

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADSORCIÓN CON  
COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO DE  
RESIDUOS OLIVÍCOLAS PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ORO A  
NIVEL LABORATORIO**

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Marco Antonio Vilca Chambilla**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

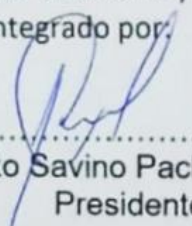
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADSORCIÓN CON  
COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO DE  
RESIDUOS OLIVÍCOLAS PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ORO A NIVEL  
LABORATORIO**

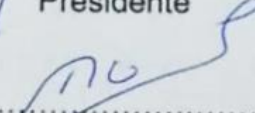
**TESIS**

Tesis sustentada por el bachiller Marco Antonio Vilca Chambilla y aprobado el día 25 de mayo de 2022, siendo el Jurado Calificador integrado por:

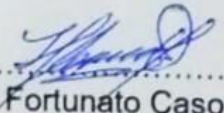
PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco  
Presidente

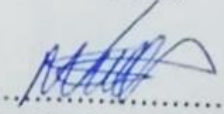
SECRETARIO

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez  
Secretario

VOCAL

  
.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa  
Vocal

ASESOR

  
.....  
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

## **DEDICATORIA**

A mi madre por el constante apoyo en toda mi vida universitaria y por estar siempre conmigo en todo momento.

A mi padre por ser mi constante motivación e inspiración y el mejor ejemplo a seguir como profesional y como persona.

A mis hermanos Gary, Ronald, Rodolfo, Mary y Yaneth porque en ellos quiero ser un buen ejemplo a seguir.

A mis abuelos y a mi tía Maruja que han sido un apoyo incondicional durante toda mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme permitido pertenecer a una excelente familia ESME, quienes me forjaron como la persona que actualmente soy.

A mí asesor, Dr. Matías Vivar Colquicocha, por su apoyo y la paciencia brindada durante todo el proceso de elaboración del presente trabajo.

A mis padres, Daniel Vilca y Calixta Chambilla quienes me dieron vida, educación, apoyo y consejos.

Agradecer a las personas que me apoyaron en la elaboración de la tesis.

Por último, y no menos importante a Janeth Vilca, quien me apoyo y alentó para continuar en todo momento.

<b>CONTENIDO</b>	
<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>3</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	4
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.2.1. Problema general de la investigación	5
1.2.2. Problemas específicos de la investigación	5
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	6
1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5. OBJETIVOS	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. HIPÓTESIS	8
1.6.1. Hipótesis general	8

1.6.2. Hipótesis específica	8
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	9
2.2. BASES TEÓRICAS	11
2.2.1. Concepto básico de hidrometalurgia	11
2.2.2. Sistema de adsorción con columnas de carbón activado	14
2.2.3. Recuperación de oro	18
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	19
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>24</b>
3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y MATERIAL DE ESTUDIO	25
3.2.1. Población	25
3.2.2. Muestra	25
3.2.3. Material de estudio	25
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	26
3.4. MÉTODO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	27
3.4.1. Método	27
3.4.2. Técnica	27

3.4.3. Materiales, equipos, reactivos e instrumento	27
3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	29
3.5.1. Procedimiento experimental	29
3.5.2. Análisis de datos	30
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS</b>	<b>31</b>
4.2. SISTEMA DE ADSORCIÓN CON COLUMNAS DE CARBÓN	31
4.2.1. Sistema de adsorción	31
4.2.2. Metodología de circuito	35
4.2.2.1. Carbón activado de residuos de olivo	35
4.2.3. Adsorción con carbón activado de olivo	43
4.2.4. Porcentaje de adsorción	44
4.3. RECUPERACIÓN DE ORO	46
4.3.1. Desorción del carbón activado de olivo	46
4.3.2. Verificación del modelo con resultados experimentales	46
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>52</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>57</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Parámetros de operacionalización	26
<b>Tabla 2</b> Niveles de las variables	32
<b>Tabla 3</b> Matriz factorial	32
<b>Tabla 4</b> Efecto de estimación de adsorción de oro	33
<b>Tabla 5</b> Coeficiente de regresión para la adsorción de oro	34
<b>Tabla 6</b> Adsorción de oro estimado	35
<b>Tabla 7</b> Caracterización del carbón activado	42
<b>Tabla 8</b> Niveles de análisis	43
<b>Tabla 9</b> Condiciones	44
<b>Tabla 10</b> Porcentaje de adsorción de oro	44
<b>Tabla 11</b> Verificación del modelo con resultados experimentales	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación de isotermas de adsorción de solutos	17
<b>Figura 2.</b> Muestra del mineral aurífero utilizado para las pruebas	26
<b>Figura 3.</b> Circuito de adsorción de carbón activado	38
<b>Figura 4.</b> Análisis del % de adsorción de oro	45

## RESUMEN

El presente estudio, trata sobre diseñar un sistema de adsorción con columnas de carbón activado de residuos olivícolas para la recuperación de oro a nivel de laboratorio, con la finalidad de determinar sistema de adsorción con materia prima producida en la región de Tacna, puesto que la Región de Tacna es uno de los mayores productores de olivo a nivel nacional. La determinación de la eficiencia del sistema de adsorción del carbón activado de residuos olivícola, se pudo hallar mediante el diseño experimental que consiste en desarrollar un diseño factorial  $2^3$  que consiste en diseños en los cuales cada uno de los factores cuenta con dos niveles, es decir cuando se realiza un experimento con un número de factores  $k$  en el que cada uno de estos solo puede adoptar dos niveles, para la investigación se consideró tres factores de análisis determinando un nivel máximo dos y un mínimo de uno.

