

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA
DE NARANJA (*Citrus sinensis* L. Obseck) Y SU APLICACIÓN COMO
ADSORBENTE DE PLOMO (II) EN DISOLUCIÓN ACUOSA”**

AMPARO PATRICIA RUIZ MENENDEZ

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

Lima - Perú

2018

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente tesis (Art. 24.

Reglamento de Propiedad Intelectual).

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE
NARANJA (*Citrus sinensis* L. *Obseck*) Y SU APLICACIÓN COMO ADSORBENTE
DE PLOMO (II) EN DISOLUCIÓN ACUOSA”**

Presentada por:

Amparo Patricia Ruiz Menendez

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Víctor Miyashiro Kiyán

PRESIDENTE

Mg. Sc, Elsa Flora Huamán Paredes

MIEMBRO

Q.F. Juan José León Cam

MIEMBRO

Ph. D. Héctor Enrique Gonzales Mora

ASESOR

Dr. Elvito Fabián Villegas Silva

Co – ASESOR

Con acendrada devoción y justo orgullo
dedico este esfuerzo a mis queridos padres
y hermano.

Agradezco a los profesores Héctor González Mora y Elvito Villegas Silva por su apoyo constante y desinteresado durante todas las etapas de mi labor.

ÍNDICE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA	1
ÍNDICE	3
RESUMEN	1
ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. MARCO LEGAL	4
2.1.1. NORMATIVIDAD PERUANA SOBRE RESIDUOS SÓLIDOS	4
2.1.2. NORMATIVIDAD PERUANA SOBRE PLOMO EN EFLUENTES LÍQUIDOS	5
2.2. DE LA ESPECIE	6
2.2.1. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	6
2.2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESPECIE	7
2.2.3. DISTRIBUCIÓN DE LA NARANJA	8
2.2.4. PRODUCCIÓN DE NARANJA EN EL PERÚ	8
2.2.5. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA CÁSCARA DE NARANJA	11
2.2.6. USOS DE LA CÁSCARA DE NARANJA	12
2.3. CARBÓN ACTIVADO	13
2.3.1. MÉTODOS DE ACTIVACIÓN	15
2.3.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO	17
2.3.3. TIPOS DE CARBONES ACTIVADOS	19
2.3.4. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO	19
2.3.5. PRODUCCIÓN Y DEMANDA DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL PERÚ	20
2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN	22
2.4.1. TIPOS DE SORCIONES	22
2.4.2. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	23
2.5. PLOMO	23
2.5.1. PROPIEDADES DEL PLOMO	24
2.5.2. APLICACIONES DEL PLOMO	25
2.5.3. DISOLUCIÓN DE PLOMO EN FASE ACUOSA	27
2.5.4. EFECTOS NOCIVOS DEL PLOMO	29

2.5.5.	TRATAMIENTO DEL PLOMO EN EFLUENTES INDUSTRIALES	31
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1.	PROCEDENCIA DE LA MATERIA PRIMA	33
3.2.	LUGAR DE EJECUCIÓN	33
3.3.	MATERIALES Y EQUIPOS	34
3.3.1.	MATERIA PRIMA	34
3.3.2.	MATERIALES	34
3.3.3.	EQUIPOS	35
3.3.4.	EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	35
5.4.	METODOLOGÍA	36
5.4.1.	ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	36
5.4.2.	ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA	36
5.4.3.	ACTIVACIÓN QUÍMICA DE LA CÁSCARA DE NARANJA	38
5.4.4.	EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	38
5.4.5.	ADSORCIÓN DE PLOMO	40
5.4.6.	EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE PLOMO EN CONDICIONES DE LABORATORIO	41
5.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1.	EVALUACIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR	46
4.2.	RENDIMIENTO DEL CARBÓN ACTIVADO	48
4.3.	EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	51
4.4.	INFLUENCIA DE LOS FACTORES SOBRE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	52
4.5.	INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA RAZÓN DE IMPREGNACIÓN Y EL pH SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN	54
4.6.	INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL Y EL pH SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN	56
4.7.	INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL Y RAZÓN DE IMPREGNACIÓN SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN	58
V.	CONCLUSIONES	61
VI.	RECOMENDACIONES	62
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1: Producción de naranja por departamento en el año 2013	9
Cuadro 2: Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i> L. Obseck).....	11
Cuadro 3: Algunos usos de la cáscara de naranja.	12
Cuadro 4: Tipo de poro de acuerdo al tamaño del poro.....	14
Cuadro 5: Principales parámetros con los que se especifica un carbón activado granular para el tratamiento de agua.....	19
Cuadro 6: Propiedades físico - químicas del elemento plomo.	24
Cuadro 7: Métodos empleados para la remoción de plomo en aguas residuales.	31
Cuadro 8: Características notables de las tecnologías empleadas para la remoción de metales pesados en efluentes industriales.	32
Cuadro 9: Diseño Experimental de los tratamientos empleados para la adsorción de plomo en fase acuosa a partir del carbón activado elaborado.....	43
Cuadro 10: Análisis proximal de composición del precursor (en base seca).....	46
Cuadro 11: Composición de otros precursores empleados para activación química.....	46
Cuadro 12: Rendimiento del carbón activado obtenido de acuerdo a la razón de impregnación empleada	48
Cuadro 13: Análisis del carbón activado obtenido.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Partes del fruto de naranja. FUENTE: Infoagro (2012).	7
Figura 2: Producción de naranja en el Perú desde el año 2002 al 2013. FUENTE: Ministerio de Agricultura y Riego (2014).	9
Figura 3: Evolución anual del ingreso de naranja al Mercado Mayorista N°2 de Lima Metropolitana. FUENTE: Empresa Municipal de Mercados S.A (2014).	10
Figura 4: Participación porcentual de las principales frutas ingresadas en el Mercado Mayorista N°2 de Lima Metropolitana. FUENTE: Empresa Municipal de Mercados S.A. y Ministerio de Agricultura y Riego.	11
Figura 5: Fragmento de la estructura molecular de la lignina. FUENTE: Vanholme, <i>et al.</i> (2010).	12
Figura 6: Estructura molecular básica de la pectina. FUENTE: Zegada (2015).	12
Figura 7: Flujograma general para la producción de carbón activado. FUENTE: Rodríguez-Reinoso (2002).	16
Figura 8: Variación de la cantidad total de importaciones y exportaciones de carbón activado en el Perú, desde el año 2000 al año 2016. FUENTE: Aduanas Perú (2017).	21
Figura 9: Evolución de mercados de procedencia del carbón activado importado por el Perú del 2012 al 2016 (Miles USD FOB). FUENTE: Aduanas Perú (2017).	22
Figura 10: Usos del Plomo. FUENTE: International Lead and Zinc Study Group (2017). ..	25
Figura 11: Diagrama de distribución de especies de plomo. FUENTE: Hernáiz, <i>et al.</i> (2007).....	29

Figura 12: Vista Satelital de Perené – Chanchamayo – Junín – Perú. FUENTE: Vía Satelital Internet Networks (2017).....	33
Figura 13: Materia prima empleada. FUENTE: Elaboración propia.....	34
Figura 14: Flujograma general de la metodología. FUENTE: Elaboración propia.....	42
Figura 15: Gráfica de intervalos del rendimiento del carbón activado según su razón de impregnación. FUENTE: Elaboración propia	49
Figura 16: Gráfica de intervalos del rendimiento del carbón activado según su razón de impregnación. FUENTE: Elaboración propia	49
Figura 17: Capacidad de Adsorción VS. Razón de Impregnación, pH y Concentración Inicial. FUENTE: Elaboración propia	53
Figura 18: Porcentaje de Remoción (%) Razón de Impregnación – pH. FUENTE: Elaboración propia	55
Figura 19 Porcentaje de Remoción pH – Concentración Inicial. FUENTE: Elaboración propia	57
Figura 20: Porcentaje de Remoción Concentración Inicial - Razón de Impregnación. FUENTE: Elaboración propia	60

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Registro Fotográfico	73
ANEXO 2: Fichas de resultados	82
ANEXO 3: Análisis Estadísticos	91

RESUMEN

En la presente investigación, se prepararon carbones activados a partir de residuos de cáscara de naranja, mediante activación química usando como agente activante al ácido fosfórico (H_3PO_4). Se analizaron los siguientes parámetros del material precursor: densidad aparente, contenido de humedad, contenido de material volátil, contenido de ceniza y contenido de carbono fijo. Además, se estudió la influencia de la razón de impregnación (agente activante (g)/precursor (g)) sobre el rendimiento de los carbones activados obtenidos, el rendimiento promedio de los carbones obtenidos fue de 32 % aproximadamente. Se realizó la caracterización de los carbones activados obtenidos. Se estudió el efecto de los siguientes parámetros que afectan el proceso de adsorción de plomo: la razón de impregnación del carbón activado, concentración inicial de la disolución de plomo y pH de la disolución de plomo. Finalmente, se logró remover hasta el 98,85% del plomo contenido en una muestra en condiciones de laboratorio.

Palabras clave: Carbón Activado, cáscara de naranja, tratamiento de aguas, plomo, reciclaje de residuos.

ABSTRACT

In the current study, activated carbons were prepared from orange peel waste, by chemical activation using phosphoric acid as activating agent. Following parameters were analyzed in the raw material: apparent density, moisture, volatile matter, ash and fixed carbon. Also, the impregnation ratio (activant agent (g)/ raw material (g)) influence was studied in the obtained activated carbons yield, average yield was 32 % approximately. The materials obtained were characterized. The following parameters affecting the adsorption process of lead were studied: activated carbon impregnation ratio, initial dissolution concentration and dissolution pH. Finally, obtained activated carbons achieve 98.85% lead remotion in a sample at laboratory conditions.

Keywords: Activated carbon, orange peel, water treatment, lead, solid waste recycling.

I. INTRODUCCIÓN

La basura es el símbolo de la ineficiencia de cualquier sociedad moderna, compuesta por recursos mal ubicados (Zaman, 2013). En diciembre del año 2016, en el Perú, se aprobó el Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos la misma que establece la derogatoria de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos. Esta nueva legislación hace hincapié en la importancia de emplear los residuos sólidos como insumos para las industrias y de esta manera valorizar los residuos incorporando tecnologías y consolidando emprendimientos vinculados a este sector.

En el año 2013, se realizó el Diagnóstico de los Residuos Sólidos en el Perú el cual recopiló estudios de composición física de los residuos sólidos domiciliarios, no domiciliarios y municipales determinando que la porción orgánica representa más del 50% de los residuos sólidos generados. Bajo este contexto, es una prioridad determinar metodologías que permitan la valorización de los residuos orgánicos, una de las más extendidas es la elaboración de compost, sin embargo, existen algunos residuos orgánicos que no se recomienda compostar; otra metodología relativamente sencilla es la obtención de carbón activado. La conversión de residuos sólidos en carbón activado agrega valor económico, ayuda a reducir el costo de la disposición de residuos y provee de una alternativa potencialmente menos costosa a los carbones activados comerciales (Rafatullah *et al.*, 2010). Aunque el carbón activado puede fabricarse a partir de un sin número de materiales carbonosos, solamente se utilizan unos pocos a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo coste y a que los productos a partir de ellos tienen propiedades que cubren una amplia gama de aplicaciones que el carbón activado puede tener (González, 2004).

Por otro lado, el plomo como elemento de transición posee numerosas ventajas como, por ejemplo, una baja temperatura de fusión, extrema maleabilidad lo que permite una fácil fundición y lenta corrosión. Es relativamente abundante y de fácil extracción lo cual se refleja en un bajo precio en comparación a otros metales no ferrosos. Además, el plomo puede reciclarse a partir de baterías de plomo, chatarra y productos de consumo. Todas estas propiedades lo hacen difícilmente reemplazable en la industria. Sin embargo; el

plomo es un metal pesado tóxico debido al daño que puede producir su ingesta, la USEPA (2016) lo ha clasificado entre las 20 sustancias químicas más peligrosas para la salud humana; asimismo estableció el límite máximo permisible de plomo en agua potable de 0,001 mg/L (Lavado *et al.*, 2010). La contaminación del agua por plomo se debe a los efluentes industriales no tratados, generados por las fábricas de tetraetilo de plomo, pinturas, baterías, municiones, cerámicas de vidrio, minería, entre otros. Los metales pesados presentes en aguas industriales de desecho constituyen un problema ambiental de gran magnitud en razón de su elevada toxicidad para los organismos vivos. Las principales fuentes de ingreso del plomo al organismo son el aire inhalado, los alimentos y el agua de bebida (Moore *et al.*, 1985).

Actualmente, los métodos de mayor aplicación en el tratamiento de efluentes que contienen metales pesados son los siguientes: precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa y adsorción. Comparando dichos tratamientos, la adsorción presenta la ventaja de poseer las siguientes características: fácil operación, retención del metal en presencia de otros cationes y la posibilidad de recuperar los metales pesados (Kalavathy *et al.*, 2004). Cerca del 80% de la producción mundial de carbón activado es usado en aplicaciones en fase líquida (Moreno y Rivera, 2001) además, el tratamiento de aguas residuales y aguas subterráneas empleando carbón activado se ha incrementado mundialmente como resultado de las limitadas fuentes de abastecimiento de agua (Meidl, 1997). La posibilidad de desarrollar métodos de remoción de estos contaminantes resulta particularmente atractiva al tomar como punto de partida el uso de materias primas de bajo costo, que de otra forma pueden ser consideradas como residuos (Larenas *et al.*, 2009). La adsorción de metales pesados sobre carbón activado se usa exitosamente en el tratamiento de aguas residuales y se considera una buena técnica para eliminar compuestos orgánicos no biodegradables y tóxicos presentes en soluciones acuosas (Ferro *et al.*, 1988). A nivel industrial el carbón activado es utilizado ampliamente para la purificación de agua debido a su bajo costo y fácil implementación, así como a su gran versatilidad, ya que su estructura porosa y la naturaleza química de su superficie puede ser controlada para una necesidad específica (Obregón, 2012). En el año 2016, el Perú importó más del 99% de su demanda de carbón activado que alcanza a nivel nacional (Aduanas Perú, 2017).

La cáscara de naranja se viene empleando como precursor para la elaboración de carbón activado (Peña *et al.*, 2012; Foo *et al.*, 2012). Se han dado diversas aplicaciones al carbón activado elaborado a partir de la cáscara de naranja, Nemr *et al.* (2009), y Fernández *et al.*

(2014), concluyen que posee potencialidades para la remoción de tintes básicos. Hashemian *et al.* (2014), concluyó que es un adsorbente eficiente de solventes derivados de la piridina. Roopa *et al.* (2016), concluyó que el carbón activado obtenido de la cáscara de naranja amarga posee características similares al carbón activado comercial comúnmente empleados para el tratamiento de aguas residuales. Además, se han investigado otras aplicaciones alternativas del carbón activado elaborado a partir de este precursor, tales como: supercondensador y catalizador (Dhelipan, 2016).

La presente investigación persigue evaluar la adsorción de plomo en disolución acuosa en condiciones de laboratorio a través de un carbón activado elaborado a partir de cáscara de naranja (*Citrus sinensis L. Obseck*) a través de la activación química con H_3PO_4 .

Se analizó el rendimiento, así como, las características físicas: densidad, porcentaje de humedad, pH y porosidad del carbón activado obtenido. Además, se analizó la influencia de la razón de impregnación del carbón activado, el pH de la disolución acuosa y la concentración inicial de plomo (II), en el coeficiente de adsorción y porcentaje de remoción del plomo (II).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO LEGAL

2.1.1. NORMATIVIDAD PERUANA SOBRE RESIDUOS SÓLIDOS

La Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se enmarca dentro de la Política Nacional del Ambiente y los principios establecidos en la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente. La Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos aprobada por el Decreto Legislativo N° 1278 modifica la Ley N° 27314 (MINAM, 2017).

La nueva legislación respecto a residuos sólidos plantea tres ejes:

- a. Basura como materia prima: considerar el residuo sólido como un insumo para otras industrias.
- b. Industrialización del reciclaje: incorporación de tecnologías en el manejo de residuos sólidos, lo que permitirá darle mayor valor a la nueva materia prima y la consolidación de emprendimientos vinculados en el sector.
- c. Involucramiento de actores: autoridades comprometidas, grandes y medianas empresas (en cadena con las micro y pequeñas) y a los ciudadanos.

El Artículo 4 de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se indican los Lineamientos de política, entre los cuales se destaca la importancia de desarrollar y usar tecnologías, métodos, prácticas y procesos de producción y comercialización que favorezcan la minimización y reaprovechamiento de los residuos sólidos y su manejo adecuado.

El Artículo 44 de la Promoción de la inversión, se indica que el Estado prioriza la inversión pública y promueve la participación del sector privado en la investigación, desarrollo tecnológico, adquisición de equipos, así como en la construcción y operación de infraestructuras de residuos sólidos.

Además en la Cuarta Disposición Complementaria indica que las autoridades competentes promoverán la ejecución de planes y programas de recuperación de residuos sólidos

reaprovechables o de aquellos residuos cuyas características particulares requieran un manejo especial.

El Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, indica como prioridad la valorización de los residuos sólidos municipales y no municipales frente a la disposición final, basándose en la segregación en la fuente de generación y la recolección selectiva. Además, se indica que la pirólisis debe ser considerada como una de las operaciones de valorización de residuos.

2.1.2. NORMATIVIDAD PERUANA SOBRE PLOMO EN EFLUENTES LÍQUIDOS

La Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, establece en el Artículo 1 que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva. Y en el Artículo 67 establece que las autoridades públicas deben priorizar las medidas de saneamiento básico del agua en las zonas urbanas y rurales, promoviendo la universalidad, calidad y continuidad de los servicios de saneamiento.

Por otro lado la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, en el Artículo 3 declara de interés nacional y necesidad pública la gestión integrada de los recursos hídricos con el propósito de lograr eficiencia y sostenibilidad, así como asegurar su calidad, para garantizar la satisfacción de la demanda de las actuales y futuras generaciones.

a. VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA) DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS EN EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO

Según el Decreto Supremo N° 001– 2015 – VIVIENDA que establece los VMA de las descargas de aguas residuales no domésticas al sistema de alcantarillado sanitario la concentración de plomo en la descarga no debe sobrepasar los 0,5 mg/L. Y se establece que queda totalmente prohibido descargar directa e indirectamente a los sistemas de alcantarillado aguas residuales o cualquier otro tipo de residuos sólidos líquidos o gaseosos que en razón de su naturaleza, propiedades y cantidad causen por si solos o por interacción con otras descargas algún tipo de daño, peligro e inconvenientes.

b. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) DE EFLUENTES LÍQUIDOS

La legislación peruana establece medidas de concentración de elementos característicos de determinadas actividades productivas y que al ser excedidas puede causar daños a la salud, bienestar humano y medio ambiente y su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente.

Según el Decreto Supremo N° 010 – 2010 - MINAM el LMP en cualquier momento para el plomo total es de 0,2 mg/L y el LMP promedio anual es de 0,16 mg/L para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas y según el Decreto Supremo N° 037 – 2008 - PCM el LMP de plomo en cualquier momento es de 0,1 mg/L en el caso de las actividades del subsector hidrocarburos.

2.2. DE LA ESPECIE

Los cítricos son arbustos más o menos desarrollados, que todo el año presentan hojas verdes, brillantes, flores con perfume característico, tronco robusto y ramas principales engrosadas, bien distribuidas. Mantiene en general una forma esférica o elíptica, pero en ciertas especies puede manifestarse como ovoide, dependiendo mucho del portainjerto y de las condiciones ecológicas especialmente suelo y clima (Palacios, 2005).

2.2.1. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

A continuación, se detalla la ficha botánica del precursor empleado en la presente investigación para la obtención de carbón activado (Swingle, 1946):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Orden: Geraniales

Familia: Rutaceas

Sub Familia: Aurancioideas

Género: Citrus

Especie: *Citrus sinensis* L. *Obseck*

Variedad: *Valencia*

2.2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESPECIE

La Naranja Valencia es considerada la reina de las naranjas, ya que prácticamente el 60 por ciento de los naranjales del mundo corresponden a esta variedad (Palacios, 2005). La agroindustrialización de la naranja se concentra principalmente en la producción de jugos. Durante este proceso, entre el 23 y 40 % en peso de la fruta corresponde a la cáscara como desecho (Marulanda, 2001), generando un problema ambiental en la disposición de los mismos (Cerón, 2011).

En la Figura 1 se pueden observar las secciones del fruto de la naranja. Según Palacios (2005) y Primo (1997), el fruto del naranjo es una baya policarpelar, carnosa, formada por dos secciones fácilmente distinguibles:

- a. Cáscara o Corteza: También conocida como flavedo. Se encuentra subdividida en epicarpo y mesocarpo. El epicarpo es la epidermis externa y coloreada del fruto. Aquí abundan vesículas que contienen lípidos, aceites esenciales y cromoplastos. El color amarillo de la piel, pulpa y zumo de los frutos cítricos se debe a los carotenoides, la mayor cantidad de estos está en el flavedo y aumentan en la maduración. El mesocarpo, también conocido como albedo, es de constitución esponjosa y de color blanco y está íntimamente unido al epicarpo. Está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectinas, también contiene cantidades importantes de vitamina C y flavonoides.
- b. Endocarpo: Es de consistencia membranosa y constituye toda la masa de pulpa carnosa comestible. En ella encontramos distintas porciones o mericarpos que llamamos comúnmente “gajos”.

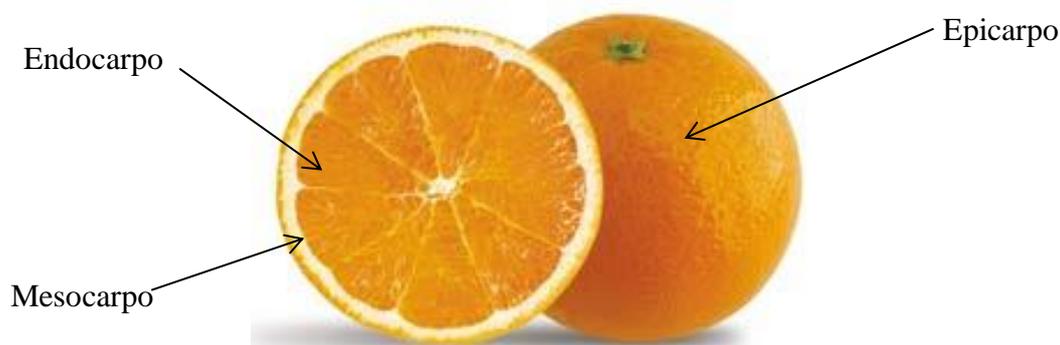


Figura 1: Partes del fruto de naranja. FUENTE: Infoagro (2012).

Hawkins (2012) determinó que del peso total de la naranja fresca entera es aproximadamente 83,2 % pulpa, 11,0 % cáscara externa y 5,8 % albedo (cáscara interna).

Además, determinó que el porcentaje de humedad del albedo es de aproximadamente 39,6%.

2.2.3. DISTRIBUCIÓN DE LA NARANJA

La temperatura es el factor limitante para el cultivo de la naranja. La temperatura óptima para el mejor desarrollo vegetativo de los cítricos oscila entre 23 °C y 34 °C. El máximo se encuentra alrededor de los 39 °C y el mínimo sobre los 13 °C. Los frutos de todas las variedades de agrios cultivadas en regiones donde la humedad relativa es alta, tienden a tener la piel más delgada y suave, mayor contenido en zumo y son de mejor calidad. Por otro lado, el viento puede causar daños de varias clases: deshidratación y muerte del follaje, detención del desarrollo del fruto, caída de los mismos y disminución de la calidad de la cosecha. Mientras que las heladas pueden generar daños que van desde la pérdida de la calidad de parte de la fruta hasta la pérdida total de la cosecha. El granizo reduce su apariencia externa lo que desmerece comercialmente el fruto. Los cítricos son plantas poco exigentes en lo que se refiere al suelo. Se adaptan prácticamente a todos los tipos (Soler, 2006).

Para el 2013, de acuerdo a la Sociedad de Exportadores de Fruta Fresca del Hemisferio Sur, la producción mundial de naranjas fue de 72,5 millones de toneladas y es el cítrico de mayor producción del mundo. Los principales países productores de naranja a nivel mundial son: China, Brasil y Estados Unidos de América.

2.2.4. PRODUCCIÓN DE NARANJA EN EL PERÚ

A nivel mundial el Perú ocupa el puesto catorce de la producción de cítricos (Procitrus, 2013). Para el año 2013, el Perú contó con aproximadamente 27 538 hectáreas de superficie cosechada de naranja, con una producción de 436 388 Toneladas (MINAGRI, 2014). Entre los años 2003 y 2013, el Perú experimentó un crecimiento anual del volumen de producción (3,62%), en la superficie cultivada de naranjas (1,95%) y en el rendimiento por hectárea (1,59%) para el cultivo de naranjas (MINAGRI, 20014). En la Figura 2 se puede apreciar la evolución de la producción de naranjas en el Perú desde el año 2002 al año 2013. Es importante mencionar que la naranja no está considerada dentro de la Canasta Mínima Alimentaria, que sí considera a frutas tales como: limón, plátano, mango y palta (MINAGRI, 2008).

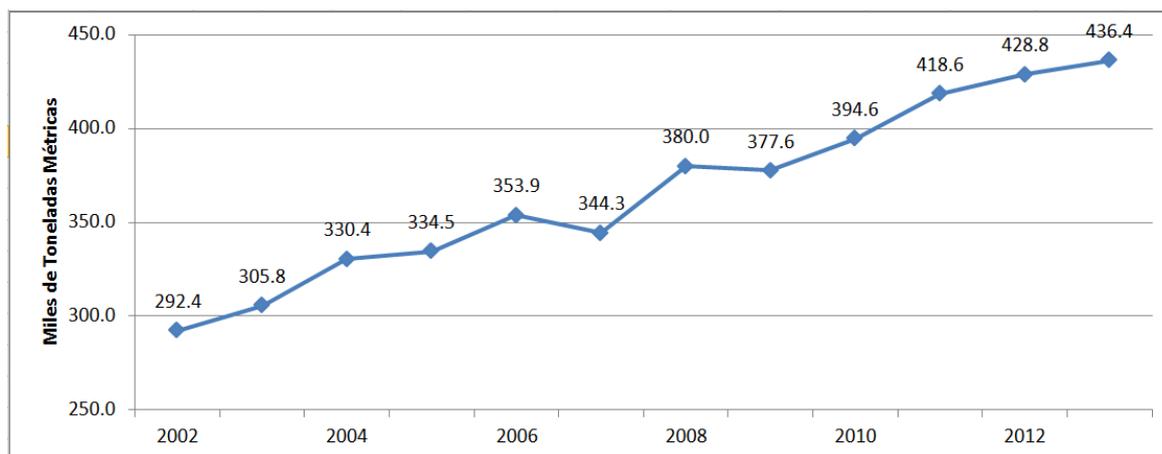


Figura 2: Producción de naranja en el Perú desde el año 2002 al 2013. FUENTE: Ministerio de Agricultura y Riego (2014).

