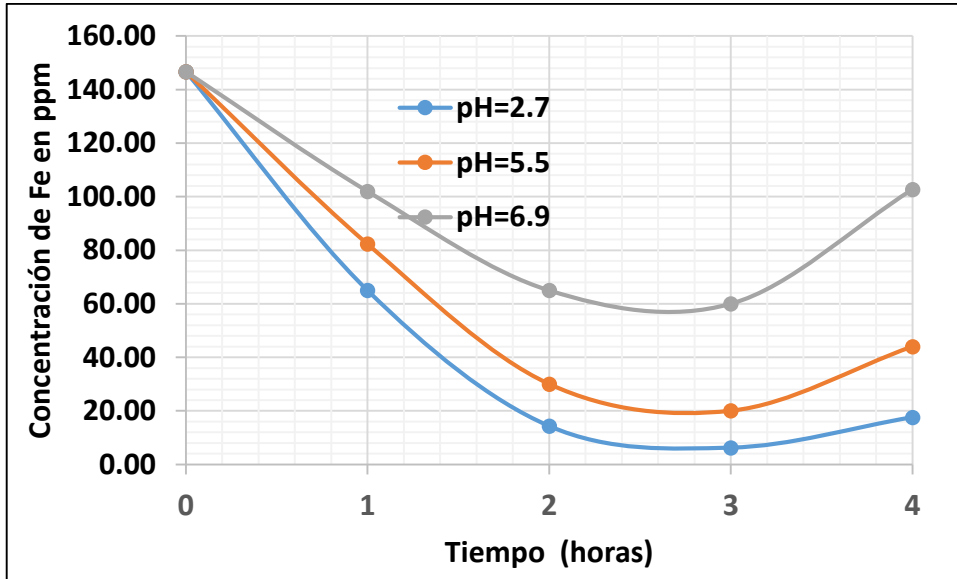


Figura N° 17. Concentración de Fe versus tiempo a diferentes pH.

Fuente: Elaborado en base a la tabla 7

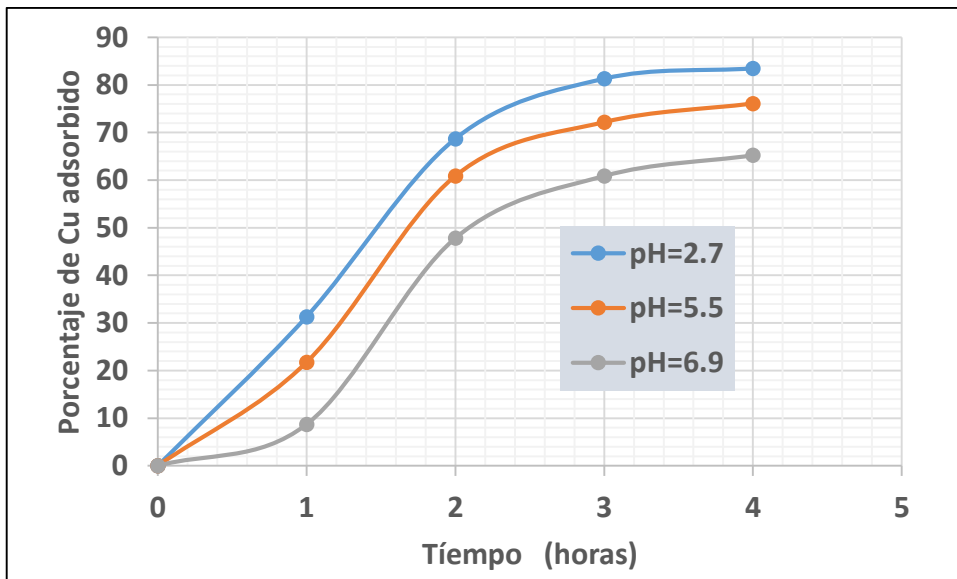


Figura N° 18. Porcentaje de Cu removido versus tiempo a diferentes pH

Fuente: Elaborado en base a la tabla 7

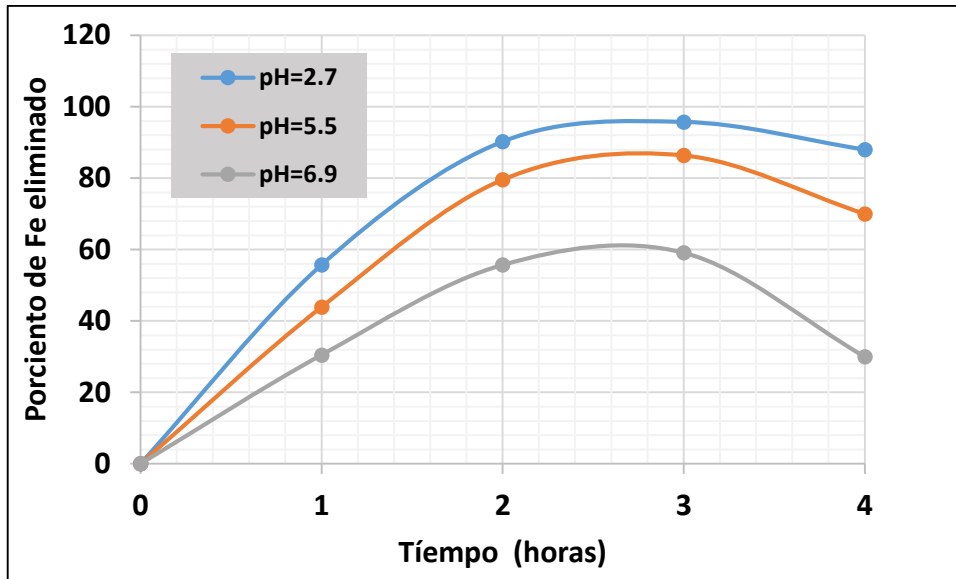


Figura N° 19. Porcentaje de Fe removido versus tiempo a diferentes pH

Fuente: Elaborado en base a la tabla 7

Tabla N° 08. Cantidad de CA utilizado a diferentes diluciones

Volumen del efluente: 1000 ml

pH del efluente: 2.7

Tamaño de partícula del CA: 1000 µm.

Temperatura de trabajo: 18 °C

Velocidad de agitación: 800 RPM

Tiempo de operación: 4 horas

Peso CA (g)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Cu %	Fe %
10	19.00	115.00	0.17	0.22
20	16.00	90.00	0.30	0.39
30	15.00	70.00	0.35	0.52
40	13.50	60.00	0.41	0.59
50	12.00	45.00	0.48	0.69
60	11.20	40.00	0.51	0.73
70	10.80	30.00	0.53	0.80
80	9.60	20.00	0.58	0.86
90	9.40	18.00	0.59	0.88
100	8.70	15.00	0.62	0.90

Fuente: Resultado de análisis de laboratorio

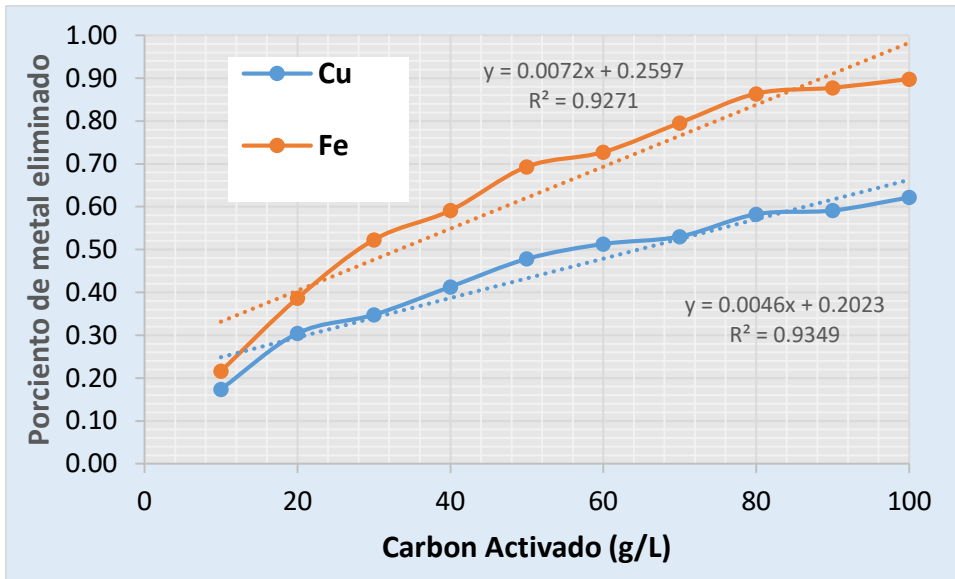


Figura N° 20. Obtención de las isotermas de CA utilizado.