Asimismo, se estableció parámetros como la metodología, técnica, materiales, equipos, reactivos e instrumentos para desarrollar el sistema de adsorción con carbón activado de residuos olivícola, determinándose el circuito de adsorción cumpliendo la metodología para la recuperación de oro de las muestras obtenidas de las pequeñas mineras de Palca.

Para la ejecución del presente trabajo de investigación es de necesidad conocer la estructura física del carbón activado de residuo olivícola dando a conocer los resultados con los mayores valores asignados de acuerdo al análisis de pH, densidad, carbón fijo, humedad y cenizas y/o material volátil, con la finalidad de conocer la capacidad de adsorción que pueda tener dicho producto.

**Palabras clave:** Adsorción, sistema, columna, carbón y activación.

## **SUMMARY**

The present study deals with designing an adsorption system with activated carbon columns of olive residues for the recovery of gold at the laboratory level, in order to determine an adsorption system with raw material produced in the Tacna region, since the Tacna region is one of the largest olive producers nationwide.

The determination of the efficiency of the activated carbon adsorption system from olive residues could be found through the experimental design that consists of developing a  $2^3$  factorial design that consists of designs in which each of the factors has two levels, that is, When an experiment is carried out with a number of factors  $k$  in which each of these can only adopt two levels, three analysis factors were observed for the investigation, determining a maximum level of two and a minimum of one.

Likewise, parameters such as the methodology, technique, materials, equipment, reagents and instruments will be configured to develop the adsorption system with activated carbon for olive residues, determining the adsorption circuit simulating the methodology for the recovery of gold from the samples obtained from the Small Miners of Palca.

For the execution of this research work, it is necessary to know the physical structure of activated carbon from olive residue, revealing the

results with the highest values assigned according to the analysis of pH, density, fixed carbon, humidity and ash and/or material. volatile, in order to know the adsorption capacity that said product may have.

**Keywords:** Adsorption, system, column, carbon and activation.

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, la adsorción es considerada una de las mejores técnicas de recuperación de minerales de oro y plata, ya que este proceso resulta de interés material y cuenta con una gran superficie interna, como es el carbón activo. La adsorción por carbón activo recupera eficazmente un amplio rango de compuestos de elementos de interés y la naturaleza química de los átomos de carbono que conforman el carbón activo, le dan una propiedad de atraer y atrapar de manera preferencial ciertas moléculas del fluido que rodean al carbón.

En el estudio de investigación se evaluaron las condiciones operacionales y sus efectos sobre el área superficial y la capacidad de adsorción en la obtención de carbón activo del residuo (hueso) de la aceituna, donde estos residuos de la aceituna son tratados como desechos de acuerdo a la investigación mediante la observación directa se pudo apreciar que no asignan un valor a los desechos de olivo en los centros de producción en la región de Tacna.

Además, se caracteriza el hueso de la aceituna, la porosidad del carbón activo así mismo se calcularon los parámetros importantes y que están asociados al carbón activo obtenido como el contenido total de cenizas, materias solubles en agua y densidad aparente de la muestra.

También, en el desarrollo del trabajo se realizó el diseño en las columnas de absorción para poder recuperar el oro y la plata, así mismo, se plantea una alternativa en la recuperación del oro de soluciones diluidas después del proceso de cianuración de concentrados utilizando carbón activado como último proceso de recuperación y qué mejor utilizar los residuos generados por las empresas que producen aceite a partir de la aceituna.

Es así, que se puntualiza que el capítulo I contiene los antecedentes, problemas específicos del tema propuesto, limitaciones, objetivos e hipótesis, en tanto que, en el capítulo II se aborda el marco teórico, antecedentes del estudio, bases teóricas, sistema de adsorción con columnas de carbón activado, entre otros aspectos.

En el capítulo III se detallan el marco metodológico, población, muestra, material de estudio, operacionalización de variables, procesamiento y análisis de datos, mientras que el capítulo IV trata sobre sistema de adsorción con columnas de carbón, y la recuperación de oro.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

##### **1.1.1. Antecedentes del problema**

Actualmente en el Perú, el sector minero es uno de los ejes principales de soporte económico, financiero, siendo que para el año 2021 se estimó que la minería aportó al PBI del Perú en un 14,4%, siendo un sector económico que con el pasar de los años sigue en crecimiento; sin embargo, la relación entre dicho sector con la sociedad es inestable por el impacto ambiental y otros aspectos. La región de Tacna no es ajena a la problemática que acarrea el sector minero, uno de ellos, es la contaminación ambiental, mediante los procedimientos y metodologías utilizadas para la extracción de los minerales.