En el Perú los principales departamentos productores de naranja son: Junín, Lima e Ica (MINAGRI, 2014). En el Cuadro 1 se puede observar la producción de naranja de cada uno de los departamentos del Perú en el año 2013.

Cuadro 1: Producción de naranja por departamento en el año 2013

Departamento	Producción (Toneladas Métricas)	Porcentaje de participación (%)
Total	436389	100,00%
Tumbes	266	0,06%
Piura	1876	0,43%
Lambayeque	2473	0,57%
La Libertad	2675	0,61%
Cajamarca	6409	1,47%
Amazonas	5970	1,37%
Áncash	3522	0,81%
Lima	45127	10,34%
Ica	25823	5,92%
Huánuco	11262	2,58%
Pasco	630	0,14%
Junín	245099	56,17%
Huancavelica	317	0,07%
Arequipa	171	0,04%
Moquegua	95	0,02%
Tacna	212	0,05%
Ayacucho	3773	0,86%

Continuación

Departamento	Producción (Toneladas Métricas)	Porcentaje de participación (%)
Apurímac	343	0,08%
Cusco	16000	3,67%
Puno	25817	5,92%
San Martín	26180	6,00%
Loreto	3047	0,70%
Ucayali	8614	1,97%
Madre de Dios	688	0,16%

FUENTE: Ministerio de Agricultura y Riego (2014).

De acuerdo a la Asociación de Productores de Cítricos del Perú (Procitrus), para el año 2013, el Perú es el cuarto país del hemisferio sur con mayor producción de cítricos; por debajo de Brasil, Sudáfrica y Argentina. Según cifras de Procitrus tan solo el 10% de los cítricos producidos en el Perú es exportado, mientras que el resto va dirigido a satisfacer el mercado interno. En la Figura 3 se puede observar la evolución anual del ingreso de naranja al Mercado Mayorista N°2 de Lima Metropolitana. Como se puede observar los ingresos han decrecido (2,15%) desde el año 2008 al año 2013.

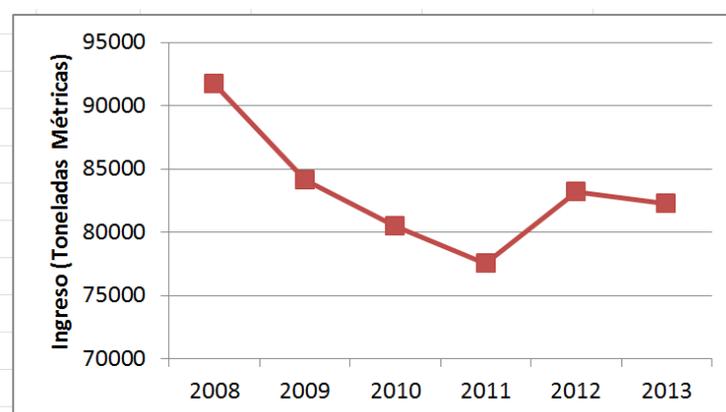


Figura 3: Evolución anual del ingreso de naranja al Mercado Mayorista N°2 de Lima Metropolitana.

FUENTE: Empresa Municipal de Mercados S.A (2014).

Los valores presentados en la Figura 3 pueden deberse al incremento de las exportaciones de cítricos desde el Perú. Los principales destinos de los envíos peruanos al extranjero son: Reino Unido, Holanda, Estados Unidos y Canadá (Procitrus, 2013). En la Figura 4 se muestran los principales frutos que ingresan al mercado mayorista de Lima.

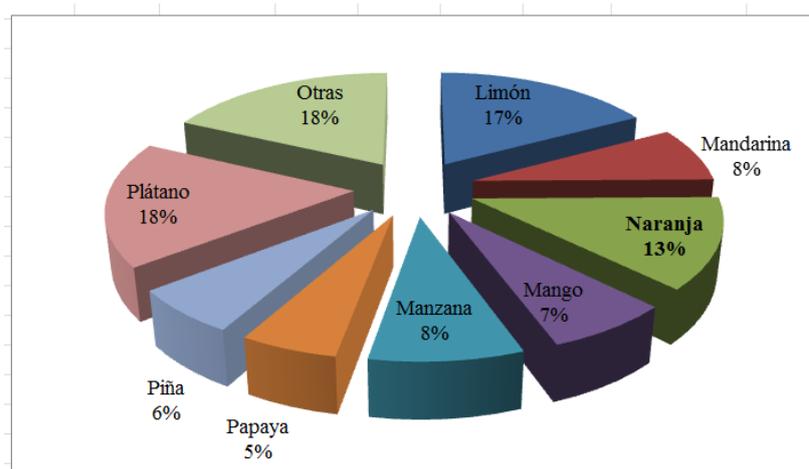


Figura 4: Participación porcentual de las principales frutas ingresadas en el Mercado Mayorista N°2 de Lima Metropolitana. FUENTE: Empresa Municipal de Mercados S.A. y Ministerio de Agricultura y Riego.

2.2.5. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA CÁSCARA DE NARANJA

La cáscara de naranja tiene un contenido de 44,43 % de C; 6,10 % de H; 0,89 % de N y 4,90 % de cenizas. Un poder calorífico de 15 910 kJ/kg y una capacidad de intercambio iónico de 8,04 meq/100 g de muestra (Pinzón *et al.*, s.f.). En el Cuadro 2 se muestra la composición fisicoquímica de la cáscara de naranja.

Cuadro 2: Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis* L. Obseck)

Parámetro	Unidades	Valor
Sólidos solubles	° Brix	7,1 ± 1,2
pH	-	3,93 ± 0,03
Total de acidez	g de ácido cítrico/ 100 ml	0,29 ± 0,03
Índice de formol	-	34 ± 2,4
Humedad	%	85,9 ± 1,6
Grasa	% (en base seca)	1,55 ± 0,17
Ceniza	% (en base seca)	3,29 ± 0,19
Proteína	% (en base seca)	6,16 ± 0,23
Carbohidratos	% (en base seca)	89 ± 1,1
Fibra soluble	% (en base seca)	
Azúcares neutrales		3,8 ± 0,3
Ácido urónico		1,04 ± 0,18
Fibra insoluble	% (en base seca)	
Azúcares neutrales		17,1 ± 1,6
Ácido urónico		7,1 ± 0,9
Lignina		3,2 ± 0,4

Continuación

Parámetro	Unidades	Valor
Pectina	% (en base seca)	17 ± 4
Aceites esenciales	ml/kg	1,45 ± 0,16

FUENTE: Espachs, A. (2004).

La lignocelulosa está presente como un bloque dentro de la estructura de la pared celular de las plantas y vegetales, dicha biomasa es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar problemas actuales de materias primas y energía (Álvarez et al., 2012). La lignocelulosa está conformada principalmente por la celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. Como puede observarse en el Cuadro 2, la cáscara de naranja posee porcentajes considerables de pectina y lignina.

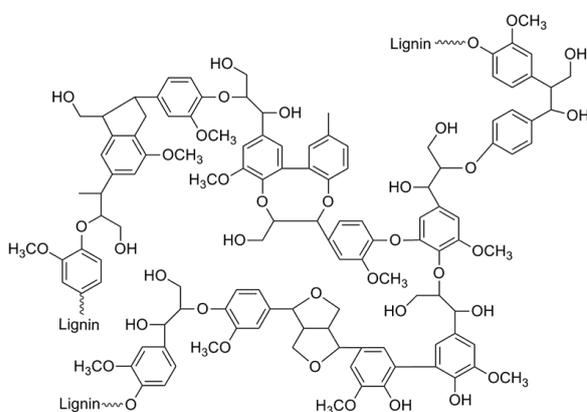


Figura 5: Fragmento de la estructura molecular de la lignina. FUENTE: Vanholme, *et al.* (2010).

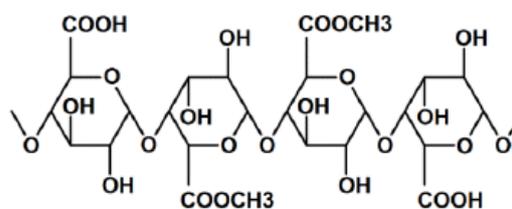


Figura 6: Estructura molecular básica de la pectina. FUENTE: Zegada (2015).

2.2.6. USOS DE LA CÁSCARA DE NARANJA

En el Cuadro 3 se pueden observar algunos de los usos de la cáscara de naranja.

Cuadro 3: Algunos usos de la cáscara de naranja.

Uso	Descripción	Fuente
Extracción de carotenoides	Los carotenoides representan una fuente de provitamina A y antioxidante. La mayor extracción y cuantificación de los carotenoides se obtuvo con la mezcla de hexano-éter de petróleo (75:25) independientemente de la variedad de naranja utilizada.	Moreno, <i>et al.</i> (2006)
Bioproducción de ácido láctico	El ácido láctico se utiliza en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética como materia prima para la síntesis orgánica. El ácido láctico se obtuvo a partir de tres técnicas de separación sólidos-líquido (prensado mecánico, centrifugación y filtración al vacío).	Gil, R; <i>et al.</i> (2008)

Continuación

Uso	Descripción	Fuente
Extracción de pectinas cítricas	Las pectinas son polisacáridos, son sustancias blancas amorfas que forman con el agua una solución viscosa; combinadas en proporciones adecuadas con azúcar y ácidos, forman una sustancia gelatinosa utilizada como espesante. Se obtuvo una pectina en un rendimiento cercano al diez por ciento y con buenas características de gelación.	Devia, (2002)
Obtención de fibra dietaria	Se obtuvo productos con alto contenido de fibra dietaria (FDT) a partir de residuos de la naranja, salvado de cebada y cáscara de camote. La fibra dietaria de residuos de naranja presentó un elevado contenido de FDT (74,63%).	Aguilar, (2002)
Extracción de aceites esenciales	Se extrajo aceite esencial del pericarpio de la naranja <i>Citrus sinensis</i> L. <i>Obseck</i> a través de hidrodestilación. Los aceites esenciales del pericarpio de la naranja presentan un aspecto translúcido.	León, (2015)
Producción de piensos	La cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i> var. Valencia) fue empleada para la preparación de harina la cual presentó un potencial alimentario para híbridos de tilapia roja.	Moreno, M; <i>et al.</i> (2000)
Extracción de colorantes	Se evaluó el proceso de extracción de colorantes de la cáscara de naranja mediante métodos no convencionales, usando agua como solvente.	Padrón, <i>et al.</i> (1999)

Por otro lado, no se recomienda el compostaje de la cáscara de naranja y de los cítricos en general, ya que puede generar extractos de características fitotóxicas (López *et al.*, 2014).

2.3. CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material sólido preparado artificialmente, que se caracteriza por una estructura porosa bien desarrollada, lo que le confiere una elevada superficie específica y capacidad de adsorción (Martínez, 2012).

El carbón activado está colmado de “poros”. Estos agujeros, poseen intensas fuerzas de Van der Waals, debido a la proximidad del carbón y son estos los responsables del proceso de adsorción (Marsh, 2006). Es un sólido compuesto de hidrógeno, oxígeno y principalmente de carbono. Al exponerse el material a altas temperaturas, se liberan las sustancias volátiles albergadas en su interior, aumentando así su superficie interna o específica (González, 2004). La estructura porosa es, tal vez, la propiedad física principal

que caracteriza a los carbones activados. Está formado por poros de diferentes tamaños que según la IUPAC se pueden clasificar en tres grupos principales Cuadro 4 (Menéndez, 2006):

Cuadro 4: Tipo de poro de acuerdo al tamaño del poro

Tipo de poro	Tamaño (nm)
Macroporos	> 50
Mesoporos	< 50 – 2 >
Microporos	< 2

FUENTE: Menéndez (2006).

Cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, ya que se tendría mayor número de centros de adsorción. Sin embargo, se debe tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Puede suceder que las moléculas del adsorbato sean de mayor tamaño que algunos de los poros y por tanto no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas. Por lo que es importante tomar en cuenta la geometría del poro como la del adsorbato (Menéndez, 2008).

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado. Desde el punto de vista estructural los carbones activados son carbones muy desordenados e isotropos. Por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activados aquellos materiales carbonosos que pasen por un estado fluido o pseudofluido durante su carbonización; dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. No resultan adecuados los carbones coquizables (Menéndez, 2008). Para la producción de carbón activado se debe partir de una materia prima con propiedades bien definidas tales como abundancia, dureza, estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización (Bastidas, 2009). Los carbones activados son típicamente elaborados a partir de madera dura, cáscara de coco, huesos de frutas, carbones y de sistemas macromoleculares sintéticos (Marsh, 2006). Las propiedades intrínsecas del carbón activado, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada (Prías, 2011). Además, la microestructura de los carbones activados de origen lignocelulósico tiene una fuerte dependencia con el contenido de lignina y celulosa del precursor. Si se desea obtener un carbón activado con contenido apreciable de mesoporos y macroporos, son adecuados precursores lignocelulósicos con alto porcentaje de lignina (Wan, 2004). Una composición

típica de materiales lignocelulósicos es aproximadamente; 48% C, 6% H y 45% O, y bajo contenido de ceniza (Molina *et al.*, 2004).

Además de las características texturales, la naturaleza química de un carbón activado define sus propiedades. En la superficie del carbón activado se encuentran ubicados diversos grupos funcionales, cuya composición y cantidad podrían afectar su naturaleza química; en consecuencia, producir cambios importantes en su capacidad de adsorción (Menéndez, 2006). El carácter básico o ácido del carbón activado dependerá de la cantidad y tipo de grupos superficiales. La forma y el comportamiento que adopten estos grupos, que puedan interactuar entre ellos, estará afectado además por el pH de la solución en el proceso de adsorción (Drabrowski *et al.*, 2005).

Un efectivo uso del carbón activado requiere conocimientos acerca de la estructura, de su porosidad, del tamaño de sus poros, de la composición de la superficie del carbón y de la dinámica de adsorción para indicar la efectividad de su aplicación industrial (Marsh, 2006). El carbón activado tiene escasa especificidad, es un adsorbente “universal” (Fombuena, 2009.).

2.3.1. MÉTODOS DE ACTIVACIÓN

Las propiedades del carbón activado asociadas a su textura y química superficial dependen tanto de la naturaleza del precursor como del método empleado para la activación (Delgadillo, 2011). Al someter a los materiales precursores a un proceso de activación, que tradicionalmente es física o química, se genera un material carbonoso con estructura porosa. Variables como: tipo de precursor empleado, pretratamiento, modo de activación, etc., marcan las características físico-químicas, tales como la estructura porosa y la química superficial del carbón activado (Martínez, 2012). En la Figura 7 se muestra el flujograma general de ambos métodos de activación.

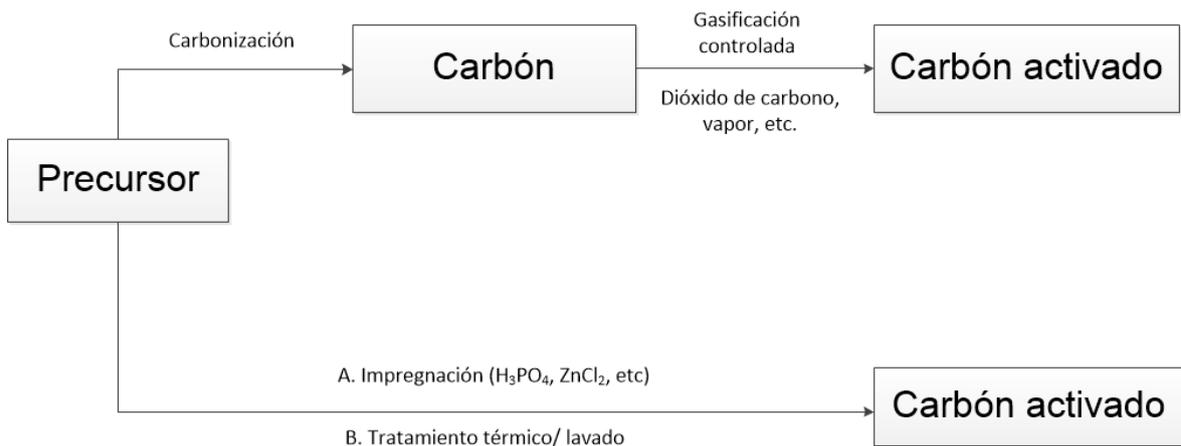


Figura 7: Flujograma general para la producción de carbón activado. FUENTE: Rodríguez-Reinoso (2002).

a. Activación Física

Llamada también activación térmica (Delgadillo, 2011). Se produce en dos etapas sucesivas: carbonización del precursor y activación del *char*.

- Carbonización del precursor a temperaturas del orden de los 800 °C en atmósfera inerte para eliminar sustancias volátiles. En esta etapa se genera un producto intermedio con alto contenido de carbono, denominado comúnmente *char* (Dias *et al.*, 2007).
- La activación del *char* se realiza mediante gasificación controlada, empleando un agente oxidante suave generalmente vapor de agua o CO₂ y temperaturas entre 800 y 1100 °C (Dias *et al.*, 2007).

b. Activación Química:

Existen numerosos compuestos que pueden ser empleados como agentes activantes, sin embargo, los más usados industrialmente son: el cloruro de zinc (ZnCl₂), el ácido fosfórico (H₃PO₄) y el hidróxido de potasio (KOH) (Menéndez, 2008). En este tipo de activación la materia prima es carbonizada a menores temperaturas (450 – 900 °C) (Roopa, 2016).

El uso de ZnCl₂ se ha restringido mucho en la actualidad debido a problemas medioambientales que genera (Menéndez, 2008).

El H₃PO₄, se emplea comúnmente para activar químicamente residuos orgánicos. Durante el proceso de impregnación se produce un aumento de la elasticidad de las partículas debido a que el ácido separa las fibras celulósicas, produciendo una despolimerización parcial de la hemicelulosa y la lignina, que conduce a un hinchamiento de la partícula y a

una disminución de la resistencia mecánica del precursor (Molina, 2004). Los precursores usados en este tipo de activación química con H_3PO_4 son en su mayoría residuos forestales tales como: madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc. (Menéndez, 2008). La razón de impregnación más empleada con H_3PO_4 , suele ser de 1:5, la proporción modificará las propiedades del carbón activado obtenido. Y el rendimiento del carbón activado suele ser del 50% (Menéndez, 2008).

La activación química con KOH produce los denominados “carbones superactivados”, con superficies específicas del orden de los 3 000 m^2/g . Los precursores preferibles para la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc (Menéndez, 2008).

Lillo (2003) indica las ventajas que ofrece la activación química frente a la activación física:

- Requiere menores temperaturas de pirólisis.
- Se realiza en una sola etapa.
- Los rendimientos de carbón activado obtenido son mayores que cuando se aplica la activación física.
- Se puede desarrollar bien la microporosidad, pudiéndose controlar y mantener estrecha si se desea.
- Se produce un importante descenso en el contenido mineral de la muestra.
- Puede obtener carbón activado de superficie específica muy elevada.
- El rendimiento suele ser del 50 % (Menéndez, 2008).

Teng H. *et al.* (1998) indica las desventajas de la activación química frente a la activación física:

- Requiere una etapa de lavado.
- El proceso es corrosivo.

2.3.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO

La aceptabilidad del carbón activado destinado al tratamiento de aguas puede determinarse a través de diversos parámetros. A continuación, se detallan algunos de ellos y en el Cuadro 5 se encuentran los rangos de valores típicos para dichos parámetros.

a. Densidad aparente

Es el peso en g/cm^3 de carbón totalmente seco en aire. Esta variable es la base para determinar el volumen de cama necesaria para contener una determinada masa de carbón activado granular. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesario para lograr un buen retrolavado del carbón.

b. Contenido de humedad

Mientras mayor la humedad, menor es el porcentaje de carbón activado efectivo. Hassler (1988), menciona que el contenido de humedad no afecta el poder de adsorción.

c. Contenido de material volátil

ASTM (1976), indica que el contenido de material volátil se define como la pérdida de peso de productos gaseosos excluyendo el vapor húmedo en la muestra del carbón activado.

d. Contenido de ceniza

La cantidad y composición de la ceniza puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado. En el caso del tratamiento de agua, la desventaja fundamental de las cenizas consiste en que mientras mayor su porcentaje, menor es la cantidad de carbón activado efectivo (Hassler, 1988).

e. Contenido de carbono fijo

ASTM D-1762, explica que el carbono fijo es un valor calculado, se halla del total menos el porcentaje de material volátil y el contenido de cenizas. El contenido de carbono fijo está compuesto de carbono, además de pequeñas cantidades de azufre, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Hassler (1988), afirma que el carbono fijo es afectado por el porcentaje de lignina de la materia prima, siendo ella la responsable de la formación del carbón además del alquitrán, gases no condensables, etc.

f. pH

En el caso de un carbón que se activa con ácido fosfórico, el producto que sale del proceso de fabricación tiene fosfatos que al disolverse en agua se convierten en ácidos y por lo tanto disminuyen el pH.

Si el pH del extracto acuoso es igual al del agua que va a tratarse, no ocurre alteración en esta última. Cuando es diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros tratados, para las aplicaciones en las que esta variación es inaceptable se puede agregar un ácido o base, según sea el caso, e inundar el carbón hasta lograr el pH requerido. Otro método es lavar el carbón activado hasta eliminar los solubles que modifican el pH; este último método puede llegar a requerir grandes volúmenes de agua (DGNSCFI, s.f.).

Cuadro 5: Principales parámetros con los que se especifica un carbón activado granular para el tratamiento de agua.

Parámetro	Unidades en las que se expresa	Rango de valores típicos
Área superficial	m ² /g	500 a 1200
Densidad aparente	g/cm ³	0,26 a 0,65
Tamaño efectivo de partícula	mm	0,4 a 3,3
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11
Humedad (al empacar)	%	2 a 15

FUENTE: Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industria Mexicano. (s.f.)

2.3.3. TIPOS DE CARBONES ACTIVADOS

Los carbones activados pueden clasificarse de acuerdo al tamaño de partícula como: carbón activado en polvo (15 a 25 µm) y carbón activado granular (1 a 5 mm). En general, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido mientras que el granulado puede ser aplicado tanto en medio líquido como gas (ASTM, 1976).

- a. Granular: constituido por partículas de mayor tamaño a la malla N° 80. Usualmente se aplica a un flujo continuo en descontaminación de líquidos.
- b. En polvo: constituido por partículas de menor tamaño a la malla N° 80. Usualmente se aplican en sistemas por lotes para la descontaminación de líquidos.

Existen además otras formas adsorbentes de carbón denominadas “conformadas” o con “forma específica”, como las fibras de carbón activado, las telas y los filtros de carbón activados, las estructuras monolíticas, las membranas de carbón, aglomerados, etc. (Menéndez, 2008).

2.3.4. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO

De la producción mundial de carbón activado cerca del 40 % se emplea en la industria alimentaria, química y farmacéutica; otro 40% se utiliza en tratamiento de potabilización y

descontaminación de aguas residuales, en combinación con otros procesos físico-químicos o biológicos; aproximadamente un 5% se utiliza como soporte para catalizadores (Auer *et al.*, 1998; Torné, 2006; Rey *et al.*, 2009). El resto de la producción se emplea en sectores como la minería, electrodeposición, almacenamiento de energía, etc. (Concheso *et al.*, 2006).

Martínez (2012) señala las siguientes aplicaciones del carbón activado:

- Como adsorbente
- Como catalizador
- Como soporte catalítico

Los carbones activados que se aplican en fase gaseosa suelen ser muy microporosos y con áreas superficiales superiores a 1000 m²/g, para garantizar su capacidad de adsorción. En cambio, los que se aplican en fase líquida deben tener un mayor volumen de macroporos, para facilitar la difusión hacia los meso y microporos (Marsh, 2006). Comúnmente el carbón activado se emplea en el tratamiento de corrientes acuosas residuales con un contenido en materia orgánica, expresado como DQO, inferiores a 2 g/L, ya que para un adecuado rendimiento económico, es imprescindible la regeneración y reutilización del adsorbente (Sheintuch *et al.*, 1999).

Otros usos del carbón activado son la purificación de gases, descafeinación, purificación del oro, extracción de metales, purificación del agua, medicina, tratamiento de residuos, filtros de aire en máscaras y respiradores, filtros en compresores de aire, entre otros (Roopa, 2016). Los carbones activados en el mercado actual son el resultado de la continua e intensiva investigación y desarrollo para una óptima aplicación (Marsh, 2006).

2.3.5. PRODUCCIÓN Y DEMANDA DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL PERÚ

La información sobre las importaciones y exportaciones del carbón activado se obtuvieron a partir, del sistema de inteligencia comercial, ADEX Data Trade cuya información corresponde a lo reportado por Aduanas del Perú, en base a la partida arancelaria 3802100000 – Carbones Activados.

El Perú importa aproximadamente el 95% de su demanda de carbón activado (El Comercio, 2010). En la Figura 8 se puede observar la variación anual de las cantidades netas totales importadas y exportadas por el Perú desde el año 2000 al 2016. De acuerdo a estas cifras el crecimiento de las importaciones desde el 2000 al 2016 ha sido de 24,20 por

ciento mientras que las exportaciones han sufrido una caída de 3,15%. Sin embargo, cabe resaltar que las cantidades de carbón activado exportado corresponden a reexportaciones (González, 2004). En el año 2016 los países destino de mayor proporción para las exportaciones de carbón activado fueron Bolivia y El Salvador (Aduanas Perú, 2017).