Fuente: Elaborado en base a la tabla 08

Tabla N° 9. Parámetro de las Isotermas de modelo Freundlich

	K	n	R ²
Cu	0.0076	0.7451	0.9727
Fe	0.4578	2.5240	0.9815

Fuente: Obtenido a partir de la figura 20

5.2. Resultados inferenciales.

Se debe comprobar que las variables propuestas, para obtener los resultados de la variable dependiente, en presente trabajo han sido elegidas en forma acertada, se realiza por comparación de medias, con una hipótesis alterna que por lo menos en alguna de las variables las medias son diferentes, si es así entonces las variables elegidas correlación con variable dependiente, con una confiabilidad de 95% o sea un $p > 0.05$, usando el estadístico ANOVA, utilizando el software Minitab.

Factores:

Concentración final (C)

Concentración inicial (Co)

Tiempo (t)

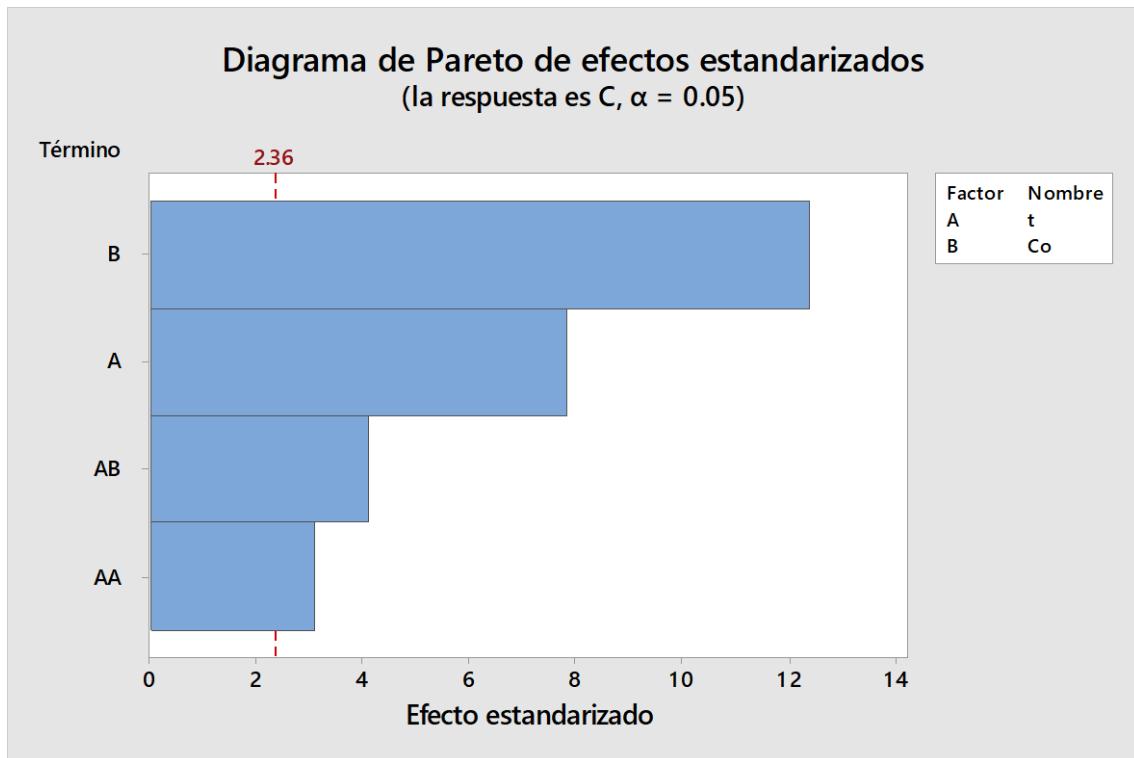


Figura N° 21. Diagrama de Pareto para cobre

Fuente: Elaborado en base a la tabla 6

Tabla N° 10. Regresión factorial para Cu: Cf vs. t, Co. Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	393.13	98.282	58.45	0.000
Lineal	2	360.73	180.367	107.27	0.000
t	1	103.12	103.125	61.33	0.000
Co	1	257.61	257.609	153.21	0.000
Cuadrado	1	16.08	16.078	9.56	0.018
t*t	1	16.08	16.078	9.56	0.018
Interacción de 2 factores	1	28.35	28.348	16.86	0.005
t*Co	1	28.35	28.348	16.86	0.005
Error	7	11.77	1.681		
Total	11	404.90			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.29668	97.09%	95.43%	86.10%

Ecuación de regresión para el cobre

$$C = 5.95 - 6.20 * t + 0.991 * Co + 1.157 * t^2 - 0.1688 * t * Co \quad (1)$$

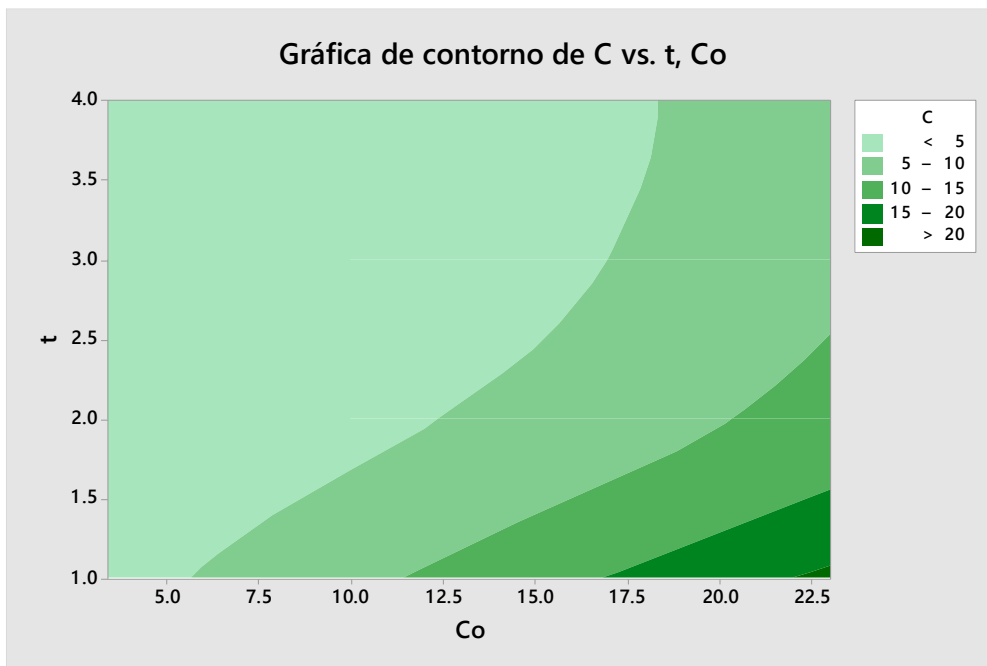


Figura N° 22. Superficie respuesta para Cobre

Fuente: Elaborado en base a la ecuación (1)

Gráfica de superficie de C vs. t, Co

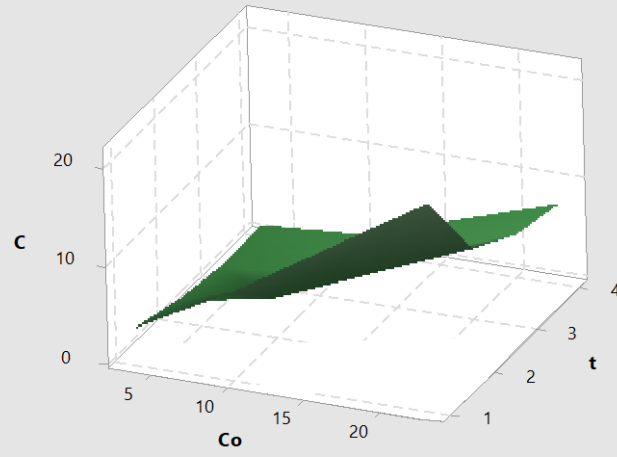


Figura N° 23. Superficie respuesta 3D para cobre

Fuente: Elaborado en base a la ecuación (1)

Factores: Para el Fierro

Concentración final (C)