Las empresas mineras establecidas en la región de Tacna vienen utilizando para la extracción del oro y la plata mediante la adsorción de columnas de carbón activado, en su mayoría carbón activado comercial, sin embargo, esta zona cuenta con residuos de olivícolas, por lo que, se plantea la adsorción de oro mediante el carbón activado de dichos residuos a nivel de laboratorio, con la finalidad de generar mayores ingresos.

### **1.1.2. Problemática de la investigación**

La minería a nivel mundial se desarrolla en pequeña y gran escala teniendo consecuencias e impactos importantes tanto negativos como positivos. Entre los impactos positivos es una actividad que directamente se vincula con las finanzas, siendo uno de los sectores económicos con mayores ingresos en un gran porcentaje de países en el mundo. La cotización de los minerales ha sido un aspecto determinante en la evolución de las esferas mundiales en estos últimos años.

El Perú no es ajeno a la actividad minera, donde la etapa de adsorción de oro es una de las más importantes, que se realiza con carbón activado comercial obtenido de diferentes materiales, siendo un producto comercial importado de países extranjeros, el costo se torna elevado por la diferencia de las divisas monetarias, otro aspecto importante en la adsorción mediante columnas de carbón activado es el consumo de agua. En el país, no hay buen uso del recurso hídrico, según informe de la Autoridad Nacional de Agua, de manera que no se garantiza la protección de la calidad de las fuentes de agua (ANA, 2018).

Otro de los factores que acarrea dificultades, es el crecimiento poblacional y la ausencia de una adecuada planificación urbana, que agrava el problema, existiendo carencia en la distribución de agua potable, o la contaminación de las mismas por parte de las mineras.

El presente estudio pretende plantear la aplicación metodologías mejoradas mediante la adsorción de oro mediante pilar de carbón activado de materiales y residuos del olivo, el cual tendrá un efecto económico positivo para las mineras y un bajo consumo de agua con la finalidad de reducir el impacto negativo con el ambiente.

Un sistema mejorado de columnas de carbón activado de residuos de olvido, mejorará la capacidad de adsorción con el uso eficiente de recursos e insumos para la extracción del oro.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Ante la problemática nos hacemos la siguiente formulación del problema:

### **1.2.1. Problema general de la investigación**

¿Cuál es la efectividad de recuperación de oro mediante la adsorción con columnas de carbón activado de residuos de olivo?

### **1.2.2. Problemas específicos de la investigación**

- i)** ¿Cuál es la eficiencia del sistema de adsorción con carbón activado de residuos de olivo?
- ii)** ¿Cómo influye la metodología del circuito del sistema de adsorción de carbón activado de residuos de olivo?
- iii)** ¿Cuáles son las características del carbón activado de residuos de olivo?

iv) ¿Cuál es la cantidad de desorción del carbón activado de residuos de olivo?

v) ¿Cuál será el parámetro de diseño más importante a considerar en la recuperación de oro?

### **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Los costos que involucran la importación del carbón activado comercial para la adsorción de oro mediante columnas de carbón activado, en el Perú tienen un costo elevado, el problema acarrea por la transacción de divisas, otro factor que viene influyendo en el costo elevado del dólar es el COVID-19 y factores políticos inestables en el Perú.

Por lo que, en la presente investigación se pretende desarrollar un diseño de adsorción de columnas de carbón activado de residuos de olivo para la desorción de oro a nivel de laboratorio, siendo esta investigación de alta importancia para generar mayores utilidades en el sector minero.

### **1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El mundo y el país atraviesan una pandemia mortal donde se han perdido miles de vidas humanas a diario, tanto instituciones públicas como privadas vienen atendiendo de manera parcial respetando ciertos protocolos; por lo tanto, en ese entorno ciertos sectores se vienen perjudicando como el sector educación, las investigaciones, etc., por lo expuesto se tienen dificultades.

Entre las principales limitaciones de la presente investigación son las siguientes:

- i) El procesamiento de los datos es a nivel de laboratorio, no hay convenios interinstitucionales con empresas mineras para el desarrollo de investigación.
- ii) Los datos obtenidos en la investigación son de carácter experimental a nivel de laboratorio, lo que limita la aplicación de los resultados a gran escala por falta de una planta de adsorción con columnas de carbón activado.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar un diseño de sistema de adsorción y la efectividad mediante un circuito con columnas de carbón activado de residuos de olivo para la recuperación de oro a nivel laboratorio.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- i) Determinar la eficiencia del sistema de adsorción con carbón activado de residuos de olivo.
- ii) Establecer parámetros metodológicos para el circuito del sistema de adsorción de carbón activado de residuos de olivo.
- iii) Determinar las características del carbón activado de residuos de olivo.

- iv) Determinar la eficiencia de desorción del carbón activado de residuos de olivo.
- v) Establecer parámetros de diseño para mejorar la recuperación del oro.

## **1.6. HIPÓTESIS**

### **1.6.1. Hipótesis general**

Al determinar un diseño adecuado en el sistema de adsorción mejorando la efectividad con columnas de carbón activado a base de residuos de olivo, se podrá optimizar la recuperación de oro a nivel de laboratorio.