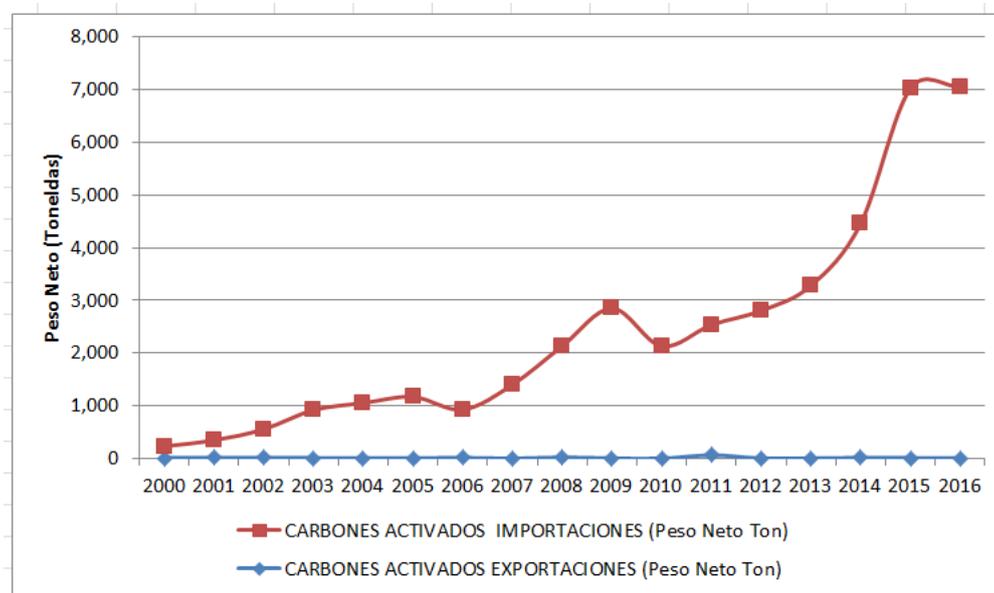


Figura 8: Variación de la cantidad total de importaciones y exportaciones de carbón activado en el Perú, desde el año 2000 al año 2016. FUENTE: Aduanas Perú (2017).

Así mismo los principales países de procedencia de las importaciones de carbón activado fueron China, India, Filipinas, Países Bajos y Sri Lanka, tal como puede apreciarse en la Figura 9. Es importante resaltar que la relativa simpleza para la fabricación de carbón activado ha propiciado que varios países en vías de desarrollo tales como: India, Sri Lanka y Filipinas exporten cantidades importantes de este producto, sin embargo, la comercialización de carbón activado se efectúa a través de puertos ubicados en países con gran capacidad de movimiento marítimo tales como: Hong Kong, Singapur y Panamá (González, 2004). Para el año 2016, el carbón activado importado por el Perú procedió de China en un 64,18 %, India 13,21 %, Filipinas 7,75 %, Países Bajos 3,91 %, Sri Lanka 2,60 % y otros 8,35% (Aduanas Perú, 2017).

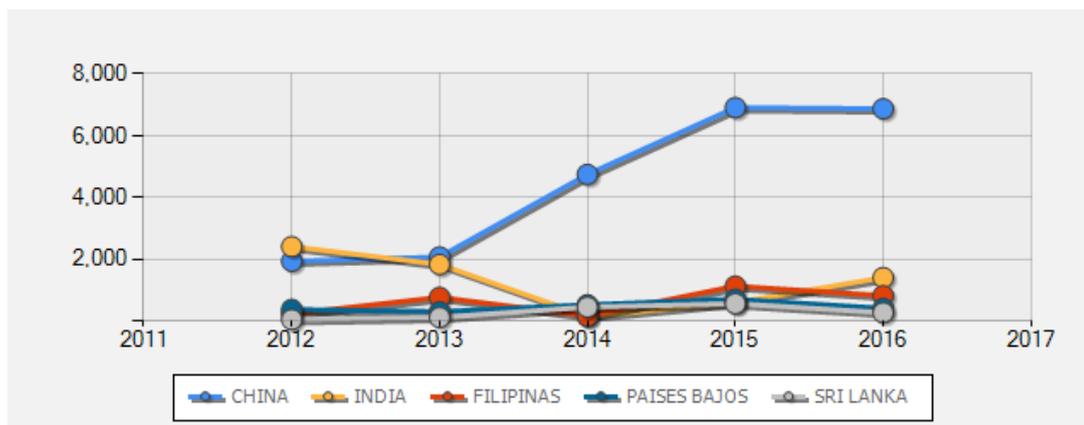


Figura 9: Evolución de mercados de procedencia del carbón activado importado por el Perú del 2012 al 2016 (Miles USD FOB). FUENTE: Aduanas Perú (2017).

2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN

El término “sorción” es usado para describir todo tipo de captura de una sustancia tanto desde la superficie externa, así como la superficie interna de sólidos porosos o líquidos (Skoulikides, 1989). La adhesión de partículas a una superficie se llama adsorción. La sustancia que se fija por adsorción es el adsorbato y el material subyacente que se analiza en esta sección es el adsorbente o sustrato. El proceso inverso de la adsorción es la desorción (Levine, 2014). El término adsorción incluye la absorción de componentes gaseosos o líquidos de mezclas desde la superficie externa y/o interna de sólidos porosos (Shelef *et al.*, 2000).

2.4.1. TIPOS DE SORCIONES

La adsorción física envuelve solo fuerzas intermoleculares relativamente débiles, mientras que, la adsorción química comprende esencialmente la formación de enlaces químicos entre la molécula del sorbato y la superficie del adsorbente. Casi todo el proceso de separación por adsorción depende de la adsorción física mucho más que de la adsorción química (Ruthven, 1984).

Ruthven (1984) y Rouquerol (2014) resumen las características importantes que distinguen a la fisisorción y la quimisorción:

- a. La fisisorción es, en general, un fenómeno con relativamente baja especificidad.
- b. Las moléculas quimisorbidas están vinculadas a partes reactivas de la superficie y la adsorción es necesariamente confinada a la monocapa. A presiones relativamente altas, generalmente la fisisorción ocurre a multicapas.

c. La molécula fisisorbida mantiene su identidad y durante la desorción retorna al fluido en su forma original. La quimisorción puede implicar la pérdida de la identidad de la molécula adsorbida y no puede ser removida por desorción.

d. La energía de la quimisorción es del mismo orden de magnitud que la de una reacción química comparable. La fisisorción es siempre exotérmica, pero la energía implicada es generalmente no mucho mayor que la energía de condensación del adsorbente. Sin embargo, esta energía en la fisisorción aumenta considerablemente si se da en los poros estrechos.

e. Durante la fisisorción no se da la interferencia de electrones, sin embargo, la polarización puede ocurrir. En la quimisorción se da transferencia de electrones que conduce a la formación de enlaces entre el sorbato y la superficie.

f. La fisisorción es solo significativa a temperaturas relativamente bajas, mientras que la quimisorción se da en un amplio rango de temperaturas.

2.4.2. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN

Para determinar la capacidad de adsorción (q_e) de los carbones activos se emplea la Ecuación 1 (Lavado *et al*, 2010):

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{M} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

q_e : Es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg de soluto/ g del adsorbente)

C_o : Es la concentración inicial (mg/L) en una solución de volumen (L)

C_e : Es la concentración en el equilibrio (mg/L) luego de la adsorción

M : Es la masa del adsorbente (g)

V : Volumen de la solución (L)

2.5. PLOMO

El plomo es un metal gris-azulado inorgánico que se encuentra naturalmente en pequeñas cantidades de la corteza terrestre (Vilchis, 2013). El plomo se presenta en un gran número de yacimientos a lo largo de la cordillera peruana, asociados generalmente al zinc, plata, cobre y otros metales (Samamé, 1981). En la naturaleza el plomo se presenta como galena (PbS), la cual es la forma primaria del plomo (Eisler, 1988). El plomo se obtiene

básicamente de la galena y, en menor proporción, de otros minerales de plomo asociados a la galena y a los sulfuros complejos como la anglesita (PbSO_4), cerusita (PbCO_3), crocoita (PbCrO_4), etc. (Sublet *et al.*, 2003). En el Cuadro 6 se muestran las propiedades fisicoquímicas del plomo.

Cuadro 6: Propiedades físico - químicas del elemento plomo.

Propiedad	Medida	Propiedad	Medida
Número atómico	82	Radio atómico (Å)	1,75
Valencia	+2 y +4	Masa atómica (g/mol)	207,2
Estado de oxidación	2+	Densidad (g/ml)	11,342
Radio covalente (Å)	1.47	Punto de ebullición (°C)	1 749
Radio iónico (Å)	1.20	Punto de fusión (°C)	328

FUENTE: Vilchis (2013)

2.5.1. PROPIEDADES DEL PLOMO

A continuación, se describen algunas de las propiedades más resaltantes del plomo (International Lead Association, 2016):

- a. Elevada densidad: El plomo posee una elevada densidad; $11,3 \text{ g/cm}^3$; en comparación con otros metales. Esto debido a su elevada masa atómica (207) y una estructura densa. Esta alta densidad le confiere una particular atenuación de los rayos X, rayos gamma y ondas sonoras.
- b. Maleabilidad: El plomo es muy maleable, es decir se puede deformar con facilidad a diferencia de la mayoría de los metales cuya deformación es muy limitada antes que el metal se torne duro y quebradizo, por lo que se debe recocer el metal. El plomo se funde a una temperatura mucho menor que la mayoría de los metales. Esto permite una deformación extensiva antes de la fractura, sin necesidad de recocer el metal.
- c. Resistencia a la tracción: La resistencia del plomo a la tracción es muy inferior a la de otros metales comunes.
- d. Corrosión: La corrosión del plomo suele ser muy lenta, ya que muchos de sus compuestos pueden formar barreras protectoras en la superficie del metal. El plomo generalmente muestra buena durabilidad cuando se expone al aire y a muchas soluciones acuosas, incluso en algunos ambientes bastante hostiles.
- e. Coloración: Muchos compuestos del plomo poseen colores fuertes, muchos de los cuales no se alteran luego de ser expuestos prolongadamente al sol. Los compuestos son relativamente estables, y pueden ser encontrados en pinturas y otros colorantes.

Además de las propiedades anteriormente mencionadas, los óxidos de plomo son buenos formadores de vidrio.

2.5.2. APLICACIONES DEL PLOMO

Aproximadamente un 40 % del plomo se utiliza en forma metálica, un 25 % en aleaciones y un 35 % en compuestos químicos (Nordberg, 2000). Algunos ejemplos de sus aplicaciones industriales son: las fundidoras de metales, el vidriado de piezas, la fabricación de baterías y soldaduras, esmaltes, antide-tonantes y municiones. La principal aplicación es la fabricación de baterías para autos. Otras aplicaciones importantes son la fabricación de forros protectores para cables eléctricos como los de televisión, internet, etc., materiales de soldadura, municiones, fabricación de pigmentos sintéticos, como químico para la refinación del petróleo, entre otros; como se puede observar en la Figura 10.

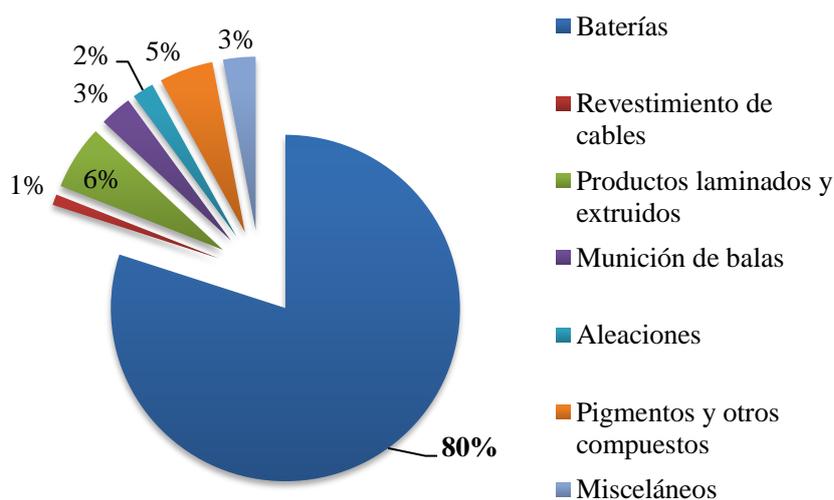


Figura 10: Usos del Plomo. FUENTE: International Lead and Zinc Study Group (2017).

Los aceites reutilizados de motores, las pilas y baterías usadas, así como la combustión de productos con plomo o compuestos de plomo, son fuentes de desechos que contienen plomo (Aguilar *et al.*, 1999).

En el Perú los usuarios no domésticos que realicen las siguientes actividades económicas industriales deben presentar en sus informes de monitoreo de efluentes al plomo como uno de los parámetros (VIVIENDA, 2012):

- Fabricación de pasta de madera, papel y cartón

- Fabricación de papel y cartón ondulado y de envases de papel y cartón
- Actividades de servicios relacionadas con la impresión
- Fabricación de sustancias químicas básicas y de otros productos químicos
- Fabricación de pinturas, barnices y productos de revestimiento similares, tintas de imprenta y masillas
- Fabricación de productos primarios de metales preciosos y otros metales no ferrosos, en el caso la empresa realice procesos de galvanoplastía
- Fabricación de armas y municiones
- Tratamiento y revestimiento de metales; maquinado
- Fabricación de vehículos automotores
- Fabricación de bicicletas y de sillones de ruedas para inválidos

En el caso de la industria de galvanoplastía, se emplea el plomo debido a su elevada resistencia a la corrosión, gran maleabilidad y como protector de radiaciones ionizantes. Los óxidos de plomo se utilizan en las placas de las baterías eléctricas y los acumuladores (PbO y Pb_3O_4) (Gladstone *et al.*, 2012). El plomo se emplea también en procesos de estiramiento de placas y en el decapado el cual consiste en limpiar el material con sustancias químicas y agua a presión, para eliminar óxidos (CEPYME, 2010). Se utiliza también, para el revestimiento de cables y como componente de soldadura.

En el caso de la industria de pinturas, se ha eliminado en cierto grado el uso de pigmentos de plomo debido a su toxicidad, sin embargo, se continúan empleando por la intensidad que confieren al color y sus bajos costos. Por ejemplo, el Pb_3O_4 se emplea en la fabricación de pinturas. Las sales de plomo constituyen la base de muchas pinturas y pigmentos: el carbonato y el sulfato de plomo se utilizan como pigmentos blancos y los cromatos de plomo sirven para obtener amarillo, naranja, rojo y verde de cromo. El naftenato de plomo es un agente secante muy utilizado. Las sales orgánicas de elementos metálicos (cobalto, manganeso, plomo, calcio, zinc, vanadio, hierro, cerio y zirconio) se emplean como secantes en la fabricación de pinturas. En el caso de las industrias de pinturas los efluentes con valores elevados de plomo se dan durante las siguientes operaciones: lavado de estanques de preparación de pinturas en base solvente, lavado de estanques de preparación de pinturas al agua y lavado de reactores de fabricación de resinas (SINIA, 1998).

Los óxidos de plomo son componentes de barnices y esmaltes. El acetato de plomo también tiene usos importantes en la industria química, como fijador de tintes.

El tetraetilo de plomo se utiliza como agente antidetonante para la gasolina en aquellos países en que la legislación aún lo permite. Los alquilos de plomo (compuestos de plomo orgánico) en las gasolinas están sujetos a restricciones legales en muchos países y a limitaciones de los fabricantes con apoyo gubernamental en otros. En muchas jurisdicciones se ha prohibido su uso por completo.

El plomo metálico se utiliza en forma de planchas o tubos cuando se requiere una gran maleabilidad y resistencia a la corrosión, como en la industria química o en la construcción.

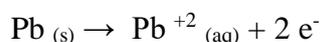
Existen muchos otros ejemplos de usos del plomo en la industria, tales como: los óxidos de plomo que son empleados en la fabricación de vidrio, el arseniato de plomo que es empleado como un insecticida, los óxidos de plomo se emplean como agentes de mezcla en la fabricación de caucho (PbO), la industria automovilística emplea el plomo como empaste, el sulfato de plomo utilizado en mezclas de caucho, etc. (Nordberg, 2000)

2.5.3. DISOLUCIÓN DE PLOMO EN FASE ACUOSA

Las aguas naturales rara vez contienen plomo por encima de 0,05 mg/L. No obstante, los múltiples usos industriales del plomo constituyen el medio de exposición más frecuente y más directa para el ser humano (Aguilar *et al.*, 1999).

El plomo se encuentra en cuatro estados de valencia: elemental (Pb⁰), monovalente (Pb⁺), divalente (Pb²⁺) y tetravalente (Pb⁴⁺). Todas estas formas son ambientalmente importantes, exceptuando posiblemente el plomo monovalente (Eisler, 1988). Scoullon (1986) mencionado por Eisler, señala que el plomo se encuentra mayormente como Pb²⁺.

El metal se disuelve en iones metálicos acuosos y se da la generación de electrones:



La química del plomo es compleja, en el agua el plomo es más soluble y biodisponible bajo condiciones de bajo pH, bajo contenido orgánico, bajas concentraciones de sales de calcio, hierro, manganeso, zinc y calcio (Eisler 1988).

IPCS (1989) señala que los compuestos inorgánicos de plomo son poco solubles en agua, sin embargo, a temperaturas elevadas en un rango de 0 °C a 40 °C, la solubilidad es mayor.

Benes *et al.* (1985) nombrado por Eisler (1988), señalan que el plomo y sus compuestos tienden a concentrarse en la micro capa superficial del agua (arriba de los 0,3 mm), especialmente cuando se encuentran presentes materiales orgánicos. En el agua, el plomo existe en tres formas: disuelta lábil (Pb^{+2} , $PbOH^+$, $PbCO_3$), disuelto ligado (coloides o fuertes complejos), o como partículas. Las formas lábiles representan una parte significativa de los depósitos provenientes de la atmósfera, las formas particuladas y ligadas son comunes en desagües y/o efluentes mineros.

Desafortunadamente, la reducida información disponible sobre la especiación del plomo en soluciones acuosas ha limitado seriamente el entendimiento del transporte y remoción del plomo (IPCS, 1989).

La biodisponibilidad del plomo es generalmente más baja, cuando se encuentra presente materia orgánica, sedimentos o partículas minerales (IPCS, 1989).

Eisler (1988) señala a la concentración del ión libre como uno de los factores más importantes, que influyen en la toxicidad acuática del plomo, el cual afecta la disponibilidad del plomo para los organismos, asimismo la toxicidad inorgánica de las sales de plomo.

Los diagramas de distribución de especies permiten conocer qué forma del metal predomina según el pH del medio en el que se encuentra. Por lo que se puede saber a partir de qué pH el metal empezará a precipitar.

En la Figura 11 se puede observar que a partir de un pH superior a 5 el plomo puede presentarse en la solución como $Pb(OH)_2$ y que a partir de un pH mayor a 6 la concentración del plomo como ión Pb^{+2} decrece drásticamente. En medio acuoso, a pH menores a 7.8, puede encontrarse plomo Pb^{2+} un catión incoloro debido a la estabilidad de su configuración electrónica ($[Xe]6s^2$) que impide transiciones electrónicas en longitudes de onda del espectro visible.

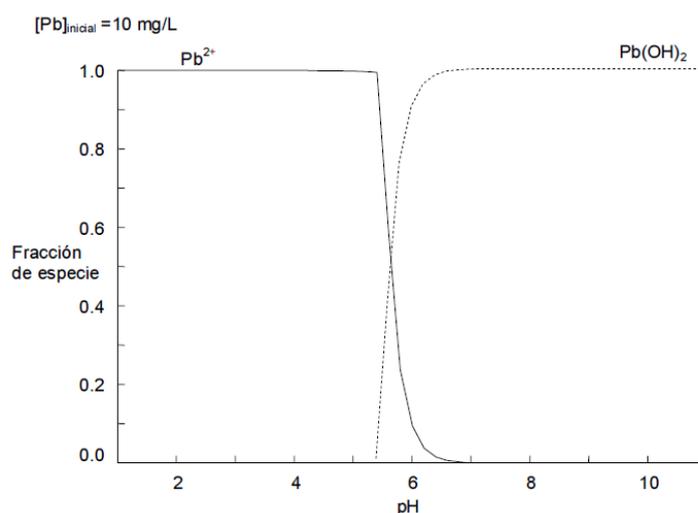


Figura 11: Diagrama de distribución de especies de plomo. FUENTE: Hernáiz, *et al.* (2007)

2.5.4. EFECTOS NOCIVOS DEL PLOMO

La USEPA (2016) lo ha clasificado entre las 20 sustancias químicas más peligrosas para la salud humana (Lavado *et al.*, 2010). El plomo es un contaminante mayor en el ambiente y genera gran preocupación para la salud humana y los ecosistemas (Ortiz *et al.*, 2009) debido a que por su peso atómico tiende a acumularse en suelos, sedimentos y cuerpos de agua en forma rápida (Sharma y Dubey, 2003), y a permanecer en el ambiente como un contaminante atmosférico.

Lo más preocupante es que los efectos de la exposición al plomo son visibles tanto a largo como corto plazo, y no es necesaria la exposición a muy elevadas concentraciones para presentar síntomas (Zhao *et al.*, 2014).

a. Salud humana

Entre los efectos documentados de intoxicación crónica por plomo están la disminución de la fertilidad en ambos sexos, bajo peso al nacer y déficit de talla, disminución del coeficiente intelectual, disminución de agudeza auditiva, daño renal, hipertensión, anemia, trastornos digestivos, dificultades para la concentración y memoria, dolores musculares y en articulaciones, osteoporosis, alteración de mecanismos de defensa del organismo y del metabolismo de drogas en el hígado (Poma, 2008). El plomo no tiene ninguna función conocida en el cuerpo humano, pero puede competir con el metabolismo del calcio y del hierro (Azcona *et al.* 2015). Es muy mencionada la disminución de la capacidad intelectual en niños debido a la exposición prolongada a plomo (Jarup, 2003), así como desórdenes

neuropsiquiátricos como deficiencia de atención y comportamiento antisocial (Bellinger, 2008).

La OMS ha establecido que la máxima concentración permisible de plomo en el agua potable es de 0,01 mg/L. Las principales fuentes de ingreso del plomo al organismo son el aire inhalado, los alimentos y el agua de bebida (Moore *et al.*, 1985).

b. Salud animal

En muchos estudios se ha observado el proceso de bioacumulación y biomagnificación de plomo a través de la cadena alimenticia, encontrándose, por ejemplo, que existe una transferencia de Pb desde aguas contaminadas hacia el ganado ovino, acumulándose principalmente en el hígado de estos animales (Cai *et al.*, 2009). El mismo hecho fue reportado en gallinas por la ingesta de insectos cuya base de alimentación eran plantas localizadas en lugares contaminados (Zhuang *et al.*, 2009). Si bien muchos otros estudios demuestran que el plomo tiende a decrecer en concentración a su paso por la cadena trófica; sus efectos no deberían ser pasados por alto.

c. Sistemas acuáticos

Los organismos incorporan plomo del medio ambiente, generalmente en proporción a la cuantía del contaminante. En las especies acuáticas la toma de plomo puede ocurrir desde la superficie del agua y del sedimento, aunque la toma desde el sedimento usualmente es la predominante (Bernaes, 2006).

Flegal (1895) citado por Eisler (1988), señala que, entre la biota acuática, las concentraciones de plomo usualmente son altas en algas y en organismos bentónicos y menores en los niveles tróficos más altos ya que con el plomo la biomagnificación no se presenta dentro de la cadena alimenticia.

d. Plantas

Para el caso de las plantas, el síntoma predominante en plantas no tolerantes al plomo es un severo retraso en su crecimiento, menos peso de las raíces y aparición de nuevos brotes en la planta (Verma y Dubey, 2003), debido a alteración de actividad enzimática, así como de la nutrición mineral y el balance hídrico, afectando en general el estado hormonal y celular. También es marcada la disminución en los niveles de fotosíntesis, debido a la inhibición

del transporte de electrones (Miles *et al.*, 1972), con la consecuente reducción en la acumulación de carbohidratos producto principal de la fotosíntesis (Huang *et al.*, 1974).

2.5.5. TRATAMIENTO DEL PLOMO EN EFLUENTES INDUSTRIALES

Se debería evitar la producción de contaminantes y de ser inevitable, capturarse en el punto de generación para tratarlos inmediatamente, idealmente para su reutilización en el propio proceso industrial (Pereda, 2007). En el Cuadro 7 se mencionan diferentes técnicas de remoción de metales pesados en aguas residuales y las ventajas y desventajas inherentes a cada uno de los métodos. Es importante mencionar que la selección de la técnica de tratamiento más conveniente para la remoción de plomo depende de la concentración inicial, de las características del agua residual, del capital y costos de operación, de la flexibilidad de la planta de tratamiento, el impacto ambiental, etc. (Kurniawan *et al.*, 2006).

Cuadro 7: Métodos empleados para la remoción de plomo en aguas residuales.

Método	Desventajas	Ventajas
Precipitación química	Elevada generación de lodos, dificultad de separación, baja efectividad y limitado a elevadas concentraciones.	Simple y barato.
Oxidación química o reducción	Se requiere personal especializado, rendimientos bajos.	Mineralización.
Tratamiento electroquímico	Limitado a concentraciones elevadas y costoso.	Recuperación del metal.
Ósmosis inversa	Limitado a elevadas concentraciones, costoso y se requieren presiones elevadas. Costos elevados.	Efluente reutilizable.
Intercambio iónico	Resinas costosas y la regeneración de las resinas genera contaminación.	Recuperación del metal.
Evaporación	Costoso y genera lodos.	-
Adsorción	El adsorbente puede ser costoso.	Recuperación del metal y efectivo a concentraciones relativamente bajas.

FUENTE: Volesky (2001)

Otros métodos son: las extracciones orgánicas, tecnología de membranas, adsorción. Otros procesos están siendo investigados con el fin de retirar metales pesados de residuos líquidos, destacando: precipitación extracelular, la biosorción y la captación a través de

biopolímeros purificados (Pagnanelli *et al.*, 2005). Los principales inconvenientes de la biosorción son que las características organolépticas afectan la calidad del agua post tratamiento, su aplicación a nivel industrial es limitada por la inestabilidad química y estructural del material (Lugo, s.f.). En el Cuadro 8 se observan algunas de las características de cada una de las tecnologías de remoción mencionadas.