Tiempo (t)

pH

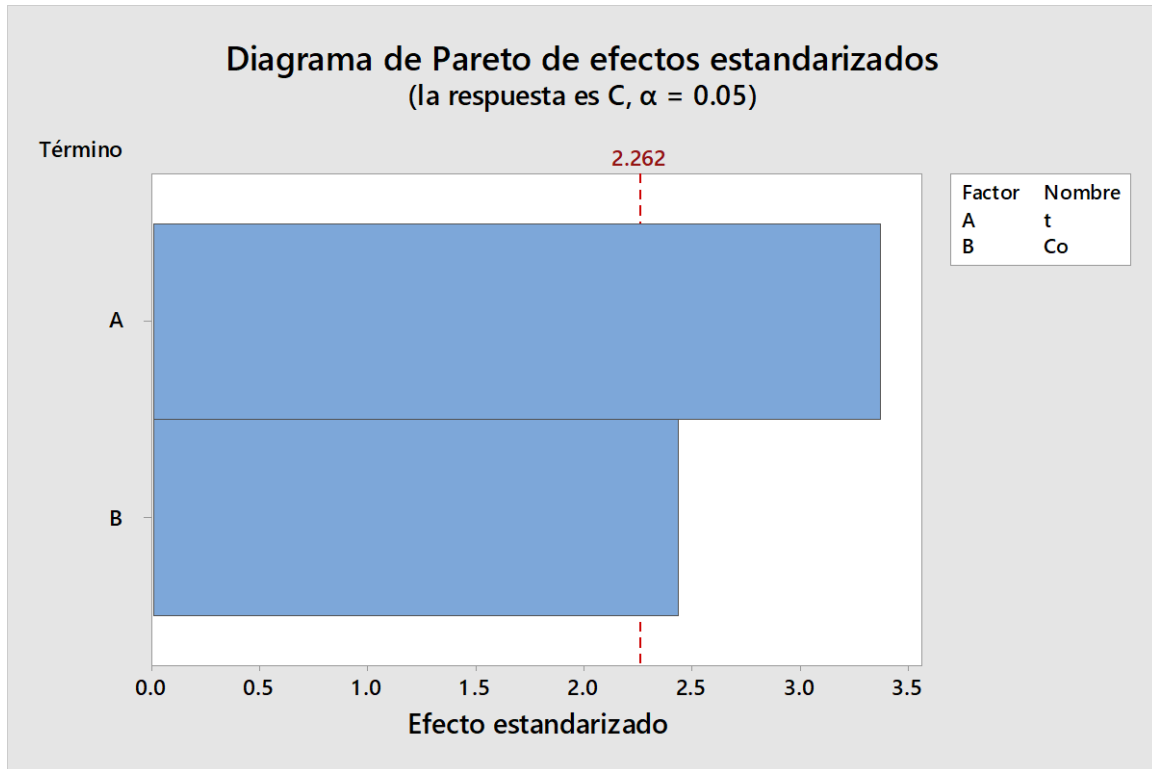


Figura N° 24. Diagrama de Pareto para Fierro

Fuente: Obtenido por medio de diseño de 2 niveles.

Tabla N° 11. Regresión factorial: Para Fe, C vs. t, Co

SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F
8745	4372.4	8.65
8745	4372.4	8.65
5741	5740.9	11.35

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	GL	Valor p
Modelo	2	0.008
Lineal	2	0.008
t	1	0.008

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
22.4883	65.77%	58.16%	30.15%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = 51.7 - 19.56 * t + 0.333 * Co \quad (2)$$

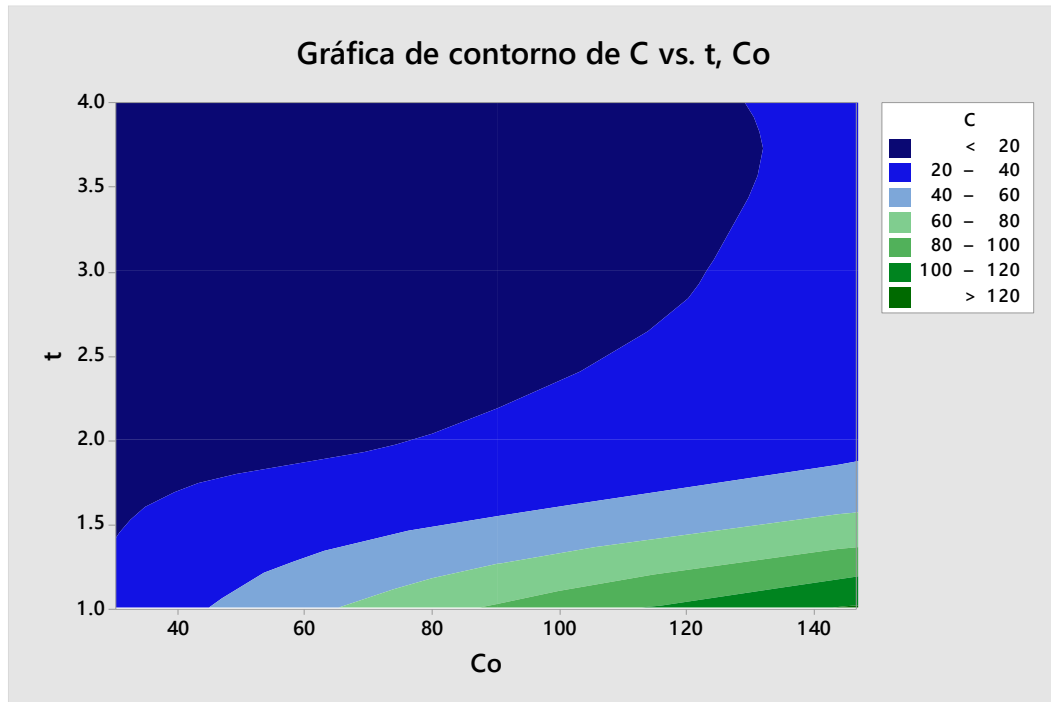


Figura N° 25. Superficie respuesta para Hierro

Fuente: Elaborado en base a la ecuación (2)

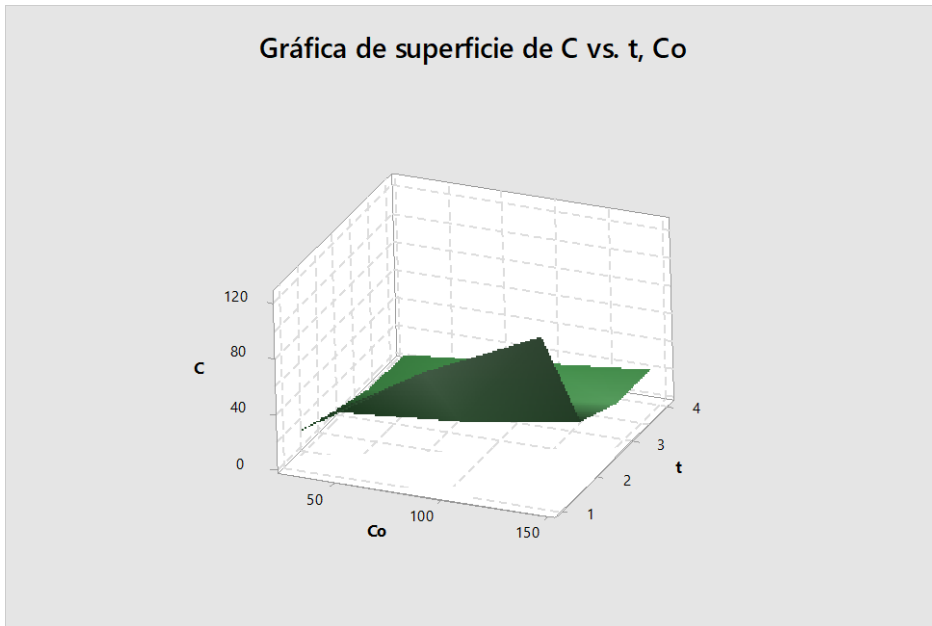


Figura N° 26. Superficie respuesta 3D para Hierro

Fuente: Elaborado en base a la ecuación (2)

Tabla N° 12. Regresión factorial: Para cobre C vs. t, pH

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	5300.0	2650.0	22.48	0.000
Lineal	2	5300.0	2650.0	22.48	0.000
t	1	4541.4	4541.4	38.52	0.000
pH	1	758.6	758.6	6.44	0.032
Error	9	1061.0	117.9		
Total	11	6361.0			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
10.8575	83.32%	79.61%	68.92%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = 35.9 + 17.40 * t - 4.55 * pH \quad (3)$$