### **1.6.2. Hipótesis específica**

- i) El sistema de adsorción con columnas de carbón activado de residuos de olivo será mejor o igual la eficiencia de recuperación.
- ii) Si se determina parámetros metodológicos adecuados entonces el sistema de adsorción de carbón activado de residuos de olivo mejorará.
- iii) La identificación adecuada de las características físico químicas del carbón activado de residuos de olivo permitirá mejorar la funcionalidad del sistema de adsorción.
- iv) La desorción del carbón activado de residuos de olivo será eficiente para las pruebas realizadas a nivel laboratorio.
- v) Si se establecen parámetros de diseño estandarizados a gran escala mejorará la recuperación del oro.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

- **Antecedente internacional**

Gasca (2016) en su tesis denominada “Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados” plantea los siguientes objetivos generales: Determinar la factibilidad de adsorber complejos de oro mediante CA granular de carácter básico de soluciones muy diluidas (< 10 µg/L). Llegando a las siguientes conclusiones; 1) Las características físicas de los CA juegan un papel importante en el proceso de adsorción de oro, siendo principalmente el área correspondiente a los microporos la que influye en gran manera a la adsorción del complejo de oro. 2) Los grupos funcionales presentes en los distintos CA parecieran no jugar un papel importante dentro del proceso de adsorción de oro, sin embargo, los resultados sugieren una interacción con los cationes presentes en solución. 3) La capacidad de adsorción de complejos de coordinación de oro por unidad de área se incrementó hasta aproximadamente tres veces en el adsorbente de carácter básico (modificado químicamente), lo cual corrobora la hipótesis planteada en la presente investigación.

Yampasi (2017) en su tesis denominada “Adsorción del Carbón Activado de Tallos y Hojas de Cañihua (*Chenopodium Pallidecaule*), para la Recuperación del oro en la Minera Colibrí S.A.C.” plantea como objetivo general obtener carbones activados a partir de tallos y hojas de la Cañihua (*Chenopodium pallidecaule*) para la adsorción y recuperación del oro, llegando a las siguientes conclusiones: 1) A partir del análisis fisicoquímico en la página 62 concluye que el carbón activado elaborado a partir de tallos y hojas de cañihua, por el método de activación química con ácido fosfórico, a nivel del laboratorio, es de buena calidad, igualando al carbón activado comercial; el carbón obtenido fue activado por activación química con  $H_3PO_4$  al 85% a nivel de laboratorio, en la que se obtuvo un rendimiento del 45,5%. 2) La caracterización del carbón activado, se basó en la determinación de sus propiedades fisicoquímicas cuyos resultados fueron: humedad 7,41%, ceniza 8,31%, material volátil 11,89%, carbono fijo 72,16%, densidad aparente  $0,36 \text{ g/cm}^3$  y pH 5,75. 3) Los presentes resultados indican que el carbón elaborado a partir de tallo y hojas de cañihua presenta características fisicoquímicas comparables con los carbones activados comerciales; finalmente, concluye que los carbones activados obtenidos a partir de tallo y hojas de cañihua adsorbe el oro al 97,45%. 4) El oro se recupera del carbón activado por fusión, obteniéndose oro de 24 kilates.

Avendaño (2018) en su tesis denominada “Diseño del circuito de desorción para tratar 200 kilos de carbón activado” plantea como objetivo general: Calcular y diseñar el circuito de desorción para tratar 200 kilogramos de carbón activado cargado de oro. En la página 71 llega a las siguientes conclusiones; 1) El diseño de los equipos se diseñó en función a los parámetros relacionados con variables operativas, así lograr equipos adecuados para la pequeña minería. 2) Los materiales para la construcción de la celda de electrodeposición se escogieron en base a los parámetros y criterios antes indicados como también la inspección del material que va ser adquirido. 3) Las dimensiones del equipo para la desorción de 0,2 toneladas de carbón activado son de 1,88 m de altura con un diámetro de 0,54 m. 4) Las dimensiones de celda de electro obtención para extraer el oro de soluciones ricas en oro son de medidas internas de 0,90 m de largo por 0,28 m y 0,33 m; con una cantidad de 17 electrodos con 8 cátodos y 9 ánodos.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Concepto básico de hidrometalurgia**

Hidrometalurgia es la aplicación del proceso bastante conocido de extracción y separación de una sustancia soluble de otra insoluble, usando un solvente inorgánico u orgánico, generalmente acuoso, a temperatura y presiones variables (Lovera Dávila, 1999).

La hidrometalurgia según Lovera Dávila, considera los siguientes aspectos:

- a) Pretratamiento o preparación
- b) Lixiviación
- c) Separación sólida – líquida
- d) Purificación y extracción
- e) Recuperación final del valioso

En la hidrometalurgia previo a la recuperación del mineral valioso se tiene que tomar en cuenta ciertas etapas, los cuales se dan a conocer a continuación.

#### **a) Preparación**

Para lixiviar un mineral es necesario conocer el tamaño adecuado de partículas y densidad de pulpa para lograr una mejor eficiencia de extracción al menor costo posible. Algunas veces es necesario cambiar la estructura química para hacer una lixiviación preferencial (Lovera, 1999).