Cuadro 8: Características notables de las tecnologías empleadas para la remoción de metales pesados en efluentes industriales.

Tecnología aplicada	Tolerancia a los cambios de pH	Selectividad a los metales	Influencia de los sólidos en suspensión	Tolerancia a sustancias orgánicas	Niveles de metal óptimos soportables
Precipitación química	Alta	Baja	Baja	Alta	> 10
Electrólisis	Alta	Moderada	Baja	Alta	>10
Tecnología de membranas	Baja	Moderada	Muy alta	Intolerancia	>10
Intercambio iónico	Baja	Alta	Muy alta	Inactivan la resina	<100
Adsorción sobre carbón activado	Baja	Moderada	Muy alta	Puede inactivar el carbón	<10
Extracciones orgánicas	Media	Alta	Muy alta	Intolerancia	> 5000

FUENTE: Martín (2008)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. PROCEDENCIA DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima fue tomada de un negocio de expendio de bebidas ubicado en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Dicha materia prima procede del Distrito de Perené, uno de los seis distritos pertenecientes a la provincia de Chanchamayo, ubicada en el departamento de Junín, bajo la administración del Gobierno regional de Junín, en la zona central del Perú.

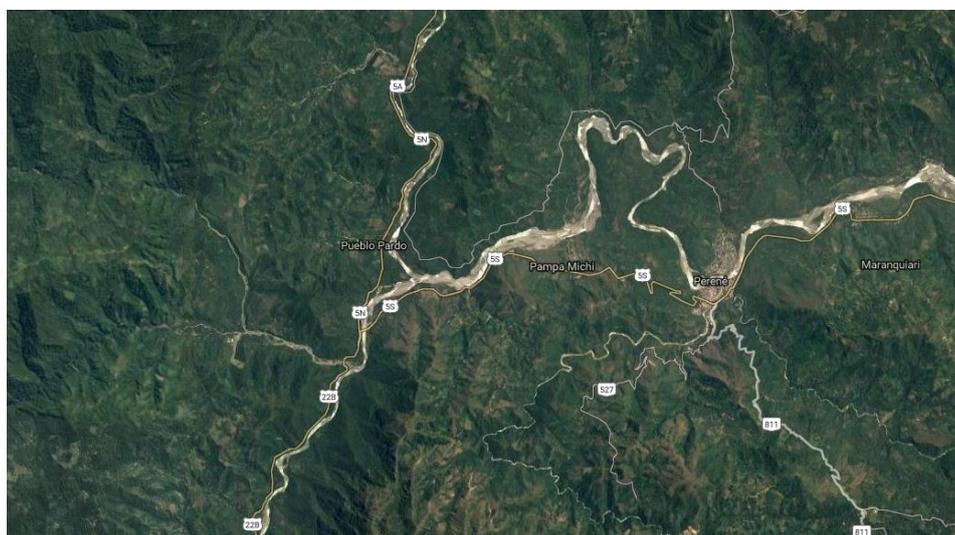


Figura 12: Vista Satelital de Perené – Chanchamayo – Junín – Perú. FUENTE: Vía Satelital Internet Networks (2017).

3.2. LUGAR DE EJECUCIÓN

El estudio se llevará a cabo en el laboratorio del Área de Transformación Química – Laboratorio de Pulpa y Papel del Departamento de Industrias Forestales y el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias ambos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.1. MATERIA PRIMA

El material precursor para la obtención de carbón activado por activación química con H_3PO_4 será la cáscara de naranja (*Citrus sinensis L. Obseck*). La cáscara de naranja será recolectada del puesto de ventas de jugos de naranja, localizado al interior de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en un mismo día, una muestra aleatoria.



Figura 13: Materia prima empleada. FUENTE: Elaboración propia

3.3.2. MATERIALES

- Bolsas herméticas Ziploc
- Bolsas de papel
- Papel filtro N° 41 Whatman
- Temporizador
- Cronómetro
- Crisoles de porcelana con tapa
- Mallas 40/60 ASTM (tamaño de partículas entre 0,425 mm y 0,250 mm)
- Mortero de porcelana
- Espátulas
- Baguetas, buretas, embudos, pipetas, probetas, vaso de precipitado, barra de agitación y matraz Erlenmeyer
- Pinzas de metal
- Agua destilada (H_2O)
- Ácido fosfórico (H_3PO_4)
- Solución estándar de plomo de 1 000 mg/L marca Merck
- Hidróxido de Sodio ($NaOH$)
- Ácido Nítrico (HNO_3)

3.3.3. EQUIPOS

- Horno fijo de activación de °T máxima de 1 200 °C trifásico, de 220 V.
- Balanza analítica
- Estufa eléctrica
- Plancha con sistema de calentamiento y agitación
- pH-metro
- Espectrofotómetro de adsorción atómica
- Campanario con desecador de silicagel

3.3.4. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes aislantes de cuero
- Guantes aluminizados
- Mandil aluminizado
- Lentes de seguridad
- Máscara de soldador
- Respirador doble vía

5.4. METODOLOGÍA

En la Figura 14, se observa el flujograma de la metodología que se seguirá en el presente proyecto de investigación. Está dividido en seis diferentes etapas, las cuales se detallan a continuación:

5.4.1. ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

a. Desgajado, lavado, secado y trozado

Se procedió a separar los “gajos” de la cáscara de naranja. Posteriormente, las cáscaras fueron lavadas con agua para eliminar la presencia de compuestos indeseables como azúcares, suciedad y elementos solubles en el agua. Las cáscaras de naranja desgajadas y lavadas se dejaron secar al sol durante 48 horas. Posteriormente fueron trozadas en fracciones de aproximadamente 5 cm.

b. Deshidratación y molienda

Se secaron las fracciones de cáscara de naranja en el horno de laboratorio a 60 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar la humedad. Las fracciones de cáscara secas fueron trituradas a través de un rodillo y mortero.

5.4.2. ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

Se realizaron los siguientes análisis del material precursor (cáscara de naranja seca):

a. Densidad aparente

Se llenó una probeta de 10 cm³ y se golpeó suavemente hasta que el volumen no varió. Luego se pesa la probeta y se determina la densidad mediante la Ecuación 2 (NTP – 15 – 000 – 1982):

$$\text{Densidad aparente (g/ml)} = \frac{\text{Peso del materia precursor (g)}}{\text{Volumen ocupado (ml)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

b. Contenido de humedad

El material precursor fue fraccionado a un tamaño menor a 10 mm. Se colocaron 5 g de muestra en un crisol y posteriormente fueron llevados al horno a 110 °C por un tiempo de 60 min. El porcentaje de humedad se determinó empleando la Ecuación 3 (ASTM D3173–03):

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Ecuación 3

Donde:

A: Peso inicial del material precursor (g)

B: Peso seco del material precursor (g)

c. Contenido de ceniza

Se emplearon aproximadamente 5 g del material precursor fraccionado. El material precursor fue colocado en una cápsula de porcelana e introducido en un horno a una temperatura de 700 °C durante 60 min. Luego se dejó la muestra enfriar, se colocó en el desecador durante aproximadamente 1 hora y se pesó. El porcentaje de ceniza se calculó con la Ecuación 4 (ASTM D3174-04):

$$\text{Ceniza (\%)} = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Ecuación 4

Donde:

A: Peso de la cápsula y residuo de ceniza (g)

B: Peso de la cápsula vacía (g)

C: Peso inicial del material precursor (g)

d. Contenido de material volátil

Para el análisis del contenido de material volátil se emplearon 4 g de material precursor. La muestra fue colocada en una cápsula e introducida en un horno a 700 °C durante 15 min. El porcentaje de material volátil se calculó según la Ecuación 5 (ASTM D3175-02):

$$\text{Material volátil (\%)} = \left[\frac{A - B}{A} \times 100 \right] - D$$

Ecuación 5

Donde:

A: Peso inicial de la muestra inicial (g)

B: Peso de la muestra luego de calcinar (g)

C: Peso perdido (%)

D: Humedad (%)

5.4.3. ACTIVACIÓN QUÍMICA DE LA CÁSCARA DE NARANJA

a. Impregnación del H₃PO₄

La materia prima (cáscara de naranja seca y triturada) fue impregnada con una solución de H₃PO₄ al 25%, usando tres razones de impregnación (masa de agente activante (g)/ masa de precursor (g)) iguales a 0,5; 1,0 y 2,0. Esta impregnación se realizó por un tiempo de 24 horas a temperatura ambiente.

b. Tratamiento térmico en atmósfera inerte

Se realizó un proceso de carbonización a una temperatura máxima de 600°C (Roopa, 2016) utilizando crisoles con tapa por un tiempo total de 2 horas. Las escalas de temperatura empleadas durante la carbonización fueron: 400 °C (30 min), 500 °C (30 min) y 600 °C (60 min).

c. Lavado, secado y molienda

Los carbones obtenidos fueron lavados con abundante agua destilada a 95 °C. Se empleó dicha temperatura de agua por el alto nivel de solubilidad del ácido en agua a elevadas temperaturas. Los carbones obtenidos fueron secados en una estufa por 24 horas.

d. Tamizado y selección acorde a la granulometría

Se empleó una malla ASTM N° 80. El carbón en polvo fue seleccionado para las operaciones y procesos posteriores.

5.4.4. EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

a. Análisis del rendimiento del carbón activado obtenido

El rendimiento del carbón activado obtenido se calculó empleando la Ecuación 6.

$$Y(\%) = \frac{M_{CA}}{M_p} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

M_{CA}: masa del carbón activado (g)

M_p: masa del precursor (g)

b. Densidad aparente

Se siguió la metodología descrita en la Norma Técnica Peruana 15-000-1982. Se llena una probeta de 10 cm³ con carbón activado. Se golpea suavemente hasta que no varíe el volumen del carbón y se pesa. Se determinó la densidad aparente empleando la Ecuación 7:

$$\text{Densidad aparente (g/ml)} = \frac{\text{Peso del carbón activado (g)}}{\text{Volumen ocupado (ml)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

c. Contenido de humedad

Calentar la mufla a 750 °C y colocar crisoles de porcelana por 10 minutos. Pesarse 1 ± 0,1 g de carbón activado y colocar la muestra en un horno a 105 °C por 3 horas hasta peso constante. Dejar enfriar, colocar en el desecador y pesar. La muestra se considera seca cuando el decrecimiento consecutivo de la temperatura fue igual o menor a 0,0005 g. Se determinó el porcentaje de humedad empleando la Ecuación 8 (ASTM D-1762):

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

A: Peso inicial del carbón activado (g)

B: Peso seco del carbón activado (g)

d. Contenido de material volátil

Calentar la mufla a 950 °C durante 10 min. Pre-calentar los crisoles, conteniendo la muestra, con sus tapas para el análisis de humedad. Los crisoles se colocan sobre la puerta de la mufla, debiendo permanecer abierta durante 2 minutos (300 °C) y luego por 3 minutos (500 °C) sobre el borde exterior de la mufla. Luego se coloca la muestra hacia la parte posterior de la mufla durante 6 minutos con la puerta cerrada. Posteriormente, dejar enfriar, colocar en el desecador y pesar. Se empleó la Ecuación 9 (ASTM D-1762):

$$\text{Material volátil (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

A: Peso seco del carbón activado (g)

B: Peso del carbón activado sin materiales volátiles (g)

e. Contenido de ceniza

Colocar los crisoles destapados usados para el análisis de material volátil conteniendo la muestra a 750 °C durante 6 horas en la mufla. Enfriar los crisoles con las tapas colocadas en el desecador por 1 hora y pesar. Se determinó empleando la Ecuación 10:

$$Ceniza (\%) = \frac{B}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

A: Peso seco del carbón activado (g)

B: Peso de la ceniza (g)

f. Determinación del pH

Pesar aproximadamente 0,5 g de carbón activado seco a $(110 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ durante 60 minutos. Transferir la muestra del carbón activado a un vaso de precipitado de 50 cm³ y se añaden 25 cm³ de agua. Calentar el vaso a baño María a 80 °C durante dos minutos y agitar lentamente. Efectuar la lectura del pH, manteniendo la temperatura a $75 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Dejar enfriar la muestra y realizar la segunda lectura de pH a temperatura ambiente. La diferencia de pH de las dos mediciones no debe exceder a 0,15; caso contrario se repetirá la prueba (Norma NTP 207.025-1982).

5.4.5. ADSORCIÓN DE PLOMO

a. Preparación de la disolución de plomo

Se prepararon las disoluciones a partir de una solución estándar de plomo de 1000 mg/L suministrado por Merck, que consiste en una solución patrón trazable de Pb(NO₃)₂ en HNO₃. Se prepararon disoluciones de 50 mL con concentraciones de 1, 10 y 100 mg/L de Pb (II).

b. Variación del pH

Se ajustó el pH de las soluciones a 3 y 5. Esto con la finalidad de evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado en función del pH. Se llevó a cabo empleando HNO₃ 0,1 M y NaOH de 0,1 M (Lavado, 2010; Shrestha, *et al.* 2011).

c. Interacción del carbón activado y la solución de plomo en fase acuosa

Todos los ensayos de adsorción fueron realizados en sistema batch, en cada caso se utilizaron 50 mg del adsorbente y se pusieron en contacto con 50 ml de una solución de Pb(II) de diferentes concentraciones y pH iniciales, en un agitador múltiple a una velocidad de 500 rpm a temperatura ambiente. Esta agitación se realizó por un tiempo de 3 horas con el fin de asegurar el equilibrio. Finalizada la etapa de adsorción, las fases fueron separadas por filtración (Lavado, 2010). La muestra de plomo fue preservada según lo especificado en el Anexo N° 1 (Requisitos para toma de muestras de agua y preservación) del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Agua (ANA, 2011) a un pH igual o menor a 2.

5.4.6. EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE PLOMO EN CONDICIONES DE LABORATORIO

a. Determinación de la concentración de Pb (II)

Se determinó a través del análisis por espectrofotometría de absorción atómica. A través del método normalizado 3111 A: Determinación de Metales por Espectrometría de Absorción Atómica de Llama (ASTM, 1989).

b. Determinación del porcentaje de remoción de Pb (II)

Para la determinación del porcentaje de remoción de Pb (II) se empleó la Ecuación 11:

$$Ads(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{C_f}{C_i}\right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Ads (%): Porcentaje de Pb (II) adsorbido por el carbón activado

C_f: Concentración final de la solución de Pb (II) (mg/L)

C_i: Concentración inicial de la solución de Pb (II) (mg/L)

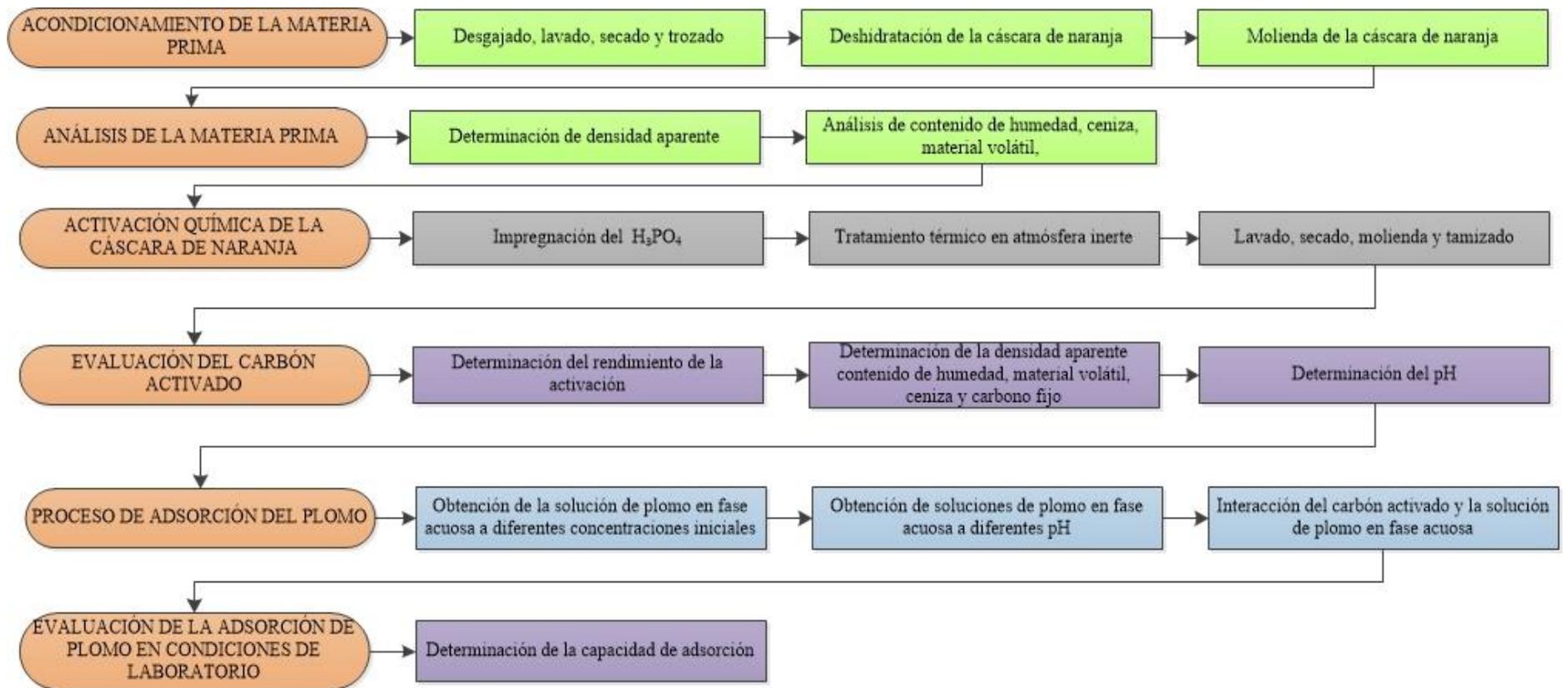


Figura 14: Flujograma general de la metodología. FUENTE: Elaboración propia

5.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

En el Cuadro 9: Diseño Experimental de los tratamientos empleados para la adsorción de plomo en fase acuosa a partir del carbón activado elaborado se observa el arreglo de la combinación de las variables del estudio y la denominación de las unidades experimentales.

Cuadro 9: Diseño Experimental de los tratamientos empleados para la adsorción de plomo en fase acuosa a partir del carbón activado elaborado

Razón de impregnación	Concentración inicial del plomo (mg/L)	pH de la solución acuosa	Ensayo + Repetición	
0,5	1	3	C1 P3 a (0,5)	C1 P3 b (0,5)
		5	C1 P5 a (0,5)	C1 P5 b (0,5)
	10	3	C2 P3 a (0,5)	C2 P3 b (0,5)
		5	C2 P5 a (0,5)	C2 P5 b (0,5)
	100	3	C3 P3 a (0,5)	C3 P3 b (0,5)
		5	C3 P5 a (0,5)	C3 P5 b (0,5)
1,0	1	3	C1 P3 a (1,0)	C1 P3 b (1,0)
		5	C1 P5 a (1,0)	C1 P5 b (1,0)
	10	3	C2 P3 a (1,0)	C2 P3 b (1,0)
		5	C2 P5 a (1,0)	C2 P5 b (1,0)
	100	3	C3 P3 a (1,0)	C3 P3 b (1,0)
		5	C3 P5 a (1,0)	C3 P5 b (1,0)
2,0	1	3	C2 P3 a (2,0)	C2 P3 b (2,0)
		5	C2 P5 a (2,0)	C2 P5 b (2,0)
	10	3	C3 P3 a (2,0)	C3 P3 b (2,0)
		5	C3 P5 a (2,0)	C3 P5 b (2,0)
	100	3	C3 P3 a (2,0)	C3 P3 b (2,0)
		5	C3 P5 a (2,0)	C3 P5 b (2,0)
Total			36 experimentos	

FUENTE: Elaboración propia

Donde:

C: Concentración inicial de la disolución de plomo (1 mg/L, 10 mg/L y 100 mg/L)

P: pH durante la adsorción (3 y 5)

Además, en los paréntesis se ha colocado la razón de impregnación del ácido fosfórico y “a” y “b” que representan las repeticiones de cada ensayo.

El trabajo de investigación cuenta con un arreglo factorial ($3 \times 3 \times 2$) bajo un diseño completamente al azar, con dos repeticiones.

De acuerdo al diseño planteado el número de experimentos será el siguiente:

$3 \text{ razones de impregnación} \times 3 \text{ concentraciones iniciales} \times 2 \text{ pH} \times 2 \text{ repeticiones} =$ 36 experimentos
--

Donde:

Variables independientes: razón de impregnación del carbón activado, concentración inicial de la disolución de Pb (II) y pH de la disolución de Pb (II).

Variables dependientes: rendimiento del carbón activado (%), densidad aparente del carbón activado (g/ml), contenido de humedad del carbón activado (%), contenido de cenizas del carbón activado (%), carbono fijo de carbón activado (%), potencial de hidrógeno del carbón activado (pH), porcentaje de adsorción (%) y capacidad de adsorción del carbón activado (mg de Pb/ g de adsorbente).

La siguiente ecuación representa el modelo estadístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

Y: Variable respuesta

i: 1, 2, 3 muestra los niveles del factor α

j: 1, 2, 3 muestra los niveles del factor β

k: 1, 2 muestra los niveles del factor γ

l: 1, 2 muestra los niveles del error aleatorio

μ : Efecto de la media general

α : Efecto producido por el nivel i-ésimo nivel del factor α

β : Efecto producido por el nivel i -ésimo nivel del factor b

γ : Efecto producidos por el nivel k -ésimo del factor c

$(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\gamma)_{ik}$, $(\beta\gamma)_{jk}$ y $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: son los efectos producidos por las interacciones entre $a \times b$, $a \times c$, $b \times c$ y $a \times b \times c$, respectivamente.

ε : Efecto del error aleatorio

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EVALUACIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR

Se ha empleado como material precursor a la cáscara seca de naranja. Este material tiene una consistencia rígida y quebradiza. De acuerdo a la bibliografía revisada, un buen precursor para obtener carbón activado debe tener bajo contenido de cenizas, alta densidad de empaquetamiento, alto contenido de carbono fijo y de material volátil, para que se dé un adecuado desarrollo de la porosidad durante la activación (Delgadillo, 2011). En el Cuadro 10 se encuentran los resultados del análisis realizado a la cáscara de naranja seca.

Cuadro 10: Análisis proximal de composición del precursor (en base seca)

N° de repetición	Humedad (%)	Material volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)	Densidad (kg/m ³)
1	2,578	87,871	6,418	3,133	385,02
2	2,484	85,479	5,449	6,588	342,64
3	2,088	87,798	6,667	3,447	362,29
Promedio	2,383 ± 0,260	87,049 ± 1,361	6,178 ± 0,644	4,390	363,17 ± 21,209

FUENTE: Elaboración propia

En el Cuadro 11, se muestran las composiciones aproximadas de los precursores usados para la producción de carbón activado.

Cuadro 11: Composición de otros precursores empleados para activación química

Precursor	Humedad (%)	Material volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)	Densidad (kg/m ³)	Fuente
Hueso de aceituna	12,9	80,9	0,73	5,47	-	Obregón, 2012
Cáscara de coco	7,9	72,5	1,1	18,5	-	Wand, 2004
Carbón bituminoso	6,96	27,69	4,35	65,7	-	Bastidas, 2010
Madera (caoba)	12,47	-	1,37	-	279	Teruya, 2003

FUENTE: Elaboración propia

Se observa que la cáscara de naranja posee un alto contenido de volátiles (87,049 %), valor mayor a los obtenidos en estudios realizados al hueso de aceituna y a la cáscara de coco. El contenido de ceniza fue mayor al obtenido del hueso de aceituna, cáscara de coco, carbón bituminoso y madera. El contenido de carbono fijo fue de 4,390% inferior a las demás

materias primas; sin embargo; cabe resaltar que la cáscara de naranja posee considerables cantidades de pectina y lignina para su reaprovechamiento como carbón activado. Además, la cáscara seca de naranja posee una elevada densidad de empaquetamiento.

En líneas generales, se puede establecer que la cáscara de naranja seca posee alta densidad de empaquetamiento, alto contenido de material volátil y relativamente bajo contenido de cenizas y carbono fijo, lo que demuestra que es un precursor adecuado para la obtención de carbón activado.

4.2. RENDIMIENTO DEL CARBÓN ACTIVADO

El rendimiento del carbón activado es un parámetro muy importante ya que permite conocer si el precursor y el método usado resultan económicamente viables. El rendimiento de los diferentes carbones activados se determinó empleando la Ecuación 6. El rendimiento del carbón activado depende de los siguientes factores: la naturaleza del precursor, la temperatura de activación, el tipo de agente activante y la razón de impregnación (masa del agente activante (g)/ masa del material precursor (g)). En el Cuadro 12 se pueden observar los rendimientos de los carbones activados obtenidos.

Cuadro 12: Rendimiento del carbón activado obtenido de acuerdo a la razón de impregnación empleada

Razón de impregnación	Rendimiento (%)		
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
0,5	34,407	28,088	33,533
1,0	35,098	28,129	33,363
2,0	35,395	28,480	33,297
Promedio	34,966±0,1	28,232±0,2	33,397±0,5

FUENTE: Elaboración propia

Luego de comprobar la normalidad de la distribución de resultados (Anexo 3a.), se realizó un ANOVA de un factor y se determinó que la razón de impregnación es un factor que genera diferencias significativas en el rendimiento del carbón activado obtenido. En la Figura 15 se pueden observar los intervalos de rendimiento de acuerdo a la razón de impregnación del carbón activado.