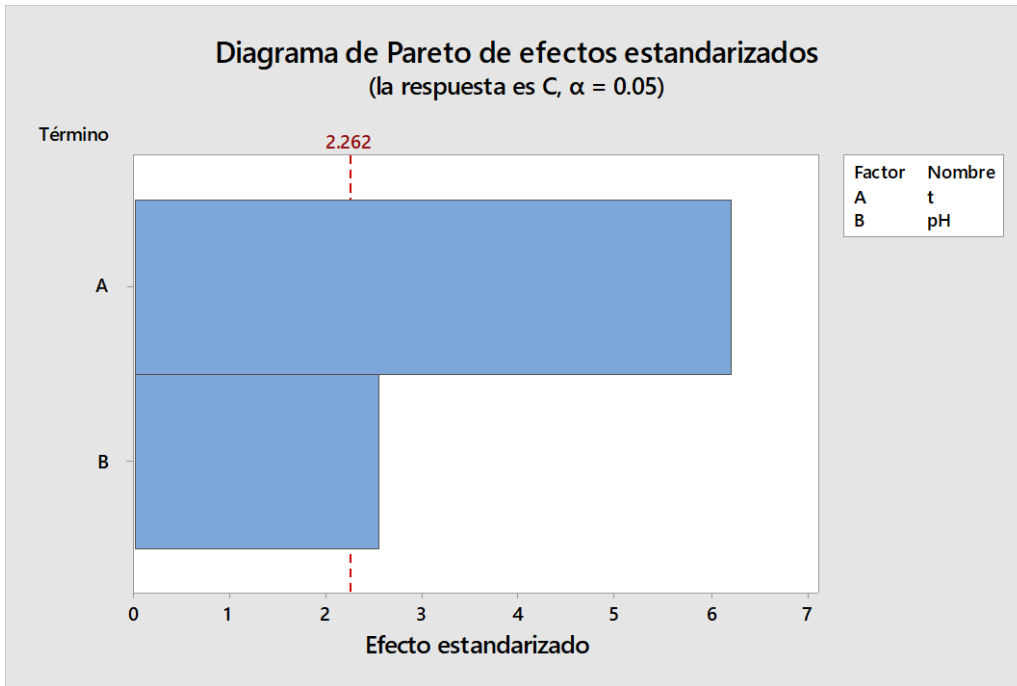


Figura N° 27. Diagrama de Pareto para el cobre

Fuente: Elaborado en base al diseño de dos niveles para Cu

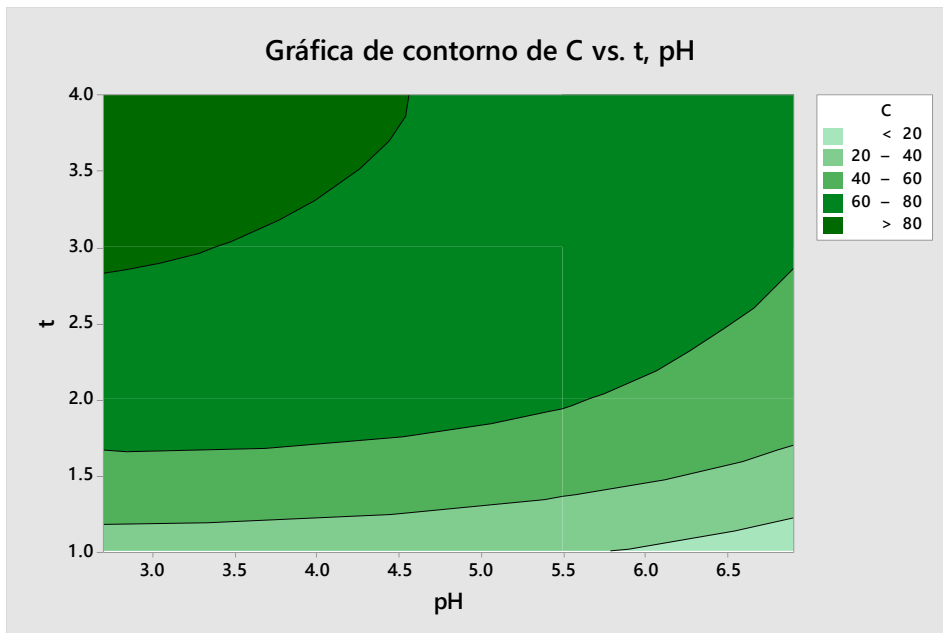


Figura N° 28. Superficie respuesta para Cu

Fuente: Obtenido a partir de la ecuación (3)

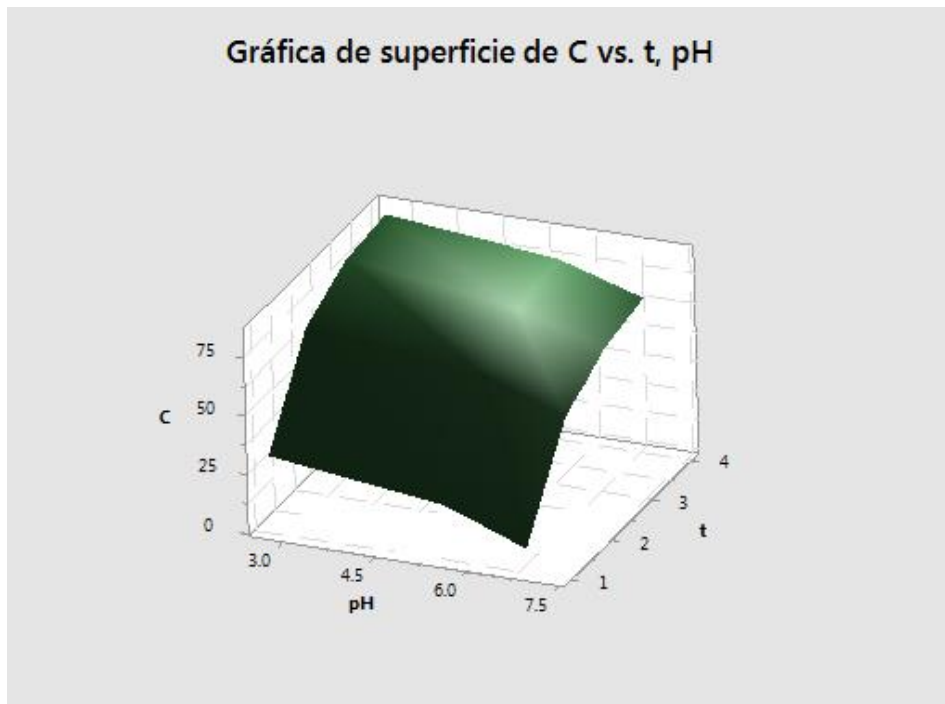


Figura N° 29 Superficie respuesta 3D

Fuente: Obtenido a partir de la ecuación (3)

**Tabla N° 13. Regresión factorial: Para el Fierro C vs. t, pH
Análisis de Varianza (ANOVA)**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	3453.5	1726.7	16.03	0.004
Lineal	2	3453.5	1726.7	16.03	0.004
t	1	2053.5	2053.5	19.06	0.005
pH	1	1400.0	1400.0	12.99	0.011
Error	6	646.5	107.7		

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
10.3803	84.23%	78.98%	65.79%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = 65.3 + 18.50 * t - 7.14 * pH \quad (4)$$