#### **b) Lixiviación**

Es un proceso en que los valores metálicos contenidos en un mineral son transferidos selectiva y completamente, tanto como sea posible, del estado sólido al líquido, dejando la ganga en la forma sólida para la separación subsecuente (Lovera (1999)).

La selección del reactivo para la lixiviación está controlada mayormente por los factores de selectividad y costo. Aunque las condiciones para lixiviar un mineral son determinadas por experimentación, ciertos factores son comunes en la lixiviación bajo condiciones normales de presión, como son el tamaño de partícula, composición y concentración del solvente, tiempo de contacto, temperatura, agitación, etc. (Lovera (1999)).

Se tiene algunas técnicas de lixiviación como:

- Lixiviación in situ
- Lixiviación en pilas
- Lixiviación por percolación
- Lixiviación por agitación
- Lixiviación a presión

### **c) Separación sólido - líquido**

Para separar el líquido de los sólidos muchas veces es necesario pasar por las etapas de sedimentación, espesamiento y filtración, y los requerimientos y costos de planta y equipo para estas etapas son muchas veces mayores que para la etapa de lixiviación (Lovera,1999).

### **d) Purificación o extracción**

En muchos casos, la solución madre ya separada de los sólidos, que son en mayor parte relaves o ganga, no están todavía en condiciones de ir a la etapa final de recuperación de valores, por la sencilla razón que la

solución madre contiene muchas impurezas que pueden precipitarse juntos con el producto final deseado, impurificándolo y afectando su calidad (Lovera Dávila, 1999). Por eso, la solución tiene que pasar por una etapa de purificación, que en la mayoría de los casos consiste en:

- Cambio de pH
- Agregado de reactivos
- Uso del intercambio iónico
- Extracción por solventes
- Membradas permeables

#### **e) Recuperación final de valores**

La recuperación de valores de la solución purificada se puede hacer en general de dos maneras: Por precipitación o reducción química con diversos agentes reductores a condiciones normales o bajo presión y por reducción electrolítica (Lovera, 1999).

Por precipitación y reducción química. -La precipitación o cementación es una reacción bien conocida desde hace siglos, un clásico ejemplo es la cementación de cobre con hierro (Lovera, 1999).

### **2.2.2. Sistema de adsorción con columnas de carbón activado**

#### **2.2.2.1. Sistema de adsorción**

El sistema de adsorción es un fenómeno superficial consistente en la retención de las moléculas de un fluido, constituyentes del denominado

adsorbato, sobre una superficie en contacto con él, que constituye el adsorbente. En general, se trata de un fenómeno dinámico en el que continuamente se produce el choque y retención de las moléculas del fluido sobre la superficie del adsorbente, y la liberación y retorno de dichas moléculas a la fase fluida. Es evidente, que la permanencia de las moléculas sobre la superficie del adsorbente determina en promedio, una concentración superficial mayor que la correspondiente a la fase fluida. Aunque la superficie interfacial pueda ser cualquiera, es habitual que la denominación de adsorción se restrinja al caso de una superficie adsorbente sólida, y un fluido portador del adsorbente gas o líquido (Orihuela, 2015).

#### **2.2.2.2. Metodología de circuito**

El circuito de elución recibe el carbón cargado frío para luego ser tratado en un circuito caliente. El equipo calentador, una caldera o un calentador eléctrico, calienta la solución a la temperatura de trabajo. La solución caliente los componentes del circuito y mantiene la temperatura de la columna de elución. La columna debe ser aislada para impedir pérdidas excesivas calor. Una vez que el circuito ha calentado, una serie de intercambiadores de calor transfieren calor a la solución de elución dejando la columna y calientan la solución de elución que ingresa a la columna. Las pérdidas de calor son altas, con ciclos frecuentes. El agua caliente o

calderas generadoras de vapor se usan comúnmente para proveer la energía necesaria para calentar la solución de elución (Avendaño, 2018).

#### **2.2.2.3. Carbón activado de residuos**

El carbón activado es una forma amorfa de carbón, en el que se ha desarrollado durante su fabricación y activación, un alto grado de porosidad y una elevada superficie específica. Comienza la reciente historia de la producción comercial de carbones activos, que cobra extraordinario auge durante la primera guerra mundial, debido a la necesidad de confeccionar caretas antiguas para la protección contra los tóxicos, particularmente el cloro, utilizando con fines bélicos (Orihuela, 2015).