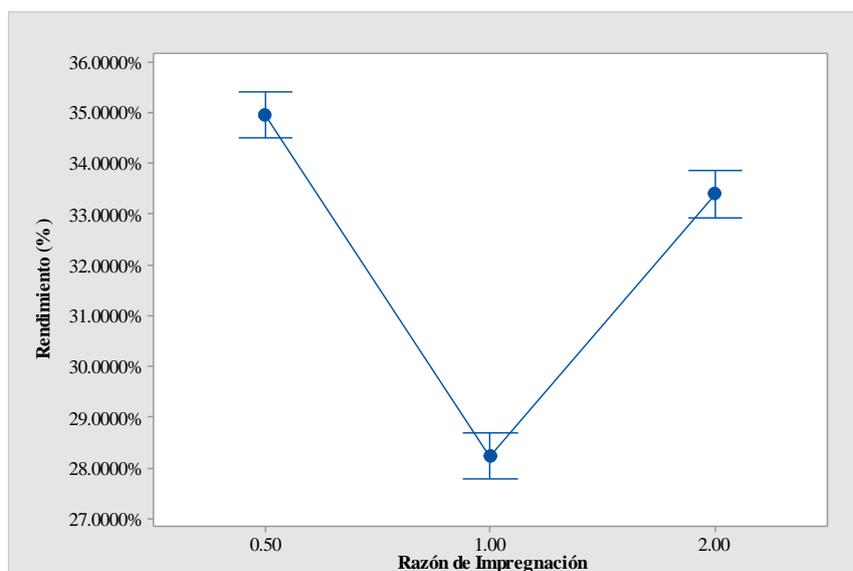


Figura 15: Gráfica de intervalos del rendimiento del carbón activado según su razón de impregnación.

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo a la literatura revisada, la relación entre una la razón de impregnación y el rendimiento es por lo general inversa, ya que al entrar una mayor cantidad de ácido fosfórico (H_3PO_4) en contacto con un material poroso, hidroliza los enlaces glicosídicos de los biopolímeros, acelerando la deshidratación del material a temperaturas menores a $100\text{ }^\circ\text{C}$, en el caso de la presente investigación la impregnación se realizó a temperatura ambiente.

En el estudio realizado se obtuvo un comportamiento anómalo del rendimiento según la razón de impregnación por lo que se procedió a realizar ensayos con razones de impregnación intermedias, con el fin de comprobar esta tendencia. Como se muestra en la Figura 16 el rendimiento del carbón activado disminuye al aumentar la razón de impregnación de 0,50 a 1,00 y aumenta de 1,00 a 2,00 esto puede deberse a las características de composición y estructura del material precursor citados en el Cuadro 2.

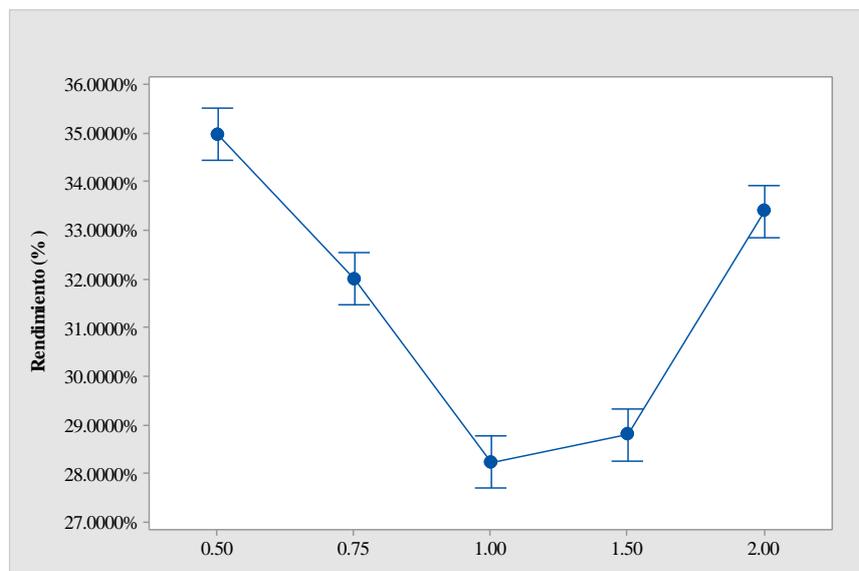


Figura 16: Gráfica de intervalos del rendimiento del carbón activado según su razón de impregnación.

FUENTE: Elaboración propia

Jagtoyen y Debyshire (1993), explican el proceso de activación con H_3PO_4 , en precursores como madera dura y pepas de durazno con tamaño de partícula de aproximadamente 3 mm: a partir de $50\text{ }^\circ\text{C}$, el ácido se difunde por el interior de las partículas del precursor y reduce su contracción. Las partículas adquieren elasticidad y se producen cambios durante

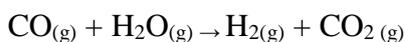
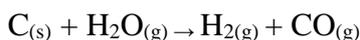
su descomposición térmica, razón por la cual la temperatura de carbonización disminuye en un proceso de activación química.

Según estos autores, la descomposición térmica del precursor se inicia cuando el H_3PO_4 , rompe los enlaces glicosídicos de la hemicelulosa y de la celulosa, luego rompe los enlaces arílicos formadores de la lignina y provocando la deshidratación, degradación y condensación del material impregnado. Estos procesos podrían explicar los porcentajes de rendimiento obtenidos en el presente estudio a diferentes razones de impregnación.

La deshidratación térmica del H_3PO_4 se llevaría a cabo según la siguiente reacción:



Siendo el $\text{P}_2\text{O}_{5(\text{s})}$ corrosivo y extremadamente higroscópico, es decir que absorbe la humedad, con una temperatura de fusión de $340\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente se produce la oxidación parcial del carbón según las siguientes reacciones:



El valor óptimo de rendimiento a través de activación química es del 50 %, según la bibliografía revisada. Sin embargo, en estudios realizados con aserrín de caoba (Teruya, 2004) se dio un rendimiento promedio del 23 % y en el del hueso de aceituna (Obregón, 2012) fue de 36,83 %. En el caso del presente estudio el rendimiento promedio fue de 31,48%, el mínimo de 28,08 % y el máximo de 35,39%.

4.3. EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Como puede observarse en el Cuadro 13 el contenido de humedad fue superior al del precursor en todos los casos. En esta serie se puede observar que la humedad aumenta cuando se aumenta la razón de impregnación.

Estos carbones tuvieron además un aceptable contenido de cenizas, las cuales son consideradas como impurezas del carbón. El origen de estas cenizas podría estar relacionado con las reacciones que se dieron entre el precursor y el H_3PO_4 , ya que se forman especies fosfato y polifosfato, que se incorporan a la matriz del carbón a través de enlaces C-O-P y no se eliminan con el proceso de lavado. El contenido de carbono fijo aumentó drásticamente respecto al precursor en todos los carbones activados analizados.

La densidad de empaquetamiento es similar para los tres carbones activados elaborados, 520 kg/m^3 en promedio, lo cual representa algunos beneficios debido a su elevada densidad tales como: menor demanda de volumen para su transporte y menor volumen de cama necesaria para contener una determinada masa de carbón, para el caso de los filtros de carbón activado.

Los carbones activados, como es común en el proceso de activación química con H_3PO_4 , presentan pH ácidos. Esta característica puede ser modificada a través de lavados continuos con agua y/o sumergiendo el carbón en sustancias básicas, hasta llevar al carbón al pH deseado.

Cuadro 13: Análisis del carbón activado obtenido.

Razón de impregnación	Humedad (%)	Material volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)	Densidad (kg/m^3)	pH
0,5	5,264	4,699	11,417	83,883	556,4	2,741
1	7,146	1,4831	7,601	90,915	497,15	2,751
2	13,455	3,7913	9,899	86,309	508,58	2,730

FUENTE: Elaboración propia

Se puede observar que el carbón activado obtenido satisface todos los parámetros de calidad definidos en el Cuadro 5, los cuales determinan si un carbón activado es apto para su aplicación en el tratamiento de aguas.

4.4. INFLUENCIA DE LOS FACTORES SOBRE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Con el fin de analizar estadísticamente la relación entre los factores estudiados (Razón de Impregnación, pH y Concentración Inicial) y la capacidad de adsorción se aplicó una prueba de hipótesis marginal. Una prueba de hipótesis es una regla que especifica si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos, para tomar esta decisión se emplea el p valor. Las medidas de ajuste del modelo, así como los p valores determinados se encuentran detallados en el Anexo 3.2.

A través de dicha prueba de hipótesis, se determinó que existe una triple interacción entre los factores analizados en el presente estudio sobre la Capacidad de Adsorción. Esto indica que para referirnos a las capacidades de adsorción obtenidas es indispensable tomar en cuenta los tres factores simultáneamente. En la Figura 17 se muestran las capacidades de adsorción obtenidas.

Se realizó otra prueba de hipótesis para analizar si existe o no interacción entre los factores y el porcentaje de remoción de Pb (II). Realizado dicho análisis se determinó que existen las siguientes interacciones de factores: Razón de Impregnación - pH, Razón de Impregnación - Concentración Inicial y pH - Concentración Inicial. A continuación se procederá a discutir cada una de estas interacciones y su influencia sobre el porcentaje de remoción de Pb (II). Los p valores de esta prueba y la modelación de varianza realizada sobre los datos de la muestra se detallan en el Anexo 3.3.

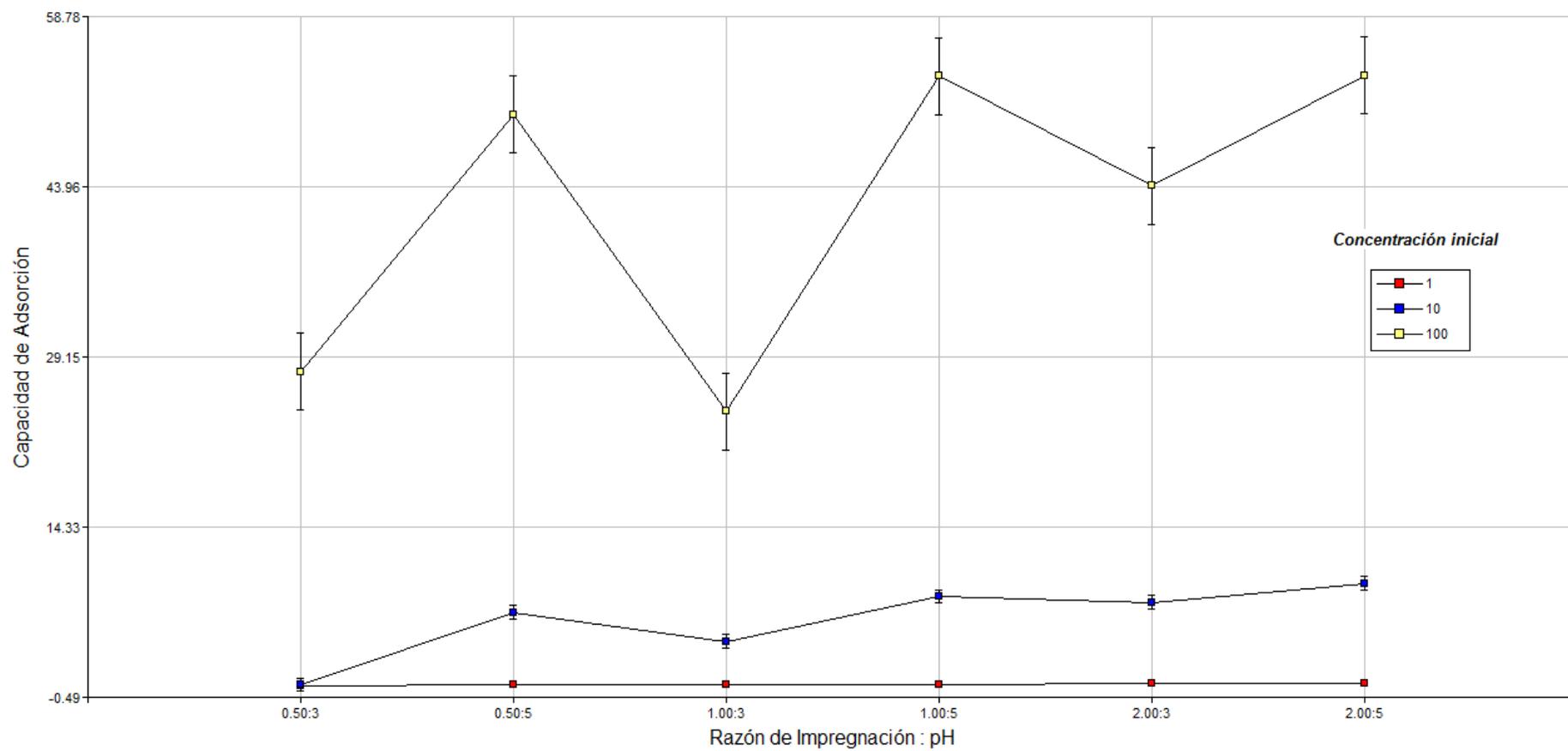


Figura 17: Capacidad de Adsorción VS. Razón de Impregnación, pH y Concentración Inicial. FUENTE: Elaboración propia

4.5. INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA RAZÓN DE IMPREGNACIÓN Y EL pH SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

La razón de impregnación es definida como la relación entre el peso del agente activante sobre el peso del material precursor y ha sido identificada como uno de los factores más importantes en el proceso de activación química.

En las Figura 18 se puede observar que a mayor razón de impregnación el porcentaje de remoción aumenta ligeramente. Esto puede deberse a que la razón de impregnación tiene un efecto significativo en el desarrollo de la porosidad, tal como señalan Giraldo y Moreno (2004), al incrementar la razón de impregnación, el área superficial y el volumen total de poros incrementa. El H_3PO_4 se difunde por el interior de las partículas del precursor y reduce su contracción. Las partículas adquieren elasticidad y se producen cambios en su descomposición térmica, ya que la temperatura de carbonización disminuye. Este aumento de la porosidad se debe a la liberación de alquitranes gracias a los agentes activantes.

Los porcentajes de adsorción de Pb (II), que fueron en promedio de 47,05%; 57,82% y 72,84% para los carbones activados con razones de impregnación de 0.50, 1.00 y 2.00, respectivamente. Los valores detallados de los porcentajes de adsorción se encuentran en el Anexo 2d.

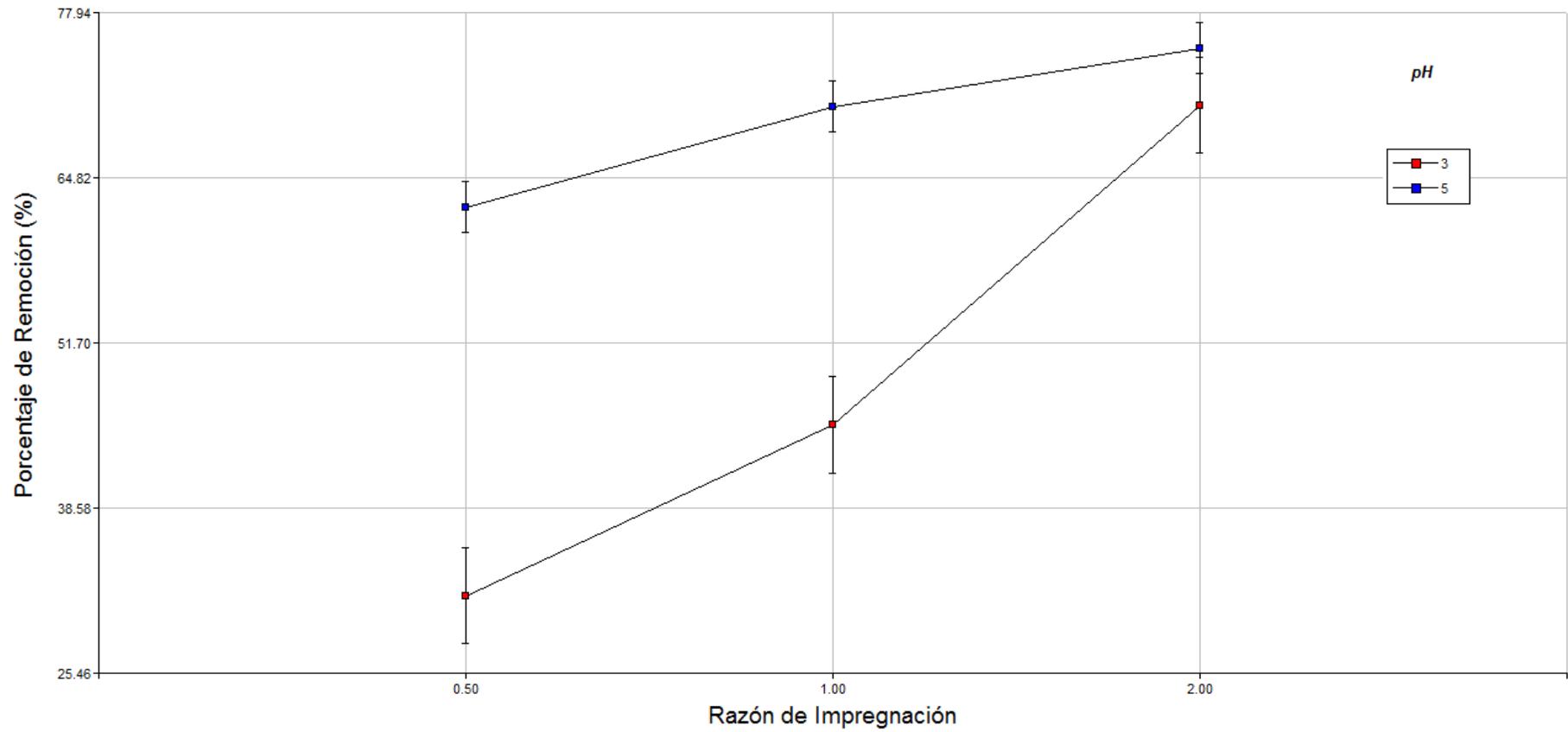


Figura 18: Porcentaje de Remoción (%) Razón de Impregnación – pH. FUENTE: Elaboración propia

4.6. INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL Y EL pH SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

El pH de la solución tiene un impacto significativo en la capacidad de adsorción ya que determina la carga superficial del adsorbente, el grado de ionización y la especiación del adsorbato como se puede observar en la Figura 11. El efecto del pH en la adsorción de plomo (II) en carbones activados elaborados a partir de cáscara de naranja ha sido estudiado a pH 3 y 5.

Como se puede apreciar en la Figura 19, existe un incremento del porcentaje de remoción dependiente del pH. La máxima capacidad de adsorción se alcanza a un pH 5, esto se debe a que al incrementarse el pH decrece la concentración del ión hidrógeno, es decir, a un mayor pH menor concentración de iones H^+ presentes en el medio acuoso, estos compiten con los iones Pb^{2+} de carga positiva por los sitios de adsorción del carbón activado. Además, es importante indicar que posterior a la adsorción el pH de la solución había disminuido, lo cual indica que los iones Pb^{2+} fueron adsorbidos y los iones hidrógeno fueron liberados. Esto también puede explicarse por el incremento de grupos superficiales ácidos lo que favorece el proceso de adsorción, es decir existe la posibilidad de un intercambio iónico entre las especies Pb^{2+} y H^+ de la superficie del carbón (Lavado, 2010). Cabe mencionar que el porcentaje promedio de adsorción a pH 3 fue de 49.13 % mientras que el ocurrido a pH 5 fue de 69.35%, para observar los valores detallados revisar el Anexo 2d.

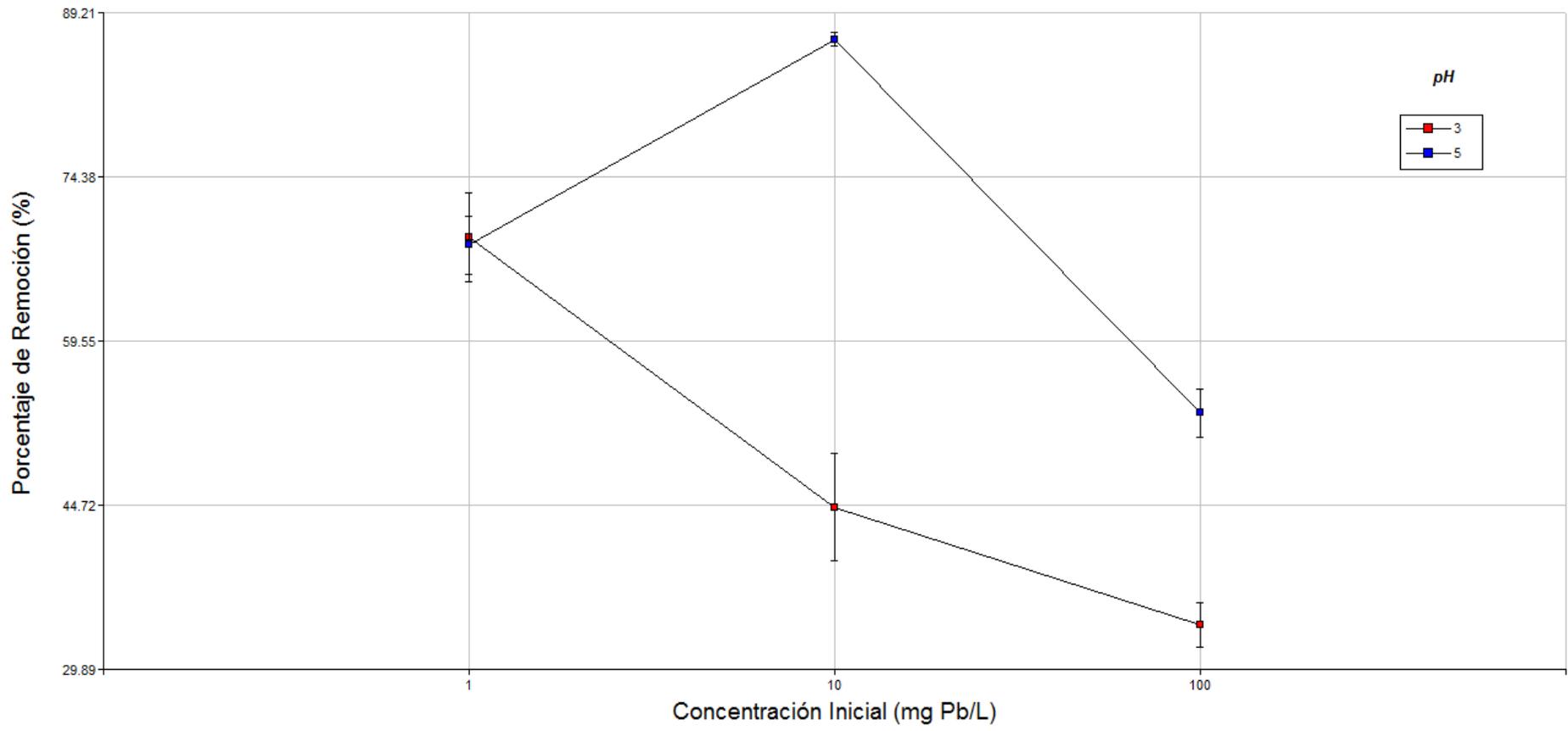


Figura 19 Porcentaje de Remoción pH – Concentración Inicial. FUENTE: Elaboración propia

4.7. INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL Y RAZÓN DE IMPREGNACIÓN SOBRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

En soluciones acuosas muy diluidas, los iones se comportan en forma independiente uno de otro y es válido suponer que los coeficientes de actividad de los iones tienen un valor unitario. Sin embargo, a medida que la concentración de iones en solución aumenta, las interacciones electrostáticas entre los iones también aumentan y la actividad de los iones se hace algo menor a su concentración analítica o determinada.

En la Figura 20 se tiene la concentración inicial de Pb (II) versus el porcentaje de remoción de los tres carbones preparados. Se puede apreciar que el porcentaje de remoción los carbones activados con razones de impregnación de 0,5 y 1 decrece a mayor concentración de Pb (II) inicial en la solución. Mientras que para el carbón activado con razón de impregnación igual a dos se da el efecto contrario. Esto debido a que, a bajas concentraciones, los sitios de adsorción disponibles en el carbón activado son mucho mayores que los iones metálicos en la solución por lo que a mayor concentración existe una mayor interacción entre dichos sitios de adsorción y los iones metálicos, esto ocurrirá hasta que se dé la saturación del carbón activado (Shrestha *et al*, 2011). Sin embargo, se puede apreciar la reducción del porcentaje de remoción cuando la concentración va de 10 a 100 mg/L esto puede deberse a que existen tres mecanismos diferentes por los cuales los iones metálicos (u otros iones) se eliminan de una solución acuosa. El primero establece que el proceso se basa en interacciones electrostáticas adsorbato-adsorbentes que dependen totalmente de la existencia de grupos funcionales en las superficies del carbón, especialmente complejos superficiales de oxígeno (proceso de intercambio iónico). El segundo sugiere que los potenciales de adsorción mejorados, como ocurre en la microporosidad más estrecha, pueden ser lo suficientemente fuertes como para adsorber y retener iones. El tercer mecanismo se basa en el concepto de ácidos y bases fuertes y débiles, como consecuencia de la naturaleza anfótera de las superficies de carbono. Los tres mecanismos mencionados guardan estrecha relación con la superficie disponible del carbón activado por lo que puede asumirse que a elevadas concentraciones de Pb⁺² el carbón activado no cuenta con los suficientes grupos funcionales, la microporosidad se ha visto saturada o que la carga superficial del carbón ya no posee la fuerza de atracción necesaria para remover mayor número de iones de Pb⁺² (Radovic *et al.*, 2000). En resumen, el carbón activado se ha saturado.

Cabe mencionar que el porcentaje promedio de remoción de plomo a una concentración de 1 mg/L fue de 69%, para 10 mg/L fue de 78% y para una concentración de 100 mg/L fue del 43%.