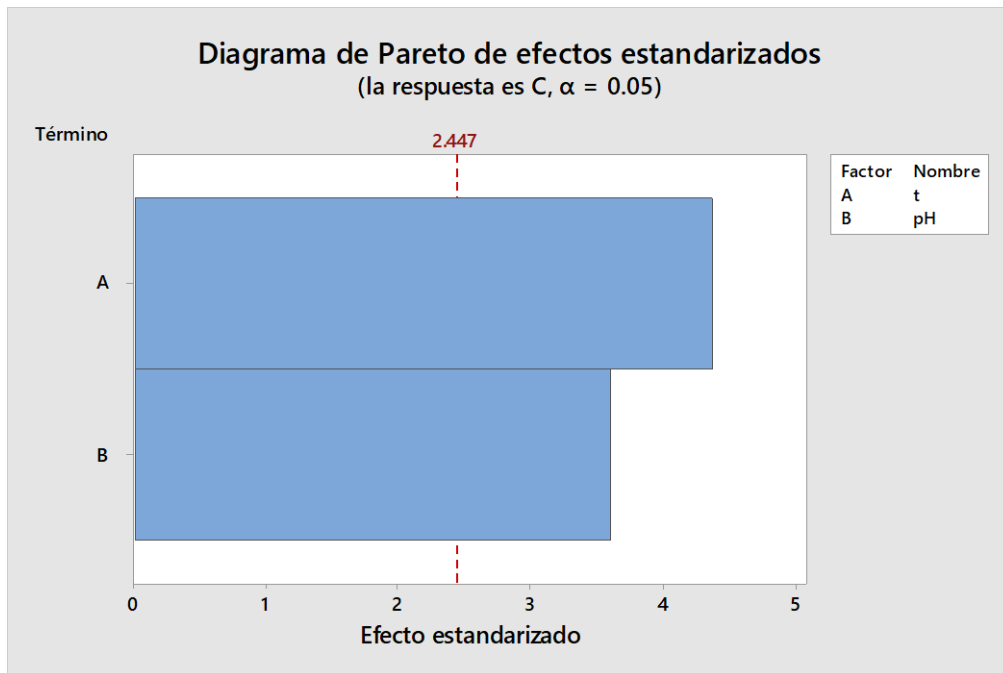


Figura N° 30. Diagrama de Pareto para el hierro

Fuente: Elaborado en base al diseño de dos niveles para Fe

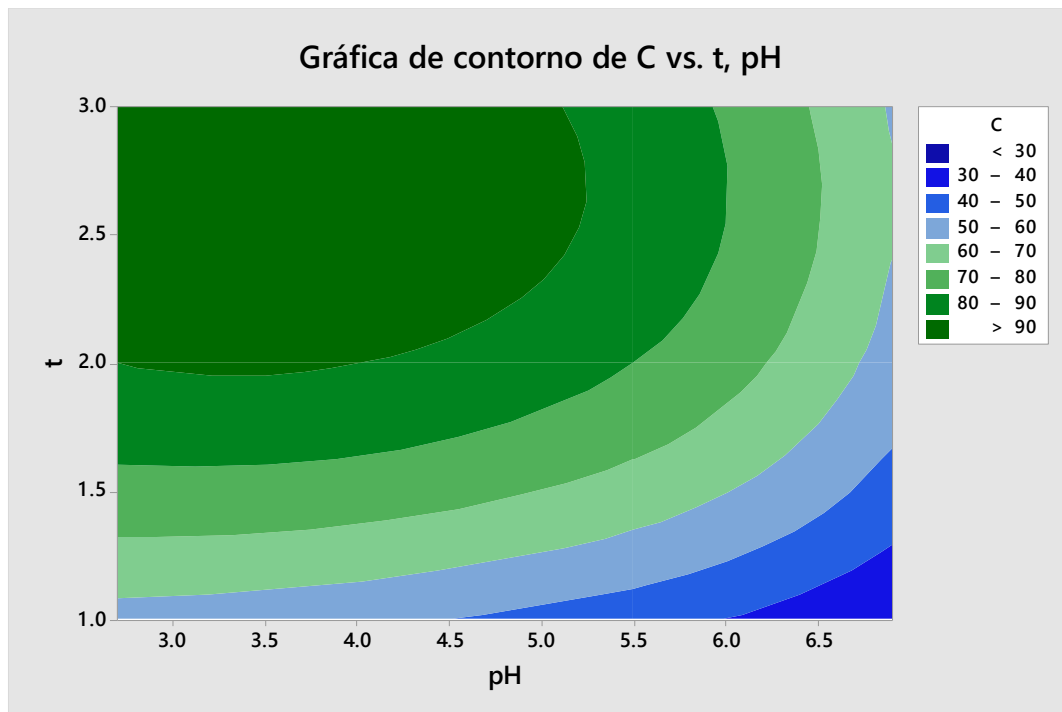


Figura N° 31. Superficie respuesta

Fuente: Obtenida a partir de la ecuación (4)

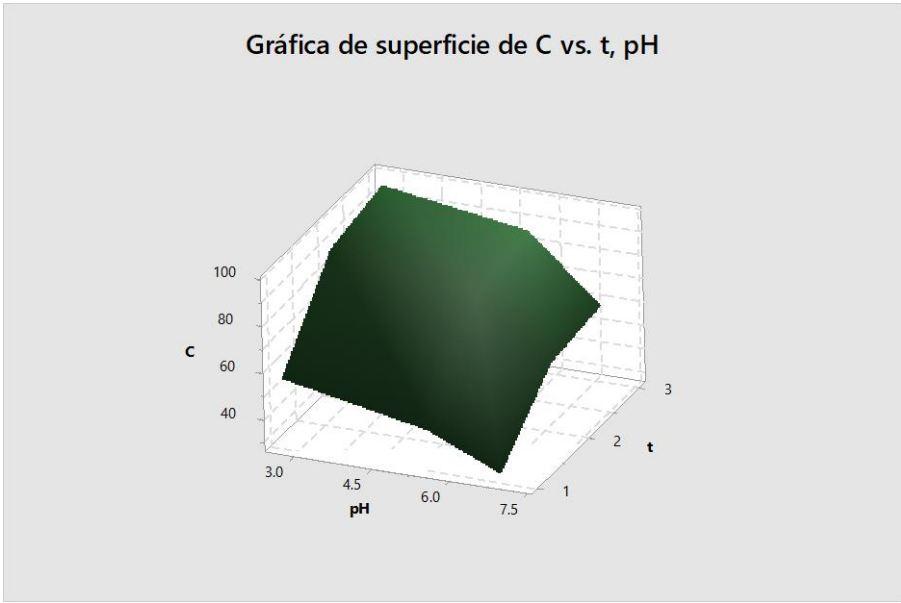


Figura N° 32. Superficie respuesta 3D

Fuente: Obtenida a partir de la ecuación (4).

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Contrastación de la hipótesis general

La tabla 03 y 04, de análisis químico muestra la existencia de fierro y cobre con contenido de 146.70 y 23 ppm, en una muestra de efluente, que son metales pesados del efluente, todos los minerales de cobre contienen fierro y otros metales en menor cuantía, que al lixiviar con ácido sulfúrico para extraer el cobre se disuelven casi todos los metales, si bien el cobre es extraído, pero otros metales quedan como residuos, por lo que es necesario degradarlo, adsorbiendo con carbón activado.

Contrastación de la hipótesis específica

La caracterización del efluente, tabla 06, muestra que, a menores concentraciones iniciales de cobre y hierro en el efluente, se logra adsorber 62 y 81 % de Cu y Fe, lo que se muestra en la figura 15.

En la tabla 07, que a diferentes pH iniciales del efluente, que a un pH 2.7 la adsorción de cobre y fierro alcanza hasta 80 y 89 % (figura 17 y 18), la eficiencia de adsorción es mayor en medio ácido.

La concentración inicial y el pH inicial efluente son relevantes, pero el factor tiempo es determinante, en el proceso de adsorción por agitación, en los dos casos se ha determinado que el tiempo crítico es 2 horas de agitación, se ha realizado la agitación durante 4 horas, en el caso de la adsorción de hierro es sorprendente, debido a que a mayor tiempo de operación la eficiencia de adsorción baja, esto sucede debido conforme el pH sube el Fe^{+2} pasa a Fe^{+3} , esto es explicado en la teoría del comportamiento de metales disueltos, ya que el Fe^{+3} tiende a precipitarse (Figura 18 y 19).

Se puede afirmar que el factor óptimo está relacionado con el tiempo, si bien los otros factores influyen, como la concentración inicial y el pH del efluente, no se ha seleccionado la velocidad de agitación, para lo cual se requiere un equipo de velocidad variable, sólo se ha trabajado a 800 RPM y muestra de 1000 ml.

En la hipótesis específica planteada, se menciona la caracterización del carbón activado utilizado, para lo cual se muestra el procedimiento estándar y la tabla 05 muestra las características del carbón activado usado. En la tabla 9 y la figura 20 muestran el rendimiento de este carbón activado, con la obtención adecuada de las isothermas de Freundlich.

Como hipótesis específica, se ha referido a las características del carbón activado usado y las características del efluente, esto tiene mucha importancia en el proceso de adsorción por razones obvias, el primero por la disponibilidad del área y el segundo por contenido de metales, a mayor área y menor concentración la eficiencia aumenta.

6.2. Contrastación de resultados con otros resultados similares

Existe un estudio similar de Ramírez Franco J.H. y otros (2013), que emplea como CA, de pino pátula, con un perfil de remoción de efluente, a temperatura de 20°C, pH=5, 220 RPM, 0.2.g /100 ml o sea a diluciones bastante bajas en un tiempo de 48 horas ha alcanzado por encima 80 % de remoción de cobre y fierro en aguas industriales con menor contenido de cobre y otros metales.

Obviamente son estudios similares, pero las condiciones de trabajo defieren en las aplicaciones de los factores, comparativamente el tiempo de remoción es 48 horas frente al tiempo de 4 horas, la velocidad de agitación es 220 RPM, con respecto a 800 RPM, si bien el pH es 5, es similar al presente trabajo de investigación; es evidente a diluciones bastante bajas la eficiencia del carbón aumenta, donde el número de cationes o partículas atómicas de Fe y Cu son bastante bajas, y con disponibilidad suficiente de superficie de carbón activado de por sí explica el aumento de la eficiencia del carbón activado, mientras la velocidad de agitación la eficiencia de la adsorción.

Otra diferencia con el anterior trabajo de investigación es que el contenido cobre en el efluente es 395 ppm y el fierro es 3.99 ppm, es un efluente industrial con características diferentes al presente trabajo, si bien el rango de pH es similar.

En cuanto se refiere al carbón activado por el estudio en referencia es procedente de pino pátula, es de corteza dura donde el área BET es 551 m²/g, mientras de ésta es de 900, puede considerarse al doble del anterior.