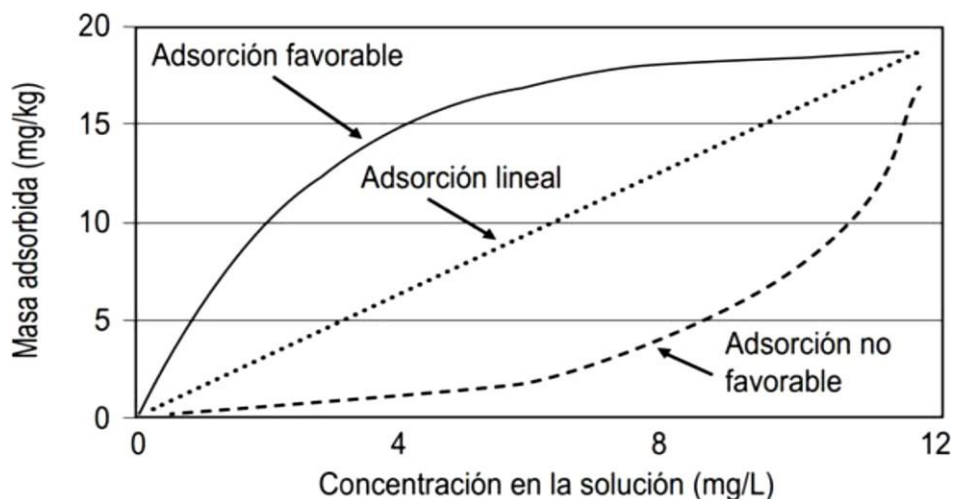
#### **2.2.2.4. Adsorción con carbón activado**

El equilibrio de adsorción se suele estudiar a través de las llamadas isotermas de adsorción, que representan la principal fuente de información en el proceso de adsorción (Ures, Jácome & Suarez, 2014).

La isoterma de adsorción representa la distribución del material adsorbido, entre la fase de adsorbente y la fase líquida en el equilibrio. Una isoterma es un sistema específico a una temperatura particular. La relación entre la cantidad adsorbida,  $q$ , y la concentración en el equilibrio en la fase líquida,  $S_e$ , a la temperatura,  $T$ , se acostumbra disponer como isoterma de adsorción a una temperatura  $T$  (Ures, et al., 2014).

**Figura 1**

*Representación de los tipos generales de isothermas de adsorción de solutos en medio poroso*



*Nota:* Tomado de *Adsorción en carbón activado (FT-TER-002)*, por Ures, Jácome y Suarez (2014), España.

La cantidad de material adsorbido por unidad de masa de adsorbente se incrementa al incrementar la concentración, pero no, en proporción directa. Generalmente, una isoterma es favorable si su forma es convexa, y desfavorable si es cóncava. Cualquier punto de una curva isoterma describe una cantidad de contaminante adsorbido por unidad de peso de carbón, o también, la capacidad de adsorción a una concentración particular (Ures, et al., 2014).

Filippín et al. (2017) Las isothermas de adsorción se describen de muchas formas matemáticas, algunas de las cuales están basadas en un perfil simplificado de adsorción, mientras que otras son puramente empíricas e intentan correlacionar los datos experimentales en ecuaciones simples (Ures, et al., 2014).

### **2.2.3. Recuperación de oro**

#### **2.2.3.1. Desorción del carbón activado**

El carbón cargado es tratado en la etapa de desorción para extraer los metales preciosos. Esta etapa de desorción tiene cuatro componentes principales: las columnas de elución de carbón; el equipo de concentración de metal; el equipo para manipular el carbón; y el equipo de calentamiento e intercambio de calor (Avendaño, 2018).

#### **2.2.3.2. Verificación del modelo con resultados experimentales**

El proceso de desorción es un fenómeno de transferencia de masa inverso a la adsorción. Es decir, la sustancia que ha sido adsorbida en el carbón es extraída por medio de una solución, que atraviesa el lecho de carbón cargado en un reactor especialmente para este proceso. Las propiedades del carbón activado sobre el oro en soluciones de cianuro son conocidas desde finales del siglo XIX, pero, su uso industrial estuvo restringido durante largo tiempo, a falta de un procedimiento eficiente de desorción o elución que permita recuperar oro y el carbón desorbido, debiendo recurrirse en el pasado a la calcinación. Esta desventaja junto a los avances técnicos alcanzados por la precipitación con zinc, disminuyeron el interés del carbón (Cárdenas, 2016).

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **Adsorción:** La adsorción es el proceso, por el cual, un átomo o una molécula de sustancia se adhiere en la superficie de un sólido o en la interface entre dos fluidos, debido a la presencia de fuerzas de atracción intermoleculares en sitios específicos del sólido denominados centros activos. El proceso contrario se denomina desorción (Cárdenas, 2016).
- **Carbón activado:** Tiene una estructura porosa, la cual, determina su capacidad de adsorción, tiene una estructura química que influencia su interacción con adsorbatos polares o no polares, tiene sitios activos en su estructura, etc. De esta manera, el carbón activado es un excelente y versátil adsorbente.
- **Desorción:** El carbón cargado es tratado en la etapa de desorción para extraer los metales preciosos. Esta etapa de desorción tiene cuatro componentes principales: las columnas de elución de carbón; el equipo de concentración de metal; el equipo para manipular el carbón; y el equipo de calentamiento e intercambio de calor (Avendaño, 2018).
- **Metodología:** Es la ciencia que nos enseña a dirigir determinado proceso de manera eficiente y eficaz para alcanzar los resultados deseados y tiene como objetivo darnos la estrategia a seguir en el proceso (Cortés e Iglesias, 2004).