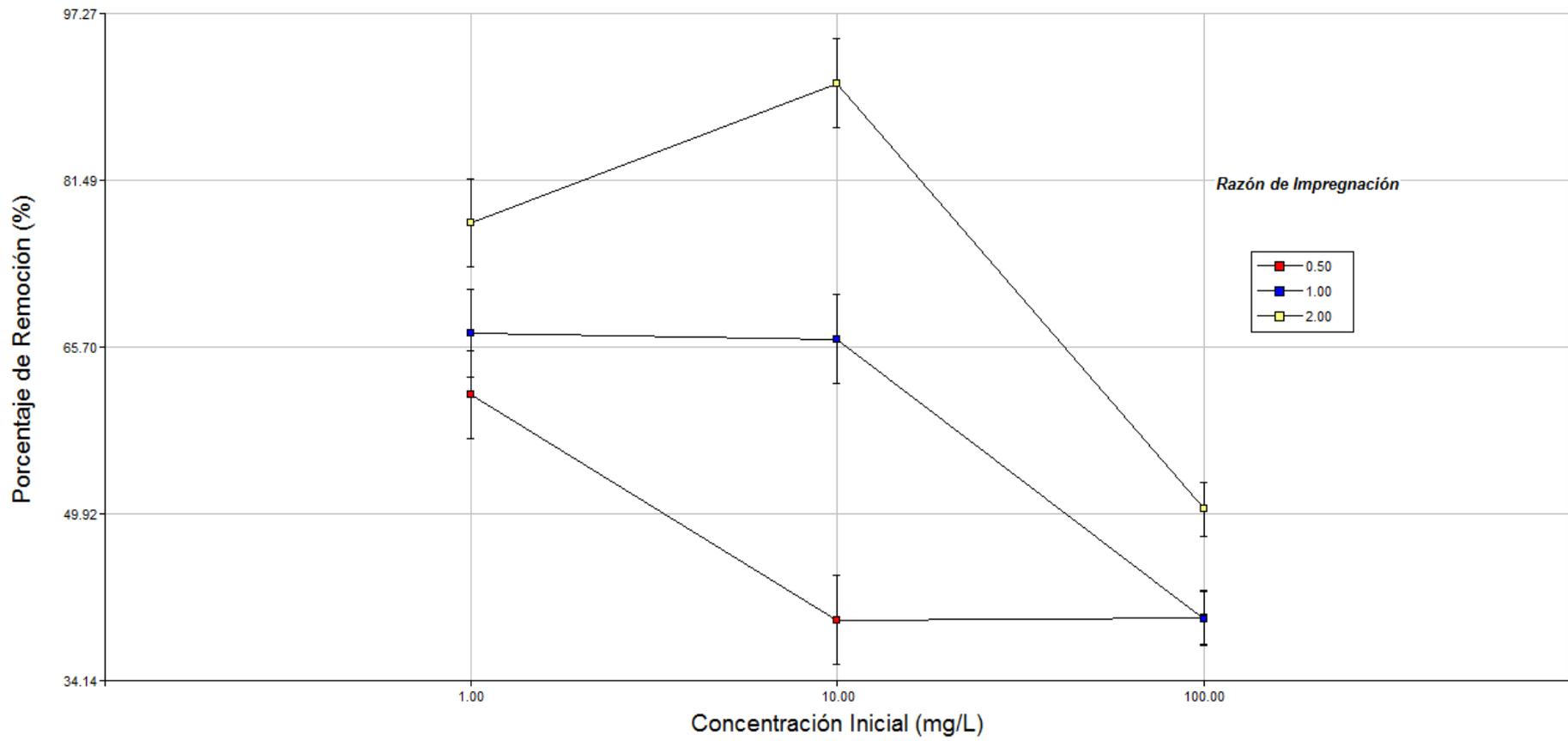


Figura 20: Porcentaje de Remoción Concentración Inicial - Razón de Impregnación. FUENTE: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

- La cáscara de naranja (*Citrus sinensis L. Obseck*) es un buen precursor para la preparación de carbón activado, por su bajo contenido de cenizas, alto contenido de volátiles y densidad de empaquetamiento.
- Los rendimientos obtenidos a través de la activación química con H_3PO_4 de cáscara de naranja pueden considerarse intermedios, tomando en cuenta que el rendimiento óptimo para un proceso de activación química es del 50 %.
- Los carbones activados obtenidos con tres distintas razones de impregnación satisfacen los parámetros de calidad indicados para su aplicación en el tratamiento de aguas.
- A mayor razón de impregnación durante la elaboración de los carbones activados se da una ligeramente mayor capacidad promedio de adsorción y mayor porcentaje de adsorción promedio de Pb (II).
- El pH ligeramente ácido fue el óptimo para la adsorción de Pb (II) siendo el ácido el menos favorable.
- El carbón activado con una razón de impregnación de 2, con un pH de la disolución ligeramente ácido y con una concentración inicial de 10 mg/L presentó el mayor porcentaje de adsorción (98,80 %) de Pb (II). A través de este resultado se pueden esperar buenos porcentajes de remoción a concentraciones iniciales relativamente bajas de Pb (II), lo cual es una característica de la adsorción con carbón activado.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis térmico gravimétrico (ATG) del precursor impregnado con H_3PO_4 , con el fin de identificar los cambios estructurales que pudiera sufrir el material precursor por efecto de la temperatura. Esos análisis brindarían información respecto a la pérdida de peso según la temperatura y la evaluación de cambios estructurales asociados a efectos térmicos.
- Realizar un análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) con el fin de determinar los grupos funcionales en la superficie del precursor y de los carbones activados obtenidos.
- Evaluar el carbón activado obtenido para la adsorción de metales pesados en aguas residuales industriales.
- Efectuar estudios similares con carbón activado elaborado a partir de cáscara de naranja para adsorción de compuestos orgánicos en disolución acuosa tales como: solventes aromáticos (benceno, tolueno, etc.), pesticidas y herbicidas (DDT, aldrin, etc.) e hidrocarburos de alto peso molecular (tintes, gasolina, aminas, kerosene, aceites, etc.). Además, puede evaluarse con compuestos inorgánicos tales como: mercurio, cobalto, cromo, arsénico, antimonio, etc.
- Realizar un estudio que permita conocer la disponibilidad de la cáscara de naranja en el Perú, especialmente en Lima.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Aduanas Perú. 2017.** Consultado el 08 feb. 2017. Disponible en: <http://www.adexdatatrade.com/Members/EstadisticaProducto.aspx>
2. **Aguilar, A. 2002.** Caracterización físico-química de fibra y mezclas de fibra dietaria obtenidas a partir de residuos de naranja (*Citrus sinensis*), salvado de cebada (*Hordeum vulgare*) y Cáscara de camote (*Ipomoea batatas (L.) Lam*). Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis Magister Scientiae. 134 p.
3. **Aguilar, M.; Piacitelli, G.; Juárez, P.; Vásquez, G.; Hu H y Hernández, A. 1999.** Exposición ocupacional al plomo inorgánico en una imprenta de la Cd. De México. Salud Pública de México. 42-54 p.
4. **Álvarez, A.; Salgado, E.; García, M.; Domínguez, J.; Granados, A.; Aguirre y A. Mendoza. 2012.** Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos. Revista Iberoamericana de Polímeros, 13(4).140-150 p.
5. **Asociación de Productores Cítricos del Perú (Procitrus). 2017.** Consultado el 08 feb. 2017. Disponible en: <http://www.procitrus.org/main.php>
6. **ASTM. 1984.** Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Designation: D 1762 – 84 (Reapproved 2007).
7. **ASTM. 1989.** Método normalizado para la determinación de metales por espectrometría de absorción atómica de llama. Designación: 3I 111 A.
8. **ASTM. 2002.** Standard Test Method for Determination of Contact pH with Activated carbon. Designation: D – 6851 – 02.
9. **ASTM. 2002.** Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Designation: D 3175 – 02.
10. **ASTM. 2003.** Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. Designation: D 3174 – 04.
11. **ASTM. 2003.** Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Designation: D 3173 – 03.
12. **Auer E.; Freund A.; Pietsch J y Tacke T. 1998.** Carnons as supports for industrial precious metal catalysts. Applied Catalysis A: General. 173 p.
13. **Azcona, M.; Ramírez, R. y Vicente, G. 2015.**Efectos Tóxicos del plomo. Oaxaca, MX. Rev Esp Méd Quir. Vol 20. 6p.
14. **Banco Mundial. 2005.** Riqueza y sostenibilidad: dimensiones sociales y ambientales de la minería en el Perú. Lima.

15. **Bastidas, M.; Buelvas, L.; Márquez, M. y Rodríguez, K.** 2010. Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del Departamento del Cesar, CO. Vol 21(3).87-96 p.
16. **Bellinger, D.** 2008. Very low lead exposures and children's neurodevelopment. *Current Opinion in Pediatrics*. 20 p.
17. **Bernales U.** 2006. Determinación de plomo y zinc en el ambiente marino del Terminal Portuario del Callao. Tesis Ingeniería Pesquera. Fuente Original: **Eisler, R.** 1988. Lead Hazards to Fish, Wildlife and invertebrates: A Synoptic Review. Report N°14. U.S. Fish and Wildlife Service.
18. **Bernales, U.** 2006. Determinación de plomo y zinc en el ambiente marino del Terminal Portuario del Callao. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis Ingeniería Pesquera. 87p.
19. **Cai, Q.; Long M.; Zhu, M.; Zhou Q.; Zhang, L. Liu, J.** 2009. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead-zinc smelter in Guizhou, China. *Environmental Pollution* 157.
20. **Cerón, I.** 2011. Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de la cáscara de naranja. Medellín, CO. Universidad EAFIT. Volumen 7, no. 13. 65-86 p.
21. **Concheso, A.; Santamaría, R.; Menéndez, R.; Jiménez, J.; Alcántara, R.; Lavela, P. y Tirado, J.** 2006. Iron carbon composites as electrode materials in lithium batteries. *Carbon*. Vol. 44 (9). 1762-1772
22. **Confederación de la Pequeña y mediana Empresa Aragonesa.** 2010. Guía técnica para la evaluación de riesgos y procedimientos de trabajo seguro en conformado de metales, forja y fundición. Consultado el 05 de oct. 2017. Disponible en: <http://www.conectapyme.com/documentacion/2011-FPRL3.pdf>
23. **Delgadillo A.** 2011. Preparación – Caracterización de carbones activados a partir de pepas de níspero de palo (*Mespilus communi*) y su aplicación como material adsorbente de fenol. Lima, Perú, Pontificie Universidad Católica del Perú. Tesis Magíster en Química. 145 p.
24. **Delgadillo A.** 2011. Preparación – Caracterización de carbones activados a partir de pepas de níspero de palo (*Mespilus communi*) y su aplicación como material adsorbente de fenol. Lima, Perú, Pontificie Universidad Católica del Perú. Tesis Magíster en Química. 145 p. Fuente original: **Rodríguez Reinoso F.** s.f. Carbón Activado: Estructura, Preparación y Aplicaciones.
25. **Devia, J.** 2003. Proceso para producir pectinas cítricas. *Rev. Universidad de EAFIT*. Medellín, CO. No. 129. Universidad de EAFIT. 9 p.
26. **Dhelipan, M.; Arunchander, A.; Sahu, A. y Kalpana D.** 2016. Activated carbón from orange peles as supercapacitor electrode and catalyst support for oxygen reduccion reaction in proton Exchange membrane fuel cell. *Journal of Saudi Chemical Society*. 22p.
27. **Dias, J.; Alvim, M.; Almeida, M.; Rivera, J. y Sánchez, M.** 2007. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: *A review. Journal of Environmental Management*. 833-846 p.

28. **Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería.** 2016. Boletín Estadístico del Subsector Minero. Ministerio de Energía y Minas. Perú. 28 p.
29. **Dirección General de Recursos Hídricos.** 2011. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del agua. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.
30. **Dirección General de las Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.** S.f. México.
31. **Espachs, A.; Soliva, R. and Martín, O.** 2005. A natural clouding agent from orange peels obtained using polygalacturonase and cellulose. *Journal of Food Chemistry*. ES. 92. 55 – 61 p.
32. **Fernández Ma. E.; Nunel G.; Bonelli, P.; Cukierman A.** 2014. Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. **Fuente Original: Leyva, R.** 2002. Eliminación de compuestos inorgánicos y metales pesados en aguas. II Jornadas Iberoamericanas sobre Adsorbentes y Catalizadores para la Protección Ambiental. Santa Cruz de la Sierra, BO.
33. **Fernández Ma. E.; Nunel G.; Bonelli, P.; Cukierman A.** 2014. Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. *Industrial Crops and Products*. AR. 62. 437–445.
34. **Fombuena, M.** 2009. Manual del Carbón Activo. Tesis MSc Ingeniería del Agua. Universidad Politécnica de Sevilla, ES. 89 p.
35. **Foo, K. y Hameed B.** 2012. Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced K_2CO_3 activation. *Bioresource Technology*. MY. 104 679–686.
36. **Glandstone, J. and Hilbert, W.** 2012. Additional notes on Secondary Batteries. *Proceedings of the Physical Society of London*. 11. 44 p.
37. **Gil, R.; Domínguez, R. y Pacho, J.** 2008. Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación. DF, MX. *Tecnología Ciencia* Ed. 23 (2). 79-90 p.
38. **Giraldo, L.** 2004. Determination of the immersion enthalpy and adsorption capacity of an activated carbon in aqueous solutions lead. Colombia. *Revista Colombiana de Química*. Vol. 33 No. 2. 11 p. **Fuente Original: Ferro, M.; Rivera, J.; Rodríguez, J.; Bautista, I.** 1988. Adsorption of zinc, cadmium and Koper on activated carbons obtained from agricultural products. *Carbon* 26 (3): 363-373 p.
39. **Giraldo, L. y Moreno, J.** 2012. Synthesis of activated carbon mesoporous from coffee waste and its application in adsorption zinc and mercury ions from aqueous solution. *E-JChem*; 9 (2): 938–48.
40. **González H. y Teruya R.** 2004. Estudio preliminar de carbón activado; situación en el Perú. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 82 p.

41. **González, S. 1960.** El cultivo de los agríos. Instituto Nacional de Inversiones Agronómicas. ES. Fuente original: **Swingle, W., Reece, P. 1946.** The botany of Citrus and its wild relatives.
42. **Hashemian, S.; Salari, K. y Atashi, Z. 2013.** Preparation of activated carbón from agricultural wastes (almond Shell and orange peel) for adsorption of 2-pic from aqueous solution. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. C-1544. 9p.
43. **Hassler, J. 1988.** Activated Carbon. Chemical Publishing Co., Inc. New York.
44. **Hernáinz, F.; Blázquez, G.; Calero, M. y Martín, Ma. A. 2008.** Influencia de algunas variables en la biosorción de plomo con residuos agrícolas. Afinidad LXV. 7 p.
45. **Hidalgo, S. 2004.** Reutilización de residuos de rapa para la eliminación de metales tóxicos en efluentes líquidos. Cataluña, ES. Universidad de Cataluña.
46. **Huang, C; Bazzaz, F.; Vanderhoef, L. 1974.** The inhibition of Soybean Metabolism by Cadmiom and Lead. Plant Physiology. 54(1). 122-124 p.
47. **Infoagro. S.f.** Cultivo de las naranjas. Consultado el 08 de mar. 2017. Disponible en: <http://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm>
48. **Instituto Nacional de Estadística e Informática.** Estadísticas Sectoriales. <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/sector-statistics/>
49. **International Lead and Zinc Study Group.** Consultado el 08 de ene. 2017. Disponible en: <http://www.ilzsg.org/static/home.aspx>
50. **International Lead Association.** 2016. Consultado el 15 de may. 2017. Disponible en: <http://www.ila-lead.org/UserFiles/File/factbook/chapter2.pdf>
51. **Jagtoyen, M. and Derbyshire, F. 1993.** Some considerations of the origins ofporosity in carbons from chemically activated wood. Carbon. Vol. 31 No. 7. 1185-1192 p.
52. **Jarup, L. 2003.** Hazards of heavy metal contamination. Britishi Medical Bulletin. 68.167-182 p.
53. **Kalavathy, M.; Sakthi V.; Rajgopal S. y Miranda, L. 2005.** Journal of colloid and Interfase Science. 354 – 362 p.
54. **Kizas, G.; Deliyanni, E. y Matis, A. 2015.** Activavted carbons produced by pirolisis of waste potato peels: Cobalt ions removal by adsorption. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.
55. **Kurniawan, T.; Chan, G.; Lo, W. and Babel, S. 2006.** Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. Chemical Engineering Journal. 118, 83e98.
56. **Larenas, C.; Andrango, D.; Ingra, P. 2008.** Estudio isotérmico de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales. Quito, GQ. Centro de Investigación para la Valoración de la Biodiversidad (CIVABI), Universidad Politécnica Salesiana. 3-8 p.
57. **Lavado, C.; Sun, M. y Bendezu, S. 2010.** Adsorción de plomo de efluentes industriales usando carbones activados con H₃PO₄. El Tambo, PE. 14p.

58. **León, G.; Osorio, M. y Martínez, S.** 2015. Comparación de métodos de extracción de aceite esencial de *Citrus sinensis* L. Rev. Cubana de Farmacia. Cartagena, CO. Universidad de Cartagena. 49(4). 742-750 p.
59. **Levine, I.** 2014. Principios de Fisicoquímica. McGraw - Hill. MX.
60. **Li, L., Quinlivan, P., Knappe, D.** 2002. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution. Carbon 40, 2085-2100.
61. **Lillo, M.; Cazorla, D. y Linares, A.** 2003. Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: an insight into the chemical activation mechanism. Carbon 41, 267-275 p.
62. **López, X.; Robles, C.; Velasco, V.; Ruiz, J.; Enríquez, J. y Rodríguez, G.** 2014. Propiedades físicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. Ciencia *ergo-sum*. Universidad Autónoma del Estado de México. DF, MX. Vol. 22-2. 145 – 152 p.
63. **Lugo, V.; Barrera, C.; Hernández, S.** s.f. Remoción de plomo (II) presente en soluciones acuosas empleando cáscara de naranja (*Citrus sp.*) modificada. Estado de México, MX. Facultad de Química, Universidad autónoma del Estado de México.
64. **Marsh, H y Rodríguez-Reinoso, F.** 2006. Activated carbon. UK, Elsevier Science. 554 p.
65. **Martín, M.** 2008. Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, ES. 424 p.
66. **Martínez, Ma. C.** 2012. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de lignina para su aplicación en procesos de descontaminación de aguas. Tesis PhD. Ciencias Químicas. Madrid, ES. Universidad Autónoma de Madrid.
67. **Marulanda, M.** 2001. Comminuted de naranja variedad Valencia base para bebidas refrescantes. Manizales, CO. Universidad Nacional de Colombia.
68. **Meidl, J.** 1997. Responding to changing conditions: how powered activated carbon systems can provide the operational flexibility to treat contained groundwater and industrial wastes. Carbon 35, 1207 – 1216.
69. **Menéndez, J.** 2008. Residuos de biomasa para la producción de carbones activos y otros materiales de interés tecnológico. El mundo del residuo: caracterización, tratamiento y gestión. Oviedo, España, Universidad de Oviedo. 10 p.
70. **Menéndez, J. y Matín, I.** 2006. Types of carbon adsorbents and their production. Alicante, ES. Universidad de Alicante. Environmental remediation. 26 p.
71. **Miles, C.; Brandle, J.; Daniel, D.; Chu-Der, O.; Schnare, P.; Uhlik, J.** 1972. Inhibition of Photosystem II in Isolated Chloroplasts by Lead. Plant Physiology. 49(5). 820-825 p.
72. **Ministerio de Agricultura.** 2009. Cítricos en el Perú. Lima, PE. Dirección de Facilitación y Promoción de Inversiones (Proinversión). Consultado el 08 feb. 2017. Disponible en: <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/organizaciones/dgca/citricos.pdf>

73. **Ministerio de Agricultura.** 2014. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos. Producción de los principales cultivos, según departamento. 83p.
74. **Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.** 2015. Se modifican diversos artículos del Decreto Supremo N° 021 – 2009 VIVIENDA, que aprobó los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Decreto Supremo N° 001 – 2015 – VIVIENDA.
75. **Ministerio del Ambiente.** 2017. Decreto Legislativo que modifica la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos.
76. **Ministerio del Ambiente.** 2017. Prepublicación del Proyecto de Decreto supremo que aprueba el Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Resolución Ministerial N° 174 – 2017 – MINAM.
77. **Ministerio del Ambiente.** 2010. Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades Mnero – Metalúrgicas. Decreto Supremo N° 010 – 2010 – MINAM.
78. **Molina-Sabio, M. and Rodríguez-Reinoso, F.** 2004. Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Asp.* V. 24, 15- 25 p.
79. **Moore, M. y Goldberg, A.** 1985. Dietary and Environmental Lead: Human Health Effects. Amsterdam, NL. 61 p.
80. **Moreno, C.** 2004 Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon* 42, 83 – 94.
81. **Moreno, C.;** Rivera, J. 2001. Carbon materials as adsorbents for the removal of pollutants from aqueous phase. *Materials Research Society Butellin* 26, 890 – 894.
82. **Moreno, M.; Belén, D. y Mendoza, L.** 2006. Evaluación del contenido de carotenoides totales en cáscaras de algunas variedades de naranjas venezolanas. Carabobo, VE. *Revista de la Facultad de Agronomía.* V. 23 No. 3. Universidad Simón Bolívar. Consultado el 08 feb. 2017. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182006000300005
83. **Moreno, M.; Hernández, J.; Rovero, R.; Tablante, A. y Rangek, L.** 2000. Alimentación de tilapia con raciones parciales de cáscara de naranja. Universidad Simón Rodríguez. Carabobo, VE. *Rev. Ciencia y Tecnología Alimentaria.* Vol 3 No. 1. 29 – 33 p.
84. **Nemr, A.; Abdelwahab, O.; El, A. y Khaled, A.** 2009. Removal of direct blue 86 aqueous solution by new activated carbon developed from orange peel. *EG. Journal of Hazardous Materials* 161. 102–110 p.
85. **Nordberg, G.** 2000. *Enciclopedia de Seguridad y Salud en el Trabajo.* Capítulo 63: Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad.

86. **Obregón, D.** 2012. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna. Tesis Lic. Química. Lima, PE. 109 p.
87. **Ortiz, H; Trejo, R.; Valdez, R.; Arreola, J.; Hernández, A.; López, B.** 2009. Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. Zacatecas, MX. Universidad Autónoma Chapingo. 8 p.
88. **Padrón, C. y Moreno, M.** 1999. Extracción de colorantes en cáscaras de naranja (*Citrus sinensis* L. var. Valencia) por métodos no convencionales y su utilización para fortificar color en naranjadas. Rev. Unellez de Ciencia y Tecnología. Venezuela. 17(1). 125-140 p.
89. **Pagnamelli, F.; Mainelli, S. De Angelis, S. y Toro L.** 2005. Biosorption of ptotons and heavy metal sonto olive pomace: Modelling of competition effects. Water Research. IT. 39. 1639 – 1651.
90. **Palacios, J.** 2005. Citricultura. Tucumán Alfa Beta. Argentina. 518 p.
91. **Peña, K., Giraldo, L. y Moreno, J.** 2012. Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. Caracterización Física y Química. Revista Colombiana de Química Volumen 41 Nro. 2. Fisicoquímica e Inorgánica
92. **Pereda, T.** 2007. Uso de la precipitación química para el abatimiento de metales disueltos presentes en efluentes genrados por la pequeña y mediana minería. Tesis para optar por el título de Magister Scientiae. Universidad Nacional Agraria La Molina.
93. **Perry, C.; Tornberg, N.** 1969. In light Scattering in Solids. New York, US. 467 p.
94. **Pinzón, M. y Cardona, A. s.f.** Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente. Santander, CO. Revista Blatua. 23 p.
95. **Poma, P.** 2008. Lead Effects on humans. Chicago, EU. Anales de la Facultad de Medicina. University of Illinois. 69 (2). 7 p.
96. **Presidencia del Consejo de Ministros.** 2008. Límites Máximos Permisibles de Efluentes Líquidos para el subsector Hidrocarburos. Decreto Supremo N° 037 – 2008 – PCM.
97. **Prías, J.** 2011. Identificación de las Variables Óptimas para la Obtención de Carbón Activado a partir del Precursor *Guada angustifolia* kunth (en línea). Revista Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 35(135): 157-166. Consultado el 05 de ene. 2017. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v35n135/v35n135a04.pdf>
98. **Primo, E.** 1997. Química de los alimentos. ES. 461 p.
99. **Radovic, L., Moreno, C., Rivera, J.** 2000. Carbon materials as adsorbents in aqueous solutions. Marcel Dekker, New York.
100. **Rafatullah, M.; Sulaiman, O.; Hashim, R. y Ahmad, A.** 2009. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. Universiti Sains Malaysia. Penanng, MY.

101. **Rey, A.; Faraldos, M.; Casas, J., Zazo, J.; Bahamonde, A. y Rodríguez, J.** 2009. Catalytic wet peroxide oxidation of phenol over Fe/AC catalysts: Influence of iron precursor and activated carbon surface Applied Catalysis B: Environmental. Vol. 86. 69–77p.
102. **Roopa, D.** 2016. Preparation of activated carbon from bitter orange peel (Citrus Aurantium) and preliminary studies on its characteristics. Namakkal, IN. Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 7, No. 4. 5 p.
103. **Rouquerol, F.; Rouquerol, J. y Sing, K.** 2014. Adsorption by Powders and Porous Solids, Principles, Methodology and Applications. Segunda Edición. France. University of Montpellier 2, Institute Charles Gerhardt, Montpellier.
104. **Ruthven, D.** 1984. Principles of Adsorption and Adsorption Processes. University of New Brunswick. Consultado el 06 de ene. 2017. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=u7wq21njR3UC&oi=fnd&pg=PR18&dq=adsorption&ots=wa_qQpxfvS&sig=1WJqQY4ksl0_f2zbSWivkSOHeFU#v=onepage&q=adsorption&f=false
105. **Samamé, M.** 1981. Geología. Volumen 3 de El Perú Minero. INCITEMI Ed. Universidad de California. Consultado el 12 de ene. 2017. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?hl=es&id=ho8dAAAAIAAJ&focus=searchwithinvolume&q=plomo>
106. **Sharma, P. and Dubey, R.** 2003. Lead toxicity un plants. Baranas University Vanarasi. Toxic metals in plants. IN. 8 p.
107. **Sheintuch, M. y Matatov-Meytal, Y.** 1999. Comparison of catalytic processes with other regeneration methods of activated carbon. Catalysis Today. Haifa, IL. Departament of Chemical Engineering. 8p.
108. **Shelef, M. y McCabe, R.** 2000. Catalysis Today.
109. **Shrestha, R.; Pradhananga, R.; Varga, M. y Varga, I.** 2011. Preparation of activated carbon for the removal of Pb (II) from aqueous solutions. Journal Nepal Chemistry Society. NP. Vol.28. 9 p.
110. **Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile.** 1998. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Industria elaboradora de pinturas. Consultado el 06 de oct. 2017. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-37620_pdf_pinturas.pdf
111. **Skoulikides, T.** 1989. Physical Chemistry I. Continuous ion exchange plant design methods and problems. Hydrometallrgy. Symetria Editions. 4, 299-316 p.
112. **Soler, J.** 2006. Cítricos: variedades y técnicas de cultivo. Barcelona, ES. Fundación Rural Caja Valencia. Mundi Prensa. 242 p.
113. **Southern Hemisphere Association of Fresh Fruit Exporters.** 2014. Consultado el 14 mar. 2017. Disponible en: <http://www.shaffe.net/asp/index.asp>
114. **Sublet, R.; Simonnot, M.O.; Boireau, A. y Sardin, M.** 2003. Selection of an adsorbent for lead removal from drinking water by point-of-use treatment device. Water Res. 37 (20). 4904-4912.