6.3 Responsabilidad ética

El presente trabajo de investigación se ha realizado, bajo los principios éticos y responsabilidad social que orientan la investigación y las buenas prácticas de todo investigado. Respetando los derechos de autor y que los experimentos que se han ejecutado con responsabilidad social y del medio ambiente, se orientan a beneficiar a la sociedad.

Se ha tenido en cuenta las buenas prácticas que debe tener en cuenta todo investigador como:

- Soy consciente de mi responsabilidad científica y profesional ante la sociedad.
- Las fuentes bibliográficas que he utilizadas en el trabajo de investigación son con cumpliendo a las normas APA, respetando los derechos de autor.
- Se ha procedido con rigor científico asegurando la validez, la fiabilidad y credibilidad de sus métodos, fuentes y datos.

CONCLUSIONES

1. En la caracterización del carbón activado, se ha utilizado un carbón comercial Hydraffin 40 N, obtenido a partir de leña de corteza dura similar a pino, con densidad aparente de 440 Kg/m³, área total disponible de 900 m²/g determinado por método BET, cuya granulometría es de 0.4 a 1.7 mm.
2. La caracterización del efluente se muestra en la tabla 04, con contenido de 23 ppm de cobre total y 146 ppm de hierro total, lo que se ha realizado en un laboratorio químico por método instrumental de absorción atómica, las otras características se han determinado por medición instrumental directa.
3. Se ha seleccionado los factores más relevantes, mediante inferencia estadístico ANOVA, de los resultados experimentales estos factores correlacionan en forma acertada.
4. Uno de los factores de mayor importancia es el tiempo de agitación a 800 RPM que alcanza entre 70 a 80 % en la adsorción de cobre y hierro respectivamente tal como muestran las tablas 06, 07 y 08.

RECOMENDACIONES

- Se requiere determinar con mayores intervalos de tiempos, cada 30 minutos, para obtener mayor cantidad de datos en las operaciones de agitación, por lo que es posible establecer la cinética del proceso de adsorción en este tipo de procesos.
- Asimismo, se requiere probar a diferentes velocidades de agitación para diferentes cantidades de carbón para cada tiempo determinado.
- Se puede probar con otro tipo de carbones activados, similares y específicamente caracterizados y conocidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Publicaciones

Álvaro M. Miguel, López R. Victoria, Moreno C. C. (2005) *A STUDY OF THE STATIC AND DYNAMIC ADSORPTION OF ZN(II) IONS ON CARBON MATERIALS FROM AQUEOUS SOLUTIONS*. New York: Journal of Colloid and Interface Science.

Basso M.C., Cerrilla E. G., Cukierman A. L. (2000); *REMOCION DE CADMIO (II) DE SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE CARBON ACTIVADO PREPARADO A PARTIR DE CAÑA*, Programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas y Energía - PINMATE- Departamento de Industrias. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires

Bansal, R.C., Donnet, J.B. and Stoeckli, F. (1998). *ACTIVE CARBON*. Marcel Dekker, New York

Céspedes Nubia E., Valencia Jesús S., Díaz José J. (2000) *REMOCIÓN DE CROMO VI DE SOLUCIONES ACUOSAS POR ADSORCIÓN SOBRE CARBONES ACTIVADOS MODIFICADOS*. Revista Química, 36(3):307.

Daniele C., Acerbi M., Carengo S. (2005). *LA IMPLEMENTACIÓN DE RESERVAS DE BIÓSFERA*. UNESCO. Academia de Ciencias de Tercer Mundo Programa de Cooperación Sur. Documento N° 25. Montevideo.

Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM. (2011). *ESTÁNDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA*. Sector -Vivienda. El Peruano Normas Legales. Lima-Perù.

Faur-Brasquet, Kadirvelu K, Le Cloirec P (2002). *ELIMINACIÓN DE IONES METÁLICOS DE LA SOLUCIÓN ACUOSA MEDIANTE ADSORCIÓN SOBRE TELAS DE CARBÓN ACTIVADO: COMPETENCIA DE ADSORCIÓN CON MATERIA*. Journal Carbon Vol. 40 Issue13 Páginas 2387-2392 Editor. Pergamon. Orgánica.

Goel, Jyotsna, Kadirvelu Krishna, Rajagopal Chitra, Kumar Vinod.(2005). *EXTRACCIÓN DE PLOMO (II) POR ADSORCIÓN USANDO CARBÓN ACTIVADO GRANULAR TRATADO: ESTUDIOS DE LOTES Y COLUMNAS*. / 10/17 Journal de materiales peligrosos Volumen125 Issue1-3 Páginas211-220 Editor Elsevier.

Heschel, W. & Klose, E. (1995). *ON THE SUITABILITY OF AGRICULTURAL BY-PRODUCTS FOR THE MANUFACTURE OF GRANULAR ACTIVATED CARBON*. FUEL, 74, 1786-1792.

Kadirvelu K., Thamaraiselvi K., Namasivayam C. (2001). *ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES POR ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO PREPARADO A PARTIR DE UN RESIDUO SÓLIDO AGRÍCOLA*. Journal Bioresource technology. Vol.76 (1), Pág.63-65.

K Kadirvelu, C Faur-Brasquet, P Le Cloirec. (2000). *ELIMINACIÓN DE CU (II), PB (II) Y NI (II) POR ADSORCIÓN EN TELAS DE CARBÓN ACTIVADO*. Diario Langmuir Volume16 Issue22 Páginas8404-8409 Publisher American Chemical Society.

Kadirvelu K, Karthika C, Vennilamani N, Pattabhi S.(2005). *CARBÓN ACTIVADO DE DESECHOS SÓLIDOS INDUSTRIALES COMO ADSORBENTE PARA LA ELIMINACIÓN DE RODAMINA-B DE LA SOLUCIÓN ACUOSA: Estudios cinéticos y de equilibrio*. Journal

- Lazo Camposano R. (2015). *OPERACIONES Y PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CÁSCARA DE COCO*. Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Química. Callao- Perú.
- Mattson, J.B. and Mark, H.B.(1971). Marcel Dekker, *ACTIVED CARBON*. Ed. New York..
- Meyer Pamela A. Brown , Mary J, Falk Henry, (2008). *GLOBAL APPROACH TO REDUCING LEAD EXPOSURE AND POISONING*. Mutation Research (Page 659, 167).
- Molina-Sabio, M., Pérez, V. and Rodríguez-Reinoso, F.(1994). *CARBÓN* 32, 1259.
- MINAM Perú. (2011). *COMPENDIO DE LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL PERUANA*, volumen I. Marco Normativo General. Primera edición.
- MINAM Perú. (2012). *Compendio De La Legislación Ambiental Peruana*, volumen V. Calidad Ambiental. Primera edición.
- Navarro, García, F. (2012). *RESPONSABILIDAD SOCIAL CORPORATIVA: TEORÍA Y PRÁCTICA*. España.
- Padrón R., Rodríguez C., Gómez A. (2013). *EL CARBÓN ACTIVADO UN MATERIAL ADSORBENTE*. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos Cuba.
- Perdiguero, Tomás G. (2003). *LA RESPONSABILIDAD SOCIAL DE LAS EMPRESAS EN UN MUNDO GLOBAL*, Anagrama, Barcelona.

- Ramírez F. José, Martínez A. Oscar, Fernández O. Luisa. (2013). *REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO DE PINO PÁTULA*. Avances Investigación en Ingeniería. Vol.10 (1). Universidad Nacional de Colombia.
- Raufflet, Emmanuel, Lozano José Félix y otros.(2012) *RESPONSABILIDAD SOCIAL EMPRESARIAL*, Pearson Educación, México.
- Rodríguez A. L., Soto B. M., Montalván A. S. (2009). *OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS CON ALTO PODER CALORÍFICO*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.Lima Perú.
- Rojas Hugo A., Guerrero Diana C., Vásquez Olga Y., Valencia J. S.(2012). *APLICACIÓN DEL MODELO DE BOHART Y ADAMS EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO DE DRENAJE DE MINERÍA POR ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO*. Información Tecnológica. Vol. 23(3)- Universidad Nacional de Colombia.
- Sreejalekshmia K.G., Krishnanb Anoop.(2008). *MATERIALS ADSORPTION OF PB(II) AND PB(II)-CITRIC ACID ON SAWDUST ACTIVATED CARBON: KINETIC AND EQUILIBRIUM ISOTHERM STUDIES*. Journal of Hazardous.
- Tejada T. Candelaria, Villabona O. Angel, Garcés J. Luz.(2015). *ADSORCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES USANDO MATERIALES DE ORIGEN BIOLÓGICO*. Tecno Lógicas Vol.18 (34) pp 109-123.

Textos

Atkins P.(1991). *FISICOQUÍMICA*. Segunda edición. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. Pág. 151-160. México D.F.