- **Olivo:** El olivo es una especie perenne, subtropical, que exige climas templados-cálidos, con inviernos suaves y veranos largos, cálidos y secos. Prefiere temperaturas moderadas entre 10°C y 30°C, y si bien es capaz de soportar temperaturas del orden de los 40°C superando los 35°C la actividad vegetativa se detiene (Bueno y Oviedo, 2014).
- **Residuos olivícolas:** Son desechos vegetales generados en las actividades productivas olivícolas y oleícolas, considerados residuos.
- **Sistema:** Como definición de sistema se puede decir que es un conjunto de elementos con relaciones de interacción e interdependencia que le confieren entidad propia al formar un todo unificado (Jaramillo, 2007).
- **Minerales oxidados:** En un mineral oxidado, el material del mineral ha sido oxidado o erosionado, posiblemente en un área que es atípica de los yacimientos sulfuros primarios, y para los cuales se requiere algún tipo de procesamiento especial. La oxidación y otros procesos de alteración hidrotermal llevan a la descomposición de la estructura de la roca, lo que causa un aumento en la permeabilidad. Esto, usualmente permite que se obtengan altas extracciones por lixiviación mediante la lixiviación en pilas de una mineral directo de mina; aunque, el tamaño de las partículas de minerales puede ser muy grueso. Una característica perjudicial de la oxidación y alteración de la roca es la formación de

importantes cantidades de sílice hidratada, amorfa y/o pobremente cristalina, minerales de arcilla, sales de sulfato y fases ganga de óxido e hidróxido. Algunas de estas fases tienen solubilidad relativamente alta en con molienda y lixiviación con cianuro; y pueden servir como fuertes cianicidas (consumidores de cianuro), debido a la formación de áreas extremadamente grandes y de fresca superficie con un alto potencial de absorción. Otras fases, como los minerales de arcilla y sílice amorfa, pueden afectar el procesamiento en gran medida.

- **Mineral sulfurado:** Son los minerales constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, y zinc, entre otros. Los minerales sulfurados de cobre más comunes son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). Un subproducto importante de estos yacimientos es el molibdeno, que está en la forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).
- **Granulometría:** Tamaño de las partículas del mineral utilizado en la lixiviación. Esta práctica mantiene en recirculación las partículas de oro más pesadas a la molienda hasta que ellos sean pequeñas o lo suficientemente delgadas para rebozar el clasificador en el circuito de cianuración.

- **Lixiviación:** Es un proceso, por el cual, se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.
- **Cianuración:** Técnica metalúrgica para la extracción de oro de mineral baja calidad, que busca convertir el oro (insoluble en agua) en aniones metálicos complejos de aurocianida, solubles en agua.
- **Cianuro de sodio:** El cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ) es la sal sódica del ácido cianhídrico ( $\text{HCN}$ ). Se trata de un compuesto sólido e incoloro que hidroliza fácilmente en presencia de agua y óxido de carbono (IV) para dar carbonato de sodio y ácido cianhídrico.
- **Precipitación:** Método para la recuperación del oro consiste en la adición del zinc en una ratio de 5 y 30 veces el requerimiento estequiométrico de los metales preciosos en función de la composición de la solución y la eficiencia operativa. Por ejemplo, una solución que contiene 5 g/t de oro requeriría una tasa de adición de zinc de 17 g/t en solución, con 10 veces el requerimiento estequiométrico. El polvo de zinc (malla 600), se puede agregar directamente a la solución preñada (solución rica), o puede ser premezclada con una solución de cianuro, para preparar la superficie del zinc, se agregará como un lodo.

- **Relaves:** Los relaves son desechos de mineral con baja ley o bien subproductos tóxicos de procesos mineros, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en «tranques o pozas de relaves» donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada o evaporada.

**Cinética de disolución:** El tiempo en el cual se realiza la reacción, es en gran parte, el de menor velocidad (llamada entonces etapa controlante) es importante identificarla para incrementar su rapidez. Una reacción fisicoquímica en el que se halla involucrada una fase sólida y otra líquida que se consume en las etapas siguientes:

- Difusión de los reactantes desde la solución hasta la interfase sólida y líquido.
- Adsorción de los reactantes en la superficie del sólido.
- Reacción en la superficie.
- Desorción de los productos de la reacción de la superficie del sólido.
- Difusión de estos productos de la interfase sólido – líquido a la solución (Habashi, F. 1970).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

El término experimento tiene al menos dos acepciones, una general y otra particular. La general se refiere a “elegir o realizar una acción” y después observar las consecuencias. Este uso del término es bastante coloquial; así, hablamos de “experimentar” cuando mezclamos sustancias químicas y vemos la reacción provocada observamos el efecto que causa. La esencia de esta concepción de experimento es que requiere la manipulación intencional de una acción para analizar sus posibles resultados (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

El diseño para el presente trabajo de investigación, por sus características de estudio será experimental. Este tipo de estudio consiste en manipular propiedades físicas y químicas de las variables de investigación para determinar resultados en el laboratorio.

La investigación experimental es un tipo de investigación cuantitativa. Tres elementos científicos caracterizan a este tipo de investigación: control, manipulación y observación (Hernández et al., 2014).

## **3.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y MATERIAL DE ESTUDIO**

### **3.2.1. Población**

La población se dividirá en dos partes, los recursos minerales y los recursos correspondiente a los residuos de olivo de la región de Tacna.