115. **Teng, J. y Lin, H.** 1998. Activated carbon production from low ash subbituminous coal with CO₂ activation. *Am Inst Chem Eng J* 44, 5 .1170-1177 p.
116. **Teruya, R.** 2003. Influencia de tres variables en la obtención de carbón activado de los residuos de madera en 3 especies comerciales (*Cedreinga cateniformis Ducke*, *Brosimum alicastrum*, *Swietenia macrophylla King*). Tesis para optar por el título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. 154 p.
117. **Torné, V.** 2006. Preparación, caracterización y aplicaciones de carbones activados preparados a partir de lignina kraft. Tesis Doctoral. Universitat Rovira I Virgili.
118. **United States Environmental Protection Agency.** 2016. Regulatory Information by Topic: Toxic Substances. Consultado el 16 de mar. 2016. Disponible en: <https://www.epa.gov/regulatory-information-topic/regulatory-information-topic-toxic-substances>
119. **Vanholme, R.; Demedts, B.; Morreel, K.; Ralph, J. and Boerjan, W.** 2010. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant Physiology*. Vol. 153. 895 – 905 p.
120. **Verma, S. y Dubey, R.** 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*. 164. 645-655 p.
121. **Vilchis, J.** 2013. Adsorción de Pb(II) presente en solución acuosa sobre hidroxapatitas de calcio, estroncio y bario. Tesis de Magíster en Ciencias Ambientales. Touca, MX. Universidad Autónoma del Estado de México. 87 p.
122. **Virreira, J. y Góngora, O.** 2014. Caracterización de cascara de naranja (*Citrus sinensis* L.) y pomelo (*Citrus grandis*), para obtener bioetanol – Iquitos. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Químico, PE. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Facultad de Ingeniería Química. 89 p.
123. **Volesky, B.** 2001. Detoxification of metal – bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy* 59. 203–216 p.
124. **Wan, W.** 2004. Comparison on pore development of activated carbon produced from palm shell and coconut shell. *Bioresource Technology*. 93. 63-69 p.
125. **Wand, W. and Wan, W.** 2004. Comparison on pore development of activated carbon from palm shell and coconut shell. *Bioresource Technology*, 93, 63-69.
126. **Wang, J.; Wu, F.; Wang, M.; Qiu, N.; Liang, Y.; Fang, S. y Jiang, X.** 2010. Preparation of activated carbon from a renewable agricultural residue of pruning mulberry shoot. *African Journal of Biotechnology* Vol. 9 no. 19. 6p.
127. **World Health Organization.** S.f. Exposure to lead: major public health concern. *Public Health and Environment*. Geneva, CH. 6p. Consultado el 15 ene. 2017. Disponible en: <http://www.who.int/ipcs/features/lead.pdf>

128. **Zaman, A. y Lehmann, S.** 2013. The zero waste index: a performance measurement tool for waste management systems in a “zero waste city”. *Journal of Cleaner Production*. 1233 – 132 p.
129. **Zegada, V.** 2015. Extracción de pectiina de residuos de cáscara de naranja por hidrólisis ácida asistida por microondas (HMO). *BO. Investigación y Desarrollo*. No. 15 Vol. 1. 65 – 76 p.
130. **Zhao, Q.; Wang, Y.; Cao, Y.; Chen, A.; Ren, M.; Ge, Y.; Yu, Z.; Wan, S.; Hu, A.; Bo, Q.; Ruan, L.; Chen, H.; Qin, S.; Chen, W.; Hu, C; Tao, F.; Xu, D.; Xu, J.; Wen, L.; Li, L.** 2014. Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhuo. Anhui, CN. 470-471: 340-347 p.
131. **Zhuang, P. Zou, H.; Shu, W.** 2009. Biotransfer of heavy metals along a soil plant- insect chicken food chain: Field study. *Journal of Environmental Sciences*. 21. 849-853 p.

ANEXO 1: Registro Fotográfico

1.1. Procedencia de la materia prima



Puesto de expendio de jugos de naranja, al interior de la UNALM



Residuos de cáscara de naranja

1.2. Materiales



Bolsas herméticas



Papel filtro



Crisol (15 ml)



Crisol (40 ml)



Crisol (70 ml)



Mallas 80 ASTM



Mortero de porcelana



Espátula



Materiales de vidrio



Pinzas de metal



Agua destilada (H₂O)



Ácido fosfórico (H₃PO₄)



Solución estándar de plomo (1000 mg/L)



Ácido Nítrico (HNO₃)



Hidróxido de sodio (NaOH)

1.3. Equipos



Horno fijo de activación de °T máxima de 1200 °C trifásico, de 220v



Estufa eléctrica
°T máxima 300 °C



Balanza analítica



Plancha con sistema de calentamiento y agitación



pH-metro



Estufa eléctrica

1.4. Equipos de protección personal



Mandil aluminizado, máscara de soldador y guantes aluminizados



Máscara con filtros (respirador doble vía), guantes de látex y lentes de seguridad



Guantes aislantes

1.5. Acondicionamiento de la materia prima



Limpieza y secado al sol



Secado post limpieza



Corte (trozos menores a 5 cm)



Secado a 60 °C



Cáscara seca



Triturado con rodillo



Molienda con mortero manual

1.6. Análisis del material precursor



Contenido de humedad



Contenido de material volátil



Contenido de ceniza



Densidad aparente

1.7. Activación química de la cáscara de naranja



Impregnación con H₃PO₄



Tratamiento térmico en atmósfera inerte a 600 °C



Lavado con agua a 90 °C



Secado



Molienda



Separación por
granulometría

1.8. Evaluación del carbón activado



Contenido de humedad



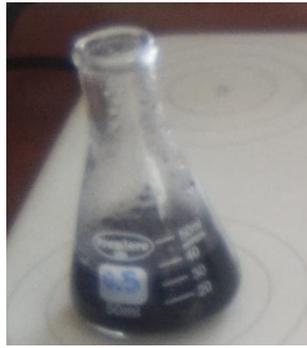
Contenido de material volátil



Contenido de ceniza



Densidad aparente



Determinación del potencial de hidrogeniones (pH)

1.9. Adsorción de plomo



Obtención de la disolución de plomo



Variación del pH



Agitación del carbón activado y la solución de plomo en fase acuosa

1.10. Informe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN AGUA

SOLICITANTE : AMPARO PATRICIA RUIZ MENENDEZ
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ SANTIAGO DE SURCO
REFERENCIA : H.R. 59124
BOLETA : 448
FECHA : 26/06/17

N° LAB	CLAVES	Pb ppm
4364	C1 P2 a (0.5)	0.341
4365	C1 P2 b (0.5)	0.479
4366	C1 P3 a (1.0)	0.262
4367	C1 P3 a (2.0)	0.237
4368	C1 P3 b (1.0)	0.424
4369	C1 P3 b (2.0)	0.122
4370	C1 P5 a (0.5)	0.399
4371	C1 P5 a (1.0)	0.262
4372	C1 P5 a (2.0)	0.238
4373	C1 P5 b (0.5)	0.320
4374	C1 P5 b (1.0)	0.383
4375	C1 P5 b (2.0)	0.304
4376	C2 P2 a (0.5)	9.37
4377	C2 P2 b (0.5)	11.40
4378	C2 P3 a (1.0)	5.89
4379	C2 P3 a (2.0)	3.14
4380	C2 P3 b (1.0)	5.19
4381	C2 P3 b (2.0)	0.312


Dr. Sady García Bendezu
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



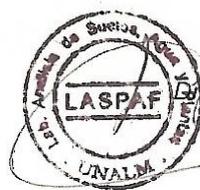
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN AGUA

SOLICITANTE : AMPARO PATRICIA RUÍZ MENÉNDEZ
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ SANTIAGO DE SURCO
REFERENCIA : H.R. 59447
BOLETA : 528
FECHA : 12/07/17

Nº LAB	CLAVES	Pb ppm
4743	1a	2.771
4744	1b	2.544
4745	2a	1.306
4746	2b	1.030
4747	3a	0.163
4748	3b	0.115
4749	4a	65.40
4750	4b	70.10
4751	5a	70.60
4752	5b	78.90
4753	6a	49.60
4754	6b	56.50
4755	7a	54.00
4756	7b	44.60
4757	8a	44.00
4758	8b	46.60
4759	9a	50.60
4760	9b	41.80


Dr. Saúl García Bendejú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 2: Fichas de resultados

2.1. Evaluación del material precursor

- Determinación de contenido de humedad de la materia prima

Repetición	W c	W mph	W c + mps	W mps	% Humedad
R 1	44,1679	1,3928	45,5248	1,3569	2,5775%
R 2	51,0762	1,083	52,1323	1,0561	2,4838%
R 3	50,8519	1,0583	51,8881	1,0362	2,0883%
Promedio					2,3832%
Desv, Est,					0,2597%

Donde:

W c: Peso del crisol (g)

W mph: Peso de la materia prima húmeda (g)

W mps: Peso de la materia prima seca

- Determinación de contenido de ceniza de la materia prima

Repetición	W c	W mph	W c+mp60	W mp60	% Ceniza
R 1	53,4531	4,9969	53,7738	0,3207	6,4180%
R 2	42,8799	4,9957	43,1521	0,2722	5,4487%
R 3	61,8569	5,0383	62,1928	0,3359	6,6669%
Promedio					6,1779%
Desv, Est,					0,6436%

Donde:

W c: Peso del crisol (g)

W mph: Peso de la materia prima húmeda (g)

W mp60: Peso de la materia prima luego de 60 min a 105 °C

- Determinación de contenido de material volátil de la materia prima

Repetición	W c	W mph	W c+mp15	W mp15	% Peso Perdido	% Material volátil
R 1	54,6761	3,7494	55,0415	0,3654	90,25444%	87,87123%
R 2	54,0205	4,378	54,5519	0,5314	87,86204%	85,47882%
R 3	49,1988	3,9903	49,5906	0,3918	90,18119%	87,79798%
Promedio					89,4326%	87,04934%
Desv, Est,					1,3606%	1,3606%

Donde;

W c: Peso del crisol (g)

W mph: Peso de la materia prima húmeda (g)

W mp15: Peso de la materia prima luego de 15 min a 700 °C

- Densidad aparente del material precursor

Repetición	W p	Wp+mp	W mp	g/ml
R1	73,0754	76,9256	3,8502	0,38502
R2	73,0758	76,5022	3,4264	0,34264
R3	73,08	76,7029	3,6229	0,36229
Promedio				0,3633167
Desv, Est,				0,0212086

Donde:

Wp: Peso de la probeta de 10 ml (g)

Wmp: Peso de la materia prima (g)

2.2. Rendimiento del carbón activado

Repetición	RI=0,50	RI=0,75	RI=1,00	RI=1,50	RI=2,00
R1	34,4066%	32,505%	28,0879%	28,486%	33,5326%
R2	35,0975%	32,271%	28,1293%	29,024%	33,3630%
R3	35,3946%	31,218%	28,4801%	28,888%	33,2968%
Promedio	34,9662%	31,9980%	28,2324%	28,7992%	33,3975%

Desv, Est,	0,507%	0,686%	0,215%	0,280%	0,122%
-------------------	--------	--------	--------	--------	--------

Donde:

RI: Razón de impregnación

2.4. Evaluación del carbón activado obtenido

- Determinación de contenido de humedad de los carbones activados obtenidos

RI= 0,5	W c + t	W mch	W c + mch	We + mcs	W mcs	% Humedad
R 1	48,5955	0,9897	49,5852	49,5389	0,9434	4,6782%
R 2	42,413	1,0855	43,4985	43,4407	1,0277	5,3247%
R 3	45,5635	1,0795	46,643	46,5805	1,017	5,7897%
Promedio						5,2642%
Desv, Est,						0,4558%

RI= 1,0	W c + t	W mch	W c + mch	We + mcs	W mcs	% Humedad
R 1	50,5591	1,0768	51,6359	51,5529	0,9938	7,7080%
R 2	48,8939	0,983	49,8769	49,8044	0,9105	7,3754%
R 3	50,0004	0,991	50,9914	50,9284	0,928	6,3572%
Promedio						7,1469%
Desv, Est,						0,5746%

RI= 2,0	W c + t	W mch	W c + mch	We + mcs	W mcs	% Humedad
R 1	46,036	1,0565	47,0925	46,9539	0,9179	13,1188%
R 2	45,1465	0,9788	46,1253	45,994	0,8475	13,4144%
R 3	47,4456	1,0895	48,5351	48,3844	0,9388	13,8320%
Promedio						13,4551%
Desv, Est,						0,2926%

Donde:

RI: Razón de impregnación del carbón activado

W c + t: Peso del crisol y tapa (g)

W mch: Peso del carbón activado húmedo (g)

W c + mch: Peso del crisol con tapa conteniendo el carbón activado húmedo (g)

W mcs: Peso de la muestra de carbón activado seco (g)

- Determinación de materiales volátiles de los carbones activados

RI= 0,5	W mcs	W c+csmv	W csmv	% Materiales volátiles
R 1	0,9434	49,4884	0,8929	5,3530%
R 2	1,0277	43,3865	0,9735	5,2739%
R 3	1,017	46,5452	0,9817	3,4710%
Promedio				4,6993%
Desv, Est,				0,8691%

RI= 1,0	W mcs	W c+csmv	W csmv	% Materiales volátiles
R 1	0,9938	51,5303	0,9712	2,2741%
R 2	0,9105	49,7947	0,9008	1,0653%
R 3	0,928	50,9181	0,9177	1,1099%
Promedio				1,4831%
Desv, Est,				0,5596%

RI= 2,0	W mcs	W c+csmv	W csmv	% Materiales volátiles
R 1	0,9179	46,9258	0,8898	3,0613%
R 2	0,8475	45,9658	0,8193	3,3274%
R 3	0,9388	48,3376	0,892	4,9851%
Promedio				3,7913%
Desv, Est,				0,8511%

Donde:

RI: Razón de impregnación del carbón activado

W mcs: Peso de la muestra carbón activado seco (g)

W c + csmv: Peso del crisol y el carbón activado sin materiales volátiles (g)

W csmv: Peso del carbón activado sin materiales volátiles (g)

- Determinación de contenido de ceniza y carbono fijo de los carbones activados

RI= 0,5	W mcs	W ceniza	% Ceniza	% Carbono fijo
R 1	0,9434	0,1081	11,4586%	83,1885%
R 2	1,0277	0,1149	11,1803%	83,5458%
R 3	1,017	0,1181	11,6126%	84,9164%
Promedio			11,4171%	83,8836%
Desv, Est,			0,1789%	0,7448%

RI= 1,0	W mcs	W ceniza	% Ceniza	% Carbono fijo
R 1	0,9938	0,0774	7,7883%	89,9376%
R 2	0,9105	0,073233	8,0432%	90,8915%
R 3	0,928	0,0647	6,9720%	91,9181%
Promedio			7,6011%	90,9157%
Desv, Est,			0,4569%	0,8087%

RI= 2,0	W mcs	W ceniza	% Ceniza	% Carbono fijo
R 1	0,9179	0,0903	9,8377%	87,1010%
R 2	0,8475	0,0869	10,2537%	86,4189%
R 3	0,9388	0,0902	9,6080%	85,4069%
Promedio			9,8998%	86,3089%
Desv, Est,			0,2672%	0,6960%

Donde:

RI: Razón de impregnación del carbón activado

W mcs: Peso de la muestra de carbón seco (g)

W ceniza: Peso de la ceniza del carbón activado (g)

- Densidad de empaquetamiento del carbón activado

RI= 0,5	W ca	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Granular	3,0146	7	0,43065714

Polvo	2,782	5	0,5564
Promedio			0,49352857

R= 1,0	W ca	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Granular	2,5297	5	0,50594
Polvo	2,9829	6	0,49715
Promedio			0,501545

R= 2,0	W ca	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Granular	3,1457	7	0,44938571
Polvo	3,0515	6	0,50858333
Promedio			0,47898452

Donde:

RI: Razón de impregnación

W ca: Peso del carbón activado (g)

Volumen: Volumen ocupado de la probeta (ml)

- Potencial de hidrogenión

RI= 0,5	Temperatura °C	pH
	79,5	2,806
	24,9	2,676
Promedio		2,741

RI= 1,0	Temperatura °C	pH
	75,5	2,784
	24,7	2,718
Promedio		2,751

RI= 2,0	Temperatura °C	pH
	77,4	2,755
	23,9	2,706
Promedio		2,7305

Donde:

RI: Razón de impregnación del carbón activado

2.4. Resultados de adsorción

CLAVES	Razón de impregnación	pH durante la adsorción	pH durante la adsorción	Concentración de la solución patrón mg/L	Volumen de solución patrón	Volumen de solución	Concentración inicial	Concentración en el equilibrio	Masa del adsorbente	Volumen de la solución	Porcentaje de remoción	Capacidad de adsorción
					L	ml	mg/L	mg/L	g	L	%	mg soluto/g de adsorbente
C1 P3 a (0,5)	0,50	3,062	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,341	0,0586	0,05	65,90%	0,5623
C1 P3 b (0,5)	0,50	3,062	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,479	0,0594	0,05	52,10%	0,4386
C1 P5 a (0,5)	0,50	5,175	5,000	1000,000	0,0001	102	0,98	0,399	0,0504	0,051	59,30%	0,5883
C1 P5 b (0,5)	0,50	5,175	5,000	1000,000	0,0001	102	0,98	0,320	0,0508	0,051	67,36%	0,6630
C1 P3 a (1,0)	1,00	3,197	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,262	0,0515	0,05	73,80%	0,7165
C1 P3 b (1,0)	1,00	3,197	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,424	0,0515	0,05	57,60%	0,5592
C1 P5 a (1,0)	1,00	5,069	5,000	1000,000	0,0001	98	1,02	0,262	0,0569	0,049	74,32%	0,6531
C1 P5 b (1,0)	1,00	5,069	5,000	1000,000	0,0001	98	1,02	0,383	0,0552	0,049	62,47%	0,5658
C1 P3 a (2,0)	2,00	3,155	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,237	0,0541	0,05	76,30%	0,7052
C1 P3 b (2,0)	2,00	3,155	3,000	1000,00	0,0001	100	1,00	0,122	0,0521	0,05	87,80%	0,8426
C1 P5 a (2,0)	2,00	4,980	5,000	1000,000	0,0001	100	1,00	0,238	0,0556	0,05	76,20%	0,6853
C1 P5 b (2,0)	2,00	4,980	5,000	1000,000	0,0001	100	1,00	0,304	0,0517	0,05	69,60%	0,6731
C2 P3 a (0,5)	0,50	2,595	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	9,370	0,0529	0,05	6,30%	0,5955
C2 P3 b (0,5)	0,50	2,595	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	9,370	0,0534	0,05	6,30%	0,5899
C2 P5 a (0,5)	0,50	4,989	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	2,771	0,0533	0,05	72,29%	6,7814
C2 P5 b (0,5)	0,50	4,989	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	2,544	0,0532	0,05	74,56%	7,0075

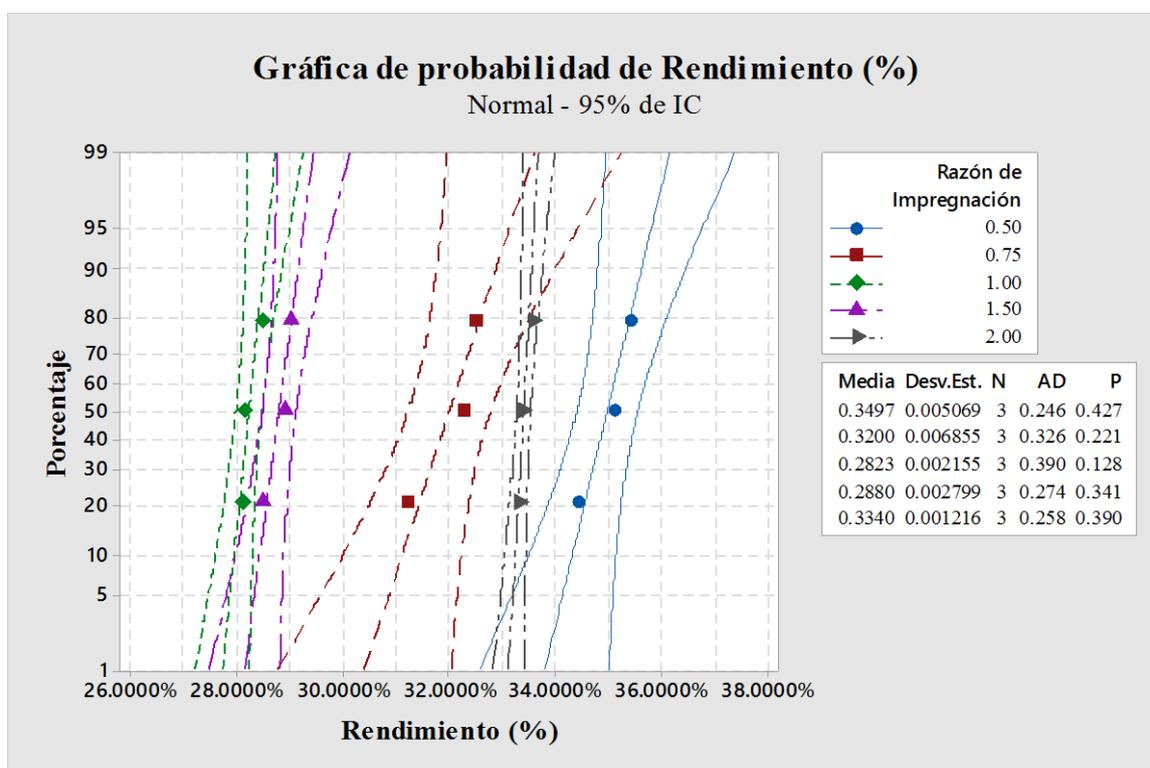
C2 P3 a (1,0)	1,00	2,836	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	5,890	0,0520	0,05	41,10%	3,9519
C2 P3 b (1,0)	1,00	2,836	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	5,190	0,0499	0,05	48,10%	4,8196
C2 P5 a (1,0)	1,00	5,090	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	1,306	0,0535	0,05	86,94%	8,1252
C2 P5 b (1,0)	1,00	5,090	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	1,030	0,0529	0,05	89,70%	8,4783
C2 P3 a (2,0)	2,00	2,917	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	3,140	0,0530	0,05	68,60%	6,4717
C2 P3 b (2,0)	2,00	2,917	3,000	1000,00	0,0010	100	10,00	0,312	0,0534	0,05	96,88%	9,0712
C2 P5 a (2,0)	2,00	5,235	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	0,163	0,0540	0,05	98,37%	9,1083
C2 P5 b (2,0)	2,00	5,235	5,000	1000,000	0,0010	100	10,00	0,115	0,0508	0,05	98,85%	9,7293
C3 P3 a (0,5)	0,50	2,851	3,000	1000,00	0,0100	104	96,15	65,400	0,0519	0,05	31,98%	29,6280
C3 P3 b (0,5)	0,50	2,851	3,000	1000,00	0,0100	104	96,15	70,100	0,0540	0,054	27,10%	26,0538
C3 P5 a (0,5)	0,50	4,951	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	54,000	0,0498	0,05	46,00%	46,1847
C3 P5 b (0,5)	0,50	4,951	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	44,600	0,0510	0,05	55,40%	54,3137
C3 P3 a (1,0)	1,00	3,102	3,000	1000,00	0,0100	100	100,00	70,600	0,0526	0,05	29,40%	27,9468
C3 P3 b (1,0)	1,00	3,102	3,000	1000,00	0,0100	100	100,00	78,900	0,0506	0,05	21,10%	20,8498
C3 P5 a (1,0)	1,00	4,942	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	44,000	0,0513	0,05	56,00%	54,5809
C3 P5 b (1,0)	1,00	4,942	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	46,600	0,0508	0,05	53,40%	52,5591
C3 P3 a (2,0)	2,00	3,034	3,000	1000,00	0,0100	100	100,00	49,600	0,0526	0,05	50,40%	47,9087
C3 P3 b (2,0)	2,00	3,034	3,000	1000,00	0,0100	100	100,00	56,500	0,0542	0,05	43,50%	40,1292
C3 P5 a (2,0)	2,00	5,007	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	50,600	0,0501	0,05	49,40%	49,3014
C3 P5 b (2,0)	2,00	5,007	5,000	1000,000	0,0100	100	100,00	41,800	0,0502	0,05	58,20%	57,9681

ANEXO 3: Análisis Estadísticos

Todos los análisis estadísticos desarrollados en el presente trabajo de investigación fueron realizados con el apoyo del programa Minitab 18. Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

3.1. Rendimiento del carbón activado

Se realizó una prueba de normalidad para determinar si los resultados de rendimiento a las distintas cinco razones de impregnación se ajustan a una distribución normal y poder proceder a una prueba estadística paramétrica como es el ANOVA de un solo factor. El siguiente gráfico muestra la distribución normal de los resultados, En el siguiente gráfico se observa que los valores de “p” son mayores a 0,05 por lo que la distribución es normal.