Castellan G.(1998). *FISICOQUÍMICA*. Segunda edición. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana Pág.452-458. México D:F: 1998.

Marsh Harry, Rodríguez Reinoso Francisco. (2006). *TECHNOLOGY BOOKS ACTIVATED CARBON*. Elsevier Science. New York.

Perry R., Gree D., Maloney, J. (1992). *MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO*. Sexta Edición. Editorial McGraw Hill. Pág. 148-151. México D:F: 1992.

Rodríguez-Reinoso, F., Molina-Sabio, M. and Muñecas, M.A. J. (1992). *PHYS. CHEM.* 96, 2707

SCHWALB, María Matilde y Elsa Del Castillo. (2012). *GUÍA PRÁCTICA PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS CON RESPONSABILIDAD SOCIAL LIMA*: Universidad Del Pacífico.

SCHWALB, María Matilde y Oscar Malca.(2012). *Responsabilidad Social: Fundamento Para La Competitividad Empresarial Y El Desarrollo Sostenible*, Universidad Del Pacífico, Centro de Investigación, Lima.

Treybal R. (1996). *OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA*. Editorial McGraw Hill. Pág. 628-711. México D.F. 1996

Ullmann's. (1996). *ENCICLOPEDIA DE QUÍMICA INDUSTRIAL* . Edt. Weinheim . Alemania.

Tesis

Cárdena Ijuma H. (2015). *EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO POR EL MÉTODO QUÍMICO CON CLORURO de Zinc y Ácido Fosfórico a partir del Aserrín de (Copaifera reticulata)*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Pucallpa. Perú.

Ferrada Bahamonde A., Trujillo Villavicencio H. (2013). *ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES DEL EFLUENTE INDUSTRIAL DE LA REFINERÍA DE IQUITOS CON CARBÓN ACTIVADO GRANULAR*. Tesis pregrado. Ingeniería Química Lima. Perú.

Mendieta Narvárez E.(2008). *ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LA SEMILLA DE NANCITE PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS DE POZOS CON ALTO CONTENIDO DE ARSÉNICO*. Tesis de pregrado. Ingeniería Química. UNI. Lima Perú.

Sangay Tucto S.(2010). *OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO DEL ENDOCARPIO DE CASTAÑA (BERTHOLLETIA EXCELSA) PROCEDENTE DE PLANTACIÓN Y DE BOSQUE NATURAL, EMPLEANDO UN MÉTODO QUÍMICO*. Tesis pregrado. Universidad Nacional La Agraria. Lima-Perú.

Uechi López J. (2016). *ESTUDIO DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE CADMIO Y CROMO PRESENTES EN SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO CARBONES ACTIVADOS MODIFICADOS*. Tesis de posgrado en Química. PUCP. Lima- Perú.

Páginas web:

http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=617dbe75-6683-4fbd-a594-9d2c0bcf70f1&groupId=10154

<http://www.soil.usgs.gov/pubs/circ/1133/heavy-metals.html>

<http://www.biotechnologia.com>

<http://www.remediación de suelos.com>

www.aquapedia.net (2005). *Manual del carbón activo*. Máster en Ingeniería del agua Universidad Politécnica de Sevilla. España.

www.uflo.edu.ar/dya/volumen2/trabajo3/contenido.htm

ANEXOS

ANEXO A. INSTRUMENTOS UTILIZADOS

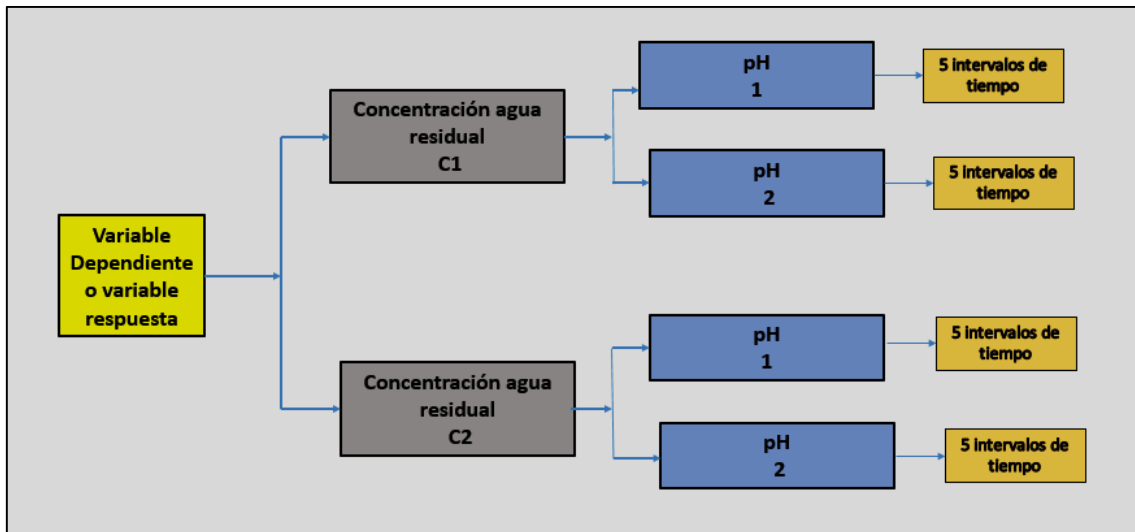


Figura N° 33. Estructura de control de variables

Fuente: Elaborado en base matriz de operacionalización de variables

Formato de Experimentos para validar los resultados debe incluir los protocolos de acuerdo a las Normas Técnicas Internacionales.

Experimento N°

Contenido inicial de metal en el efluente (g/l)

Cantidad de carbón activado por volumen de efluente (g/ml)

Temperatura de trabajo (°C)

pH de efluente de entrada (1 a 6)

Velocidad de agitación: RPM

Tiempo (tomar muestra cada 2 horas) durante 12 horas

Rubro	contenido metal Carbón Activado	contenido metal agua residual	% metal adsorbido
Entrada			
Salida			
Residuo			

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 15. Resultados de análisis químico

Muestra	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)
M-00	0.023	14.670	23.00	146.70
M-00-1	0.050	0.500	10.00	10.00
M-00-2	0.035	1.770	3.40	17.70
M-00-3	0.175	1.680	1.67	19.20
M-01-1	0.012	0.360	12.00	36.00

Fuente: H&F Laboratorios S.A.C 2807 a 2811/ 2019

Tabla N° 16. Resultado de análisis químico

Muestra	Peso CA(g)	Cu (ppm)	Fe (ppm)
M-01-1	50.00	12.00	36.00
M-01-C	30.00	2.10	14.00
M-00-12	30.00	1.15	1.60
M-00-13	10.00	0.57	2.20

Fuente: H&F Laboratorios S.A.C / 2019

Tabla N° 17. Resultado de análisis químico

Muestra	pH	Cu (ppm)	Fe(ppm)
M-01-S	3.4	0.0520	0.870
M-02-S	5.2	0.0570	0.750
M-03-S	6.9	0.0400	0.680

Fuente: H&F Laboratorios S.A.C – 2019

Tabla N° 18. Resultado de análisis químico para diferentes pH

COBRE			
t (horas)	2.7	5.5	6.9
0	0	0	0
1	31	22	9
2	69	61	48
3	81	72	61
4	83	76	65

Fuente: Elaborado en base tablas 15, 16 y 17

Tabla N° 19. Resultado de análisis químico para diferentes pH

FIERRO			
t (horas)	2.7	5.5	6.9
0	0	0	0
1	56	44	30
2	90	80	56
3	96	86	59
4	88	70	30