Razón de impregnación		
0,50	1,00	2,00
34,4066%	28,0879%	33,5326%
35,0975%	28,1293%	33,3630%
35,3946%	28,4801%	33,2968%

Se realizó un análisis ANOVA para identificar la existencia de diferencias significativas en el rendimiento debido a la razón de impregnación,

ANOVA Unidireccional:

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Razón de impregnación	3	RI=0,50, RI=1,00, RI=2,00

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust,	MC Ajust,	Valor F	Valor p
Factor	2	0,007448	0,003724	351,09	0
Error	6	0,000064	0,000011		
Total	8	0,007512			

Resumen del modelo:

S	R-cuad,	R-cuad, (ajustado)	R-cuad, (pred)
0,0032568	99,15%	98,87%	98,09%

Medias:

Factor	N	Media	Desv,Est,	IC de 95%
RI=0,50	3	0,34967	0,00507	(0,34506, 0,35427)
RI=1,00	3	0,28233	0,00215	(0,27773, 0,28693)
RI=2,00	3	0,333975	0,001216	(0,329374, 0,338576)

Desv,Est, agrupada = 0,00325684

3.2. Análisis de factores sobre la capacidad de adsorción

Razón de Impregnación	pH	Concentración Inicial	Capacidad de adsorción
0,5	3	1	0,562
0,5	3	10	0,595
0,5	3	100	29,628
0,5	5	1	0,577
0,5	5	10	6,781
0,5	5	100	46,185
1	3	1	0,717
1	3	10	3,952
1	3	100	27,947
1	5	1	0,666
1	5	10	8,125
1	5	100	54,581
2	3	1	0,705
2	3	10	6,472
2	3	100	47,909
2	5	1	0,685
2	5	10	9,108
2	5	100	49,301
0,5	3	1	0,439
0,5	3	10	0,595
0,5	3	100	26,054
0,5	5	1	0,650
0,5	5	10	7,008
0,5	5	100	54,314
1	3	1	0,559
1	3	10	4,820
1	3	100	20,850
1	5	1	0,577
1	5	10	8,478
1	5	100	52,559
2	3	1	0,843
2	3	10	9,071
2	3	100	40,129

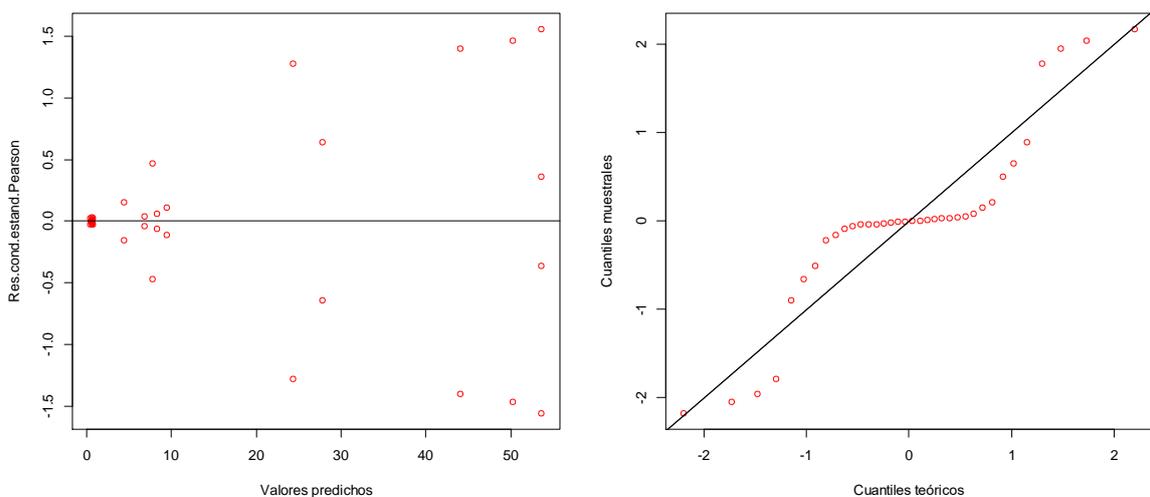
2	5	1	0,673
2	5	10	9,729
2	5	100	57,968

.Debido a que en el presente estudio se realizaron procedimientos establecidos y consistentes no fue necesario separar en bloques a los ensayos realizados. El diseño realizado posee 36 corridas y es resultado del diseño factorial ($3 \times 2 \times 3$) con dos repeticiones.

Factor	Niveles	Valores
Razón de impregnación	3	0,5, 1,0, 2,0
pH	2	3, 5
Concentración inicial	3	1, 10, 100

Antes de emplear una prueba de hipótesis, se analizan las medidas de ajuste del modelo con el fin de determinar si los datos de la muestra se ajustan a los supuestos de la prueba. Al analizar los supuestos se determinó necesario realizar una modelación de varianza de los datos, esto consiste en emplear algoritmos con el fin de estabilizar la heterogeneidad de la muestra. A partir de esta modelación se obtuvieron los siguientes gráficos:

Modelo 1:



Heterogeneidad

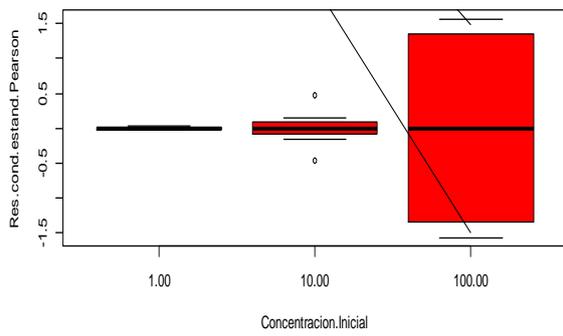
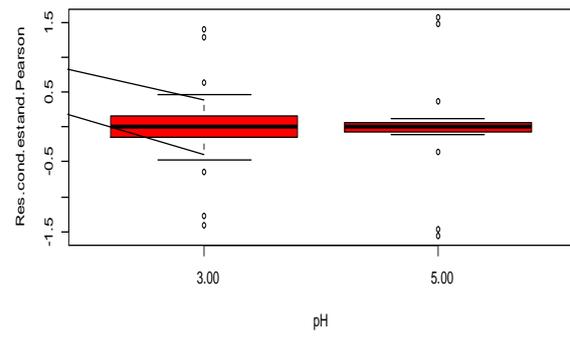
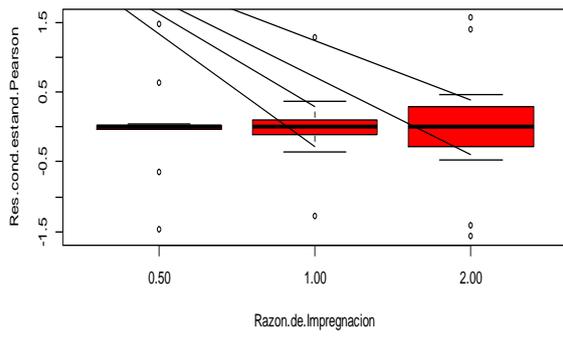
Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R²
36	138.29	155.21	-50.15	2.77	0.99

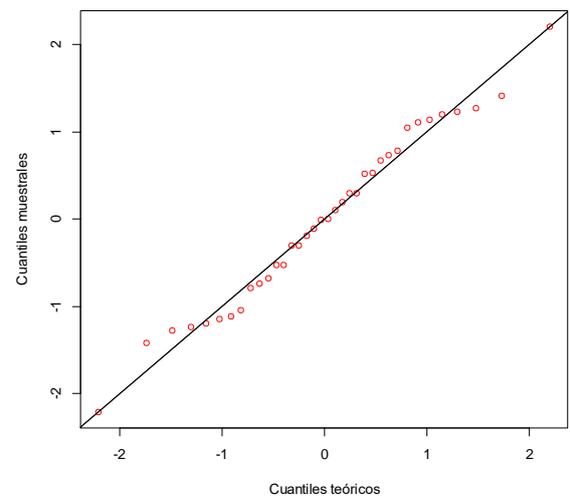
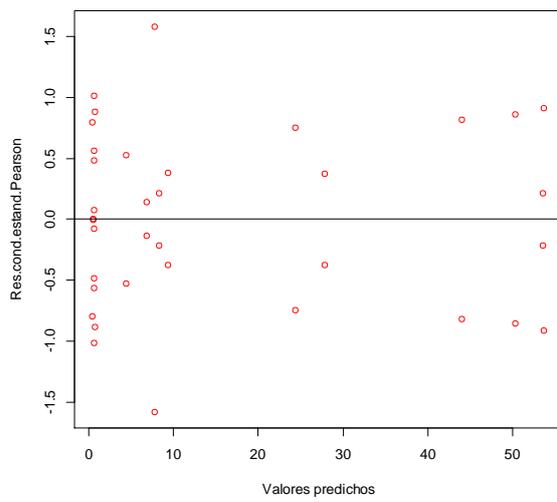
AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

Factores	numDF	F-value	p-value
Razón de Impregnación	2	10.81	0.0008
pH	1	77.06	<0.0001
Concentración Inicial	2	796.67	<0.0001
Razón de Impregnación : pH	2	5.84	0.0111
Razón de Impregnación: Conc. Inicial	4	4.47	0.0111
pH : Concentración Inicial	2	45.61	<0.0001
Razón de Impregnación : pH : C	4	3.84	0.0199



Modelo 2:



En el gráfico de Residuos vs. Ajustes muestra que una distribución aleatoria y varianza constata ya que los puntos se ubican aleatoriamente a ambos lados del 0, sin patrones detectables.

La gráfica de Probabilidad Normal de los Residuos verifica el supuesto de que los residuos no están distribuidos normalmente ya que siguen a la línea recta aunque con cierta curvilinealidad.

Además, se evaluaron indicadores con criterio de información, tales como el AIC (Criterio de Información de Akaike) y el BIC (Criterio de Información Bayesiano). Estos criterios se emplean en modelos complejos cuya capacidad de predicción sea baja. Es decir, cuantas más variables y cuantas más interrelaciones entre los componentes incorpore un modelo más concretas serán sus predicciones, pero menos generalizables. Esto hace que se apliquen criterios de información con el fin de simplificar al máximo los modelos estadísticos reduciendo el número de variables predictoras. Tanto el AIC como el BIC emplean la Máxima Verosimilitud como criterio de bondad de ajuste y el número de parámetros como medida de complejidad.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R²
36	91.16	109.86	-24.58	0.08	0.99

Cuando se realizar la modelación de varianzas el valor de AIC fue de 138,29 y el de BIC fue de 155,21. Menores valores de AIC y BIC implican mejor ajuste por lo que se selecciona el modelo obtenido luego de la modelación de varianza.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

Factores	numDF	F-value	p-value
Razón de Impregnación	2	10.81	0.0008
pH	1	77.06	<0.0001
Concentración Inicial	2	739.36	<0.0001
Razón de Impregnación : pH	2	5.84	0.0111
Razón de Impregnación: Conc. Inicial	4	19.00	<0.0001

pH : Concentración Inicial	2	62.30	<0.0001
Razón de Impregnación : pH : C	4	5.79	0.0035

Capacidad de Adsorción - Medias ajustadas y errores estándares para: Razón de Impregnación: pH: Concentración Inicial

DGC (Alfa=0.05)

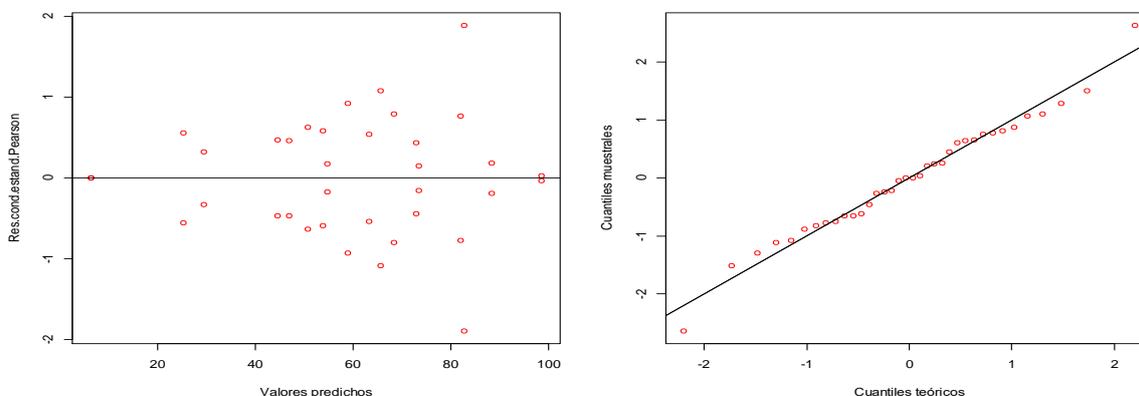
Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razon.de.Impregnacion	pH	Concentracion.Inicial	Medias	E.E.			
2.00	5.00	100.00	53.63	3.35	A		
1.00	5.00	100.00	53.57	3.35	A		
0.50	5.00	100.00	50.25	3.35	A		
2.00	3.00	100.00	44.02	3.35	A		
0.50	3.00	100.00	27.84	3.35		B	
1.00	3.00	100.00	24.40	3.35		B	
2.00	5.00	10.00	9.42	0.58			C
1.00	5.00	10.00	8.30	0.58			C
2.00	3.00	10.00	7.77	0.58			C
0.50	5.00	10.00	6.89	0.58			C
1.00	3.00	10.00	4.39	0.58			D
2.00	3.00	1.00	0.77	0.05			E
2.00	5.00	1.00	0.68	0.05			E
1.00	3.00	1.00	0.64	0.05			E
0.50	5.00	1.00	0.63	0.05			E
1.00	5.00	1.00	0.61	0.05			E
0.50	3.00	10.00	0.59	0.58			E
0.50	3.00	1.00	0.50	0.05			E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3.3. Análisis de los factores sobre el porcentaje de remoción

Modelo 1



Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R ²
36	173.95	190.87	-67.97	7.47	0.95

AIC y BIC menores implica mejor ajuste

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

Factores	numDF	F-value	p-value
Razón de Impregnación	2	36.09	<0.0001
pH	1	66.00	<0.0001
Concentración Inicial	2	40.46	<0.0001
Razón de Impregnación : pH	2	10.36	0.0010
Razón de Impregnación: Conc. Inicial	4	8.83	0.0004
pH : Concentración Inicial	2	24.84	<0.0001
Razón de Impregnación : pH : C	4	2.37	0.0907

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	pH	Medias	E.E.				
2.00	5.00	75.10	3.05	A			
2.00	3.00	70.58	3.05	A	B		
1.00	5.00	70.47	3.05	A	B		
0.50	5.00	62.49	3.05		B		
1.00	3.00	45.18	3.05			C	
0.50	3.00	31.61	3.05				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje de Remoción - Medias ajustadas y errores estándares para Razón de Impregnación*Concentración Inicial

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	Concentración Inicial	Medias	E.E.					
2.00	10.00	90.68	3.73	A				
2.00	1.00	77.48	3.73		B			
1.00	1.00	67.05	3.73		B	C		
1.00	10.00	66.46	3.73		B	C		
0.50	1.00	61.17	3.73			C	D	
2.00	100.00	50.38	3.73				D	E
0.50	100.00	40.12	3.73					E
1.00	100.00	39.98	3.73					E
0.50	10.00	39.86	3.73					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje de Remoción - Medias ajustadas y errores estándares para pH * Concentración Inicial

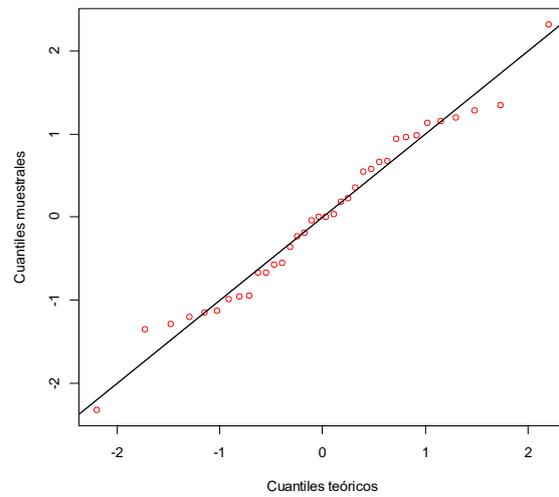
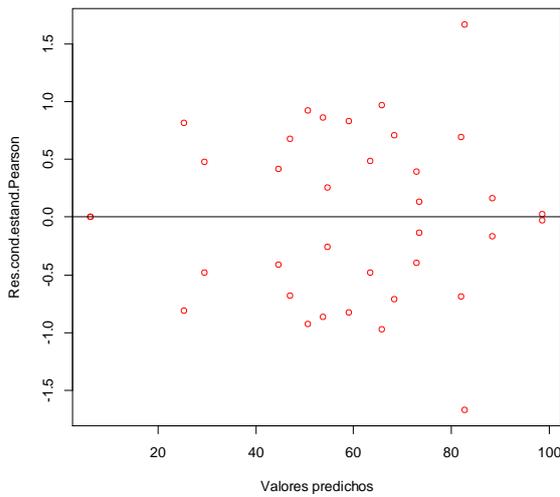
LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

pH	Concentración Inicial	Medias	E.E.				
5.00	10.00	86.79	3.05	A			
3.00	1.00	68.92	3.05		B		
5.00	1.00	68.21	3.05		B		
5.00	100.00	53.07	3.05			C	
3.00	10.00	44.55	3.05			C	
3.00	100.00	33.91	3.05				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Modelo 2 Modelación de la Varianza



Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R²
36	176.22	194.91	-67.11	8.34	0.95

AIC y BIC menores implica mejor

AIC: 176.22, BIC 194.9

Var Ident Concentración Inicial

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

Factores	numDF	F-value	p-value
Razón de Impregnación	2	36.09	<0.0001
pH	1	66.00	<0.0001
Concentración Inicial	2	55.01	<0.0001
Razón de Impregnación : pH	2	10.36	0.0010
Razón de Impregnación: Conc. Inicial	4	8.83	0.0004
pH : Concentración Inicial	2	19.62	<0.0001
Razón de Impregnación : pH : C	4	2.29	0.0997

Porcentaje de Remoción - Medias ajustadas y errores estándares para Razón de Impregnación * pH

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	pH	Medias	E.E.			
2.00	5.00	75.10	3.05	A		
2.00	3.00	70.58	3.05	A	B	
1.00	5.00	70.47	3.05	A	B	
0.50	5.00	62.49	3.05		B	
1.00	3.00	45.18	3.05			C
0.50	3.00	31.61	3.05			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje.de.Remocion - Medias ajustadas y errores estándares para Razon.de.Impregnacion*Concentracion.Inicial

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	Concentración Inicial	Medias	E.E.					
2.00	10.00	90.68	4.24	A				
2.00	1.00	77.48	4.17		B			
1.00	1.00	67.05	4.17		B	C		
1.00	10.00	66.46	4.24		B	C		
0.50	1.00	61.17	4.17			C		
2.00	100.00	50.38	2.55				D	
0.50	100.00	40.12	2.55					E
1.00	100.00	39.98	2.55					E
0.50	10.00	39.86	4.24					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje.de.Remocion - Medias ajustadas y errores estándares para
pH*Concentracion.Inicial

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

pH	Concentración Inicial	Medias	E.E.					
5.00	10.00	86.79	3.46	A				
3.00	1.00	68.92	3.40		B			
5.00	1.00	68.21	3.40		B			
5.00	100.00	53.07	2.08			C		
3.00	10.00	44.55	3.46				D	
3.00	100.00	33.91	2.08					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Modelo 3 Modelación de los datos

Medidas de ajuste del modelo

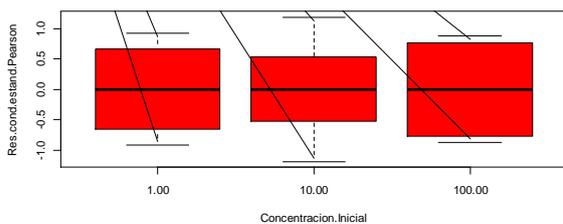
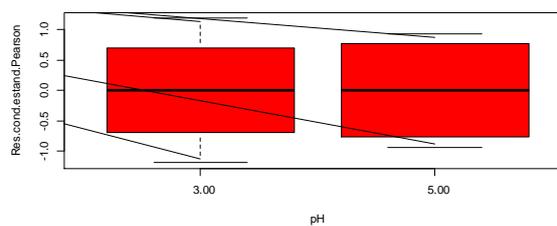
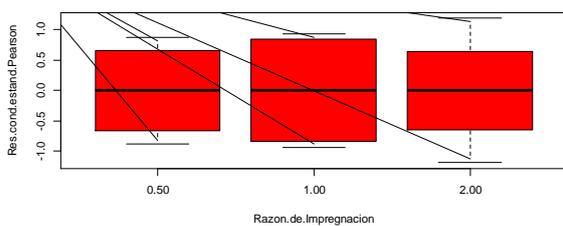
N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R ²
36	173.18	194.55	-62.59	9.88	0.95

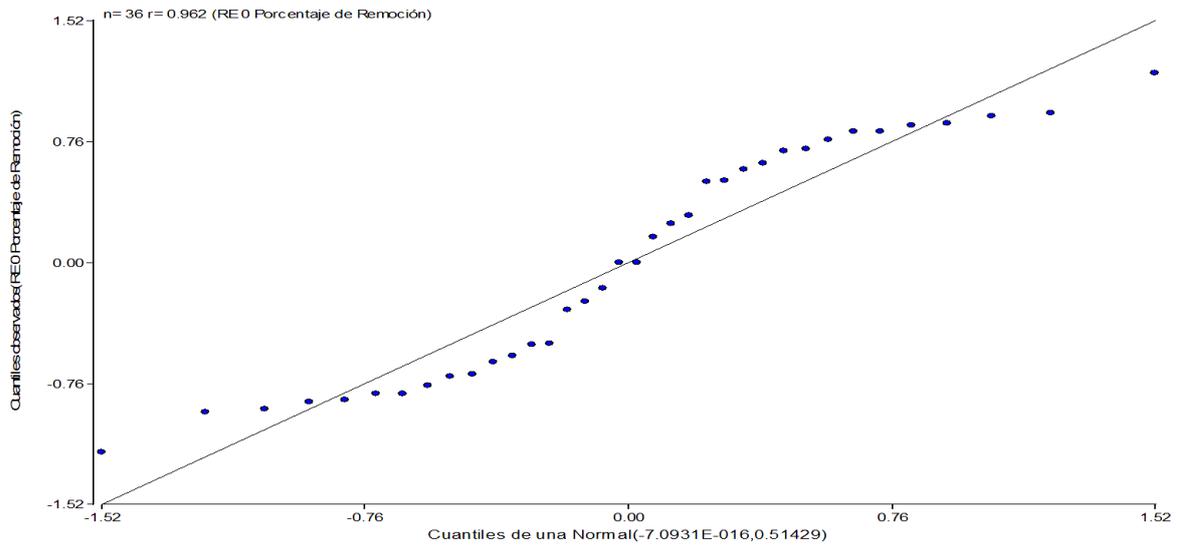
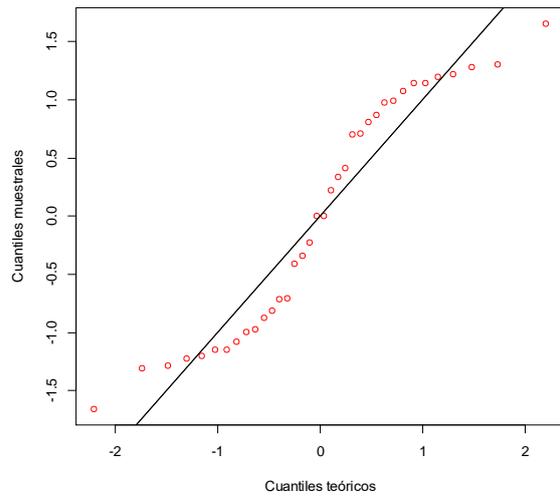
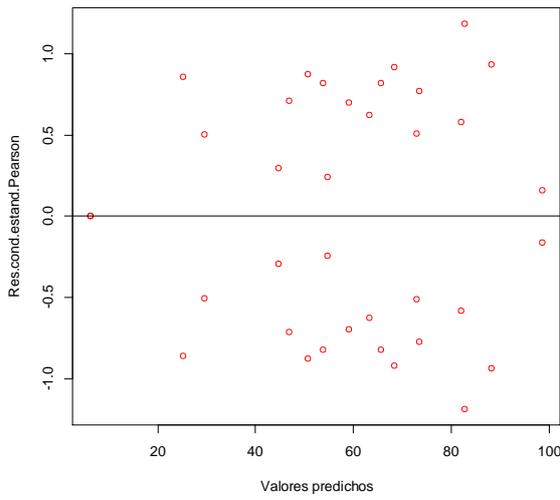
AIC y BIC menores implica mejor

AIC: 173.18, BIC 194.55

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

Factores	numDF	F-value	p-value
Razón de Impregnación	2	36.09	<0.0001
pH	1	66.00	<0.0001
Concentración Inicial	2	55.01	<0.0001
Razón de Impregnación : pH	2	10.36	0.0010
Razón de Impregnación: Conc. Inicial	4	8.83	0.0004
pH : Concentración Inicial	2	19.62	<0.0001
Razón de Impregnación : pH : C	4	2.29	0.0997





$r \geq 0.962$

Porcentaje.de.Remocion - Medias ajustadas y errores estándares para
Razon.de.Impregnacion*pH

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	pH	Medias	E.E.				
2.00	5.00	75.10	2.01	A			
2.00	3.00	70.58	3.82	A	B		
1.00	5.00	70.47	2.01	A	B		
0.50	5.00	62.49	2.01		B		
1.00	3.00	45.18	3.82			C	
0.50	3.00	31.61	3.82				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje de Remoción - Medias ajustadas y errores estándares para Razón de Impregnación * Concentración Inicial

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Razón de Impregnación	Concentración Inicial	Medias	E.E.					
2.00	10.00	90.68	4.24	A				
2.00	1.00	77.48	4.17		B			
1.00	1.00	67.05	4.17		B	C		
1.00	10.00	66.46	4.24		B	C		
0.50	1.00	61.17	4.17			C		
2.00	100.00	50.38	2.55				D	
0.50	100.00	40.12	2.55					E
1.00	100.00	39.98	2.55					E
0.50	10.00	39.86	4.24					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Porcentaje de Remoción - Medias ajustadas y errores estándares para pH * Concentración Inicial

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

pH	Concentración Inicial	Medias	E.E.				
5.00	10.00	86.79	0.60	A			
3.00	1.00	68.92	4.03		B		
5.00	1.00	68.21	2.63		B		
5.00	100.00	53.07	2.19			C	
3.00	10.00	44.55	4.86			C	D
3.00	100.00	33.91	1.97				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test de Verosimilitud

Modelo 1 vs Modelo 3

	Model df	AIC	BIC	Log Li	Test	L. Ratio	p-value
Modelo 1	1	19	173.95	190.87	-67.97		
Modelo 3	2	24	173.18	194.55	-62.59	1 vs 2 10.77	0.0562

Cerca de 0.05. El mejor es el Modelo 3.