Fuente: Elaborado en base tablas 17 y 18

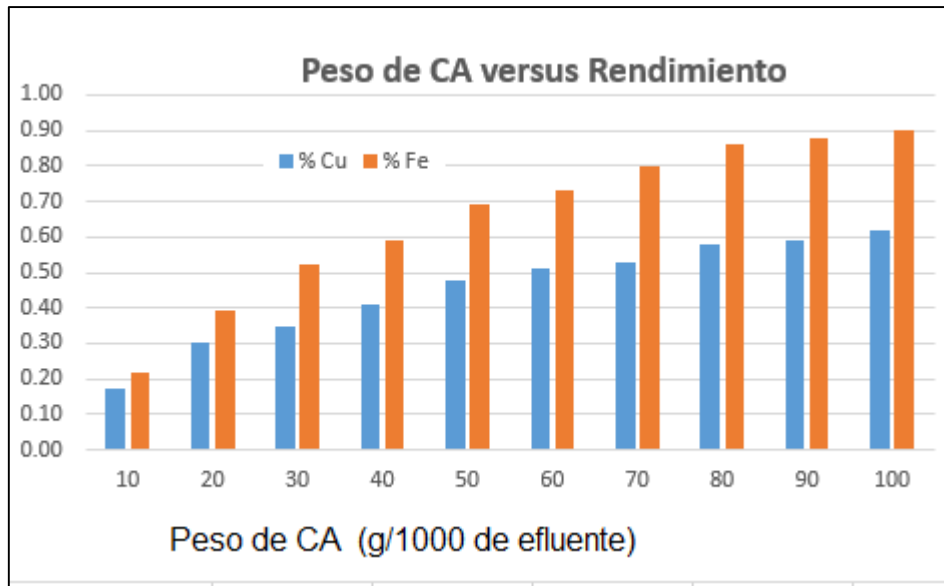


Figura N° 34. Peso de carbón activado versus rendimiento

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 20. Resultados para isotermas de Freundlich para Cu

x	Ce	m	X/m	LOG(Ce)	LOG(X/m)
4.00	19.00	10	0.400	1.279	-0.398
7.00	16.00	20	0.350	1.204	-0.456
8.00	15.00	30	0.267	1.176	-0.574
9.50	13.50	40	0.238	1.130	-0.624
11.00	12.00	50	0.220	1.079	-0.658
11.80	11.20	60	0.197	1.049	-0.706
12.20	10.80	70	0.174	1.033	-0.759
13.40	9.60	80	0.168	0.982	-0.776
13.60	9.40	90	0.151	0.973	-0.821
14.30	8.70	100	0.143	0.940	-0.845

Fuente: Elaborado en base a tabla 06

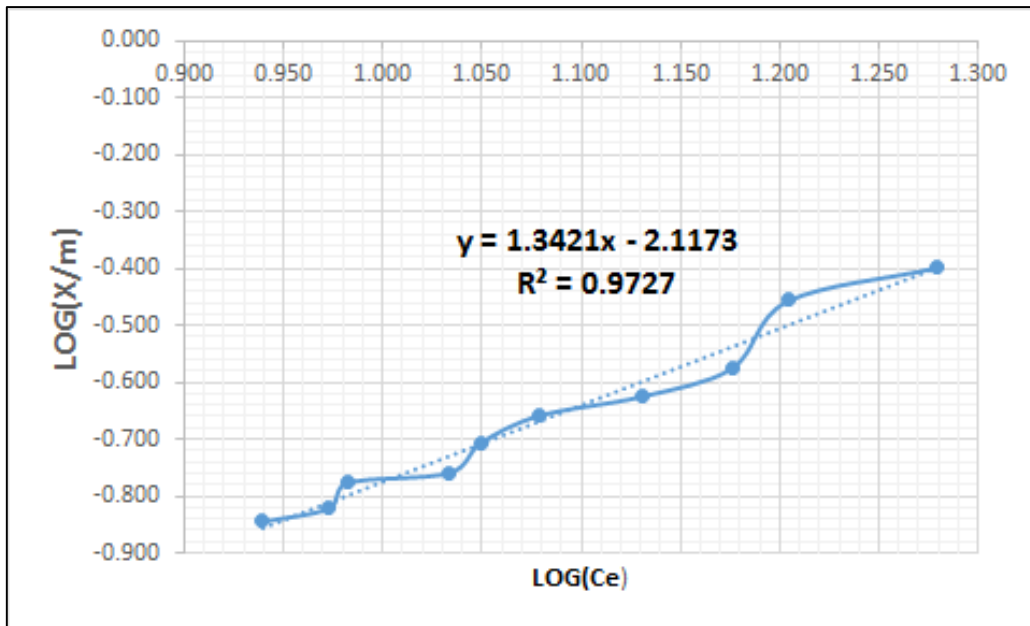


Figura N° 35. Gráfica para obtener constantes de Freundlich para Cu

Fuente: Elaborado en base a tabla 20

Tabla N° 21. Resultados para isotermas de Freundlich para Fe

x	Ce	m	X/m	LOG(Ce)	LOG(X/m)
28.70	118.00	10	2.870	2.072	0.458
56.70	90.00	20	2.835	1.954	0.453
76.70	70.00	30	2.557	1.845	0.408
91.70	55.00	40	2.293	1.740	0.360
101.70	45.00	50	2.034	1.653	0.308
111.70	35.00	60	1.862	1.544	0.270
116.70	30.00	70	1.667	1.477	0.222
126.70	20.00	80	1.584	1.301	0.200
128.70	18.00	90	1.430	1.255	0.155
131.70	15.00	100	1.317	1.176	0.120

Fuente: Elaborado en base a tabla 06

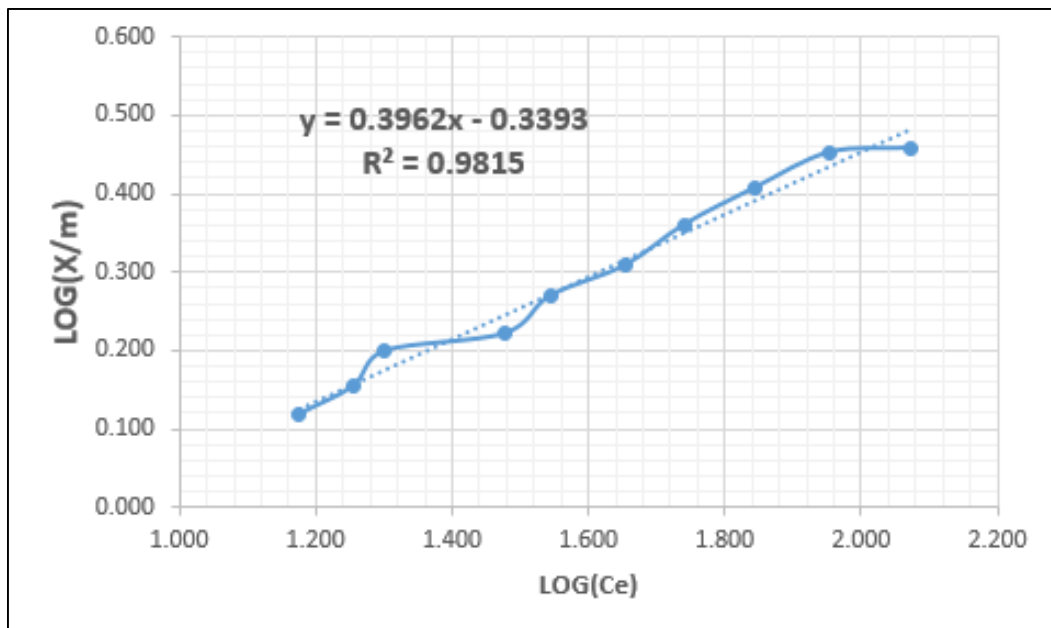


Figura N° 36. Gráfica para obtener constantes de Freundlich para Fe

Fuente: Elaborado en base a la tabla anterior



Figura N° 37. Fotografía de la ejecución del experimento
Laboratorio de procesos y operaciones unitarias LOPU. FIQ-UNAC



Figura N° 38. Fotografía de instrumentos de medición de pH y sólidos en suspensión



Figura N° 39. Fotografía de reactivos de calibración de pH
Reactivos de calibración de electrodos de pH

ANEXO B: MATRIZ DE CONSISTENCIA

“DEGRADACIÓN DEL CONTENIDO DE HIERRO (II) Y (III) EN AGUA RESIDUAL DE LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE COBRE CON CARBÓN ACTIVADO EN TANQUE AGITADO”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE (Y):
¿De qué manera se debe degradar el contenido de hierro en agua residual de lixiviación ácida de cobre con carbón activado en tanque agitado?	Degradar el contenido de hierro en agua residual de lixiviación ácida de cobre con carbón activado en tanque agitado	La degradación del contenido de hierro en agua residual de lixiviación ácida de cobre es viable mediante el empleo de carbón activado en tanque agitado	Degradación del contenido cobre.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	VARIABLES INDEPENDIENTES
a. ¿Cómo se debe caracterizar el carbón activado?	a. Caracterizar el carbón activado.	a. La caracterización del carbón activado se realizará mediante análisis fisicoquímico instrumental.	Empleo de carbón activado mediante la operación de tanque agitado.
b. ¿Cómo se debe caracterizar el efluente?	b. Caracterizar el agua residual que se somete al tratamiento.	b. La caracterización del agua residual se realiza por análisis químico.	Características del efluente y carbón activado
c. ¿De qué forma se debe seleccionar y definir los factores para optimizar el proceso de remoción de metales?	c. Seleccionar y definir los factores para optimizar el proceso de remoción de metales.	c. La selección de factores es posible priorizando su importancia en la operación	Factores que intervienen para llevar a cabo la operación de adsorción en tanque agitado.
d. ¿Cómo se establecerá los factores que optimicen el proceso?	d. Establecerá los factores que optimicen el proceso	d. Se debe establecer los factores que optimicen el proceso usando herramientas adecuados.	