### **3.2.2. Muestra**

Las muestras para la investigación, evaluación y análisis de datos correspondientes a los residuos de olivo fueron obtenidas de 5 puntos distintos, Yarada (02), Los Palos (02) y 01 muestra Pachía, correspondiente a los residuos de olivo, para su evaluación y análisis de datos, acopiándose un total de 5 kilogramos de residuos de olivo

Las muestras de los minerales auríferos fueron ofrecidas por pequeñas empresas mineras de Palca, una cantidad aleatoria de 4 kilogramos, con la finalidad de cuantificar la recuperación de oro a través de la adsorción con carbón activado a base de residuos de olivos.

### **3.2.3. Material de estudio**

Los recursos utilizados serán aquellos que involucren los procesos y procedimientos para la adsorción en columnas de carbón activado para la recuperación de oro.

**Figura 2**

*Muestra del mineral aurífero utilizado para las pruebas*



### 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La operacionalización de las variables se muestra en la siguiente Tabla:

**Tabla 1**

*Parámetros de operacionalización*

<b>VARIABLE</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>ESCALA</b>
Variable Independiente (x): Sistema de adsorción con columnas de carbón activado	1. Sistema de adsorción 2. Metodología de circuito 3. Carbón activado de residuos de olivo	Ordinal
Variable dependiente (y): "Sistema de adsorción con columnas de carbón activado"	4. Adsorción con carbón activado de olivo 5. Desorción del carbón activado de olivo 6. Verificación del modelo con resultados experimentales	Ordinal

### **3.4. MÉTODO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS**

La metodología, técnica e instrumentos para la recolección de los datos y su procesamiento se realizará tomando los siguientes parámetros:

#### **3.4.1. Método**

El método que se utilizó para el desarrollo de las pruebas fue mediante la adsorción en columnas de carbón activado para la recuperación de oro a nivel de laboratorio, se realizaron cumpliendo el procedimiento adecuado.

#### **3.4.2. Técnica**

La técnica que se aplicó fue una técnica experimental - directa, debido a que las acciones y actividades para la ejecución del proyecto se desarrolló en tres etapas; i) Obtención de las propiedades físicas y químicas del mineral, ii) cálculo y dimensionamiento, iii) diseño de equipos.

#### **3.4.3. Materiales, equipos, reactivos e instrumento**

Para la ejecución y puesta en marcha del proyecto de investigación se utilizaron los siguientes materiales, equipos, reactivos e instrumento de acuerdo a la operacionalización de las variables, anotando recursos necesarios:

### **a) Materiales**

- $\text{H}_3\text{PO}_4$  al 85%
- $\text{AgNO}_3$  P.A.
- $\text{NaCN}$  al 98%
- $\text{NaOH}$  al 98
- Litargirio
- Bórax muleTeam
- Sílice
- Ácido nítrico Q.P.
- Ácido clorhídrico Q.P.
- Acetato de plomo Q.P.
- Polvo de zinc
- Harina
- Cloruro de sodio (sal)

### **b) Instrumentos**

- Mufla eléctrica de tundición Ceramics USA
- Planchas de calentamiento Thermolyne
- Balanza analítica Mettler Toledo
- Balanza analítica de platillo, marca Ohaus
- Micro balanza.
- Pares de guantes de jebe (un par de manga larga y otro manga corta)

- Crisoles de porcelana
- Crisoles de arcilla
- Es-codificadores
- Espátulas de acero inoxidable de 150 mm
- Pinza con punta curva de acero inoxidable
- Embudos de vidrio
- Vaso de precipitación de 600 ml, marca Duran
- Estufa
- Agitador magnético
- Mallas de taces nro. 80
- Probeta de 20 ml

### **3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

#### **3.5.1. Procedimiento experimental**

El procedimiento para el tratamiento de datos se inició con la definición de los 5 puntos de recojo de muestras para ser procesadas. El procedimiento para la investigación en términos generales se terminó con el sistema de adsorción en columnas de carbón activado de residuos de olivo, donde el agua es bombeada dentro de una columna que contiene el carbón activo, esta agua deja la columna a través de un sistema de drenaje. La actividad del carbón activo de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias.

El agua pasa a través de la columna, produciendo una acumulación de sustancias en el filtro. Por esta razón, éste necesita ser sustituido periódicamente. Una parte pequeña del carbón activo se destruye durante el proceso de la regeneración y debe ser sustituida. Mediante dicho proceso se determinará las características físicas y químicas de acuerdo a las variables de la investigación.

### **3.5.2. Análisis de datos**

El análisis de datos se realizó mediante Statgraphics Centurion, potente herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, para los cálculos y balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación realizadas.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

#### **4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESULTADOS**

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos, tras el tratamiento y análisis de las variables de investigación, donde se observará la caracterización del carbón activado de residuos olivícolas, para la recuperación del oro, a través de la Tabla 7, con los siguientes resultados:

#### **4.2. SISTEMA DE ADSORCIÓN CON COLUMNAS DE CARBÓN**

##### **4.2.1. Sistema de adsorción**

Para el desarrollo de la investigación y determinar el sistema de adsorción, la metodología de circuito de adsorción, características y estructura del carbón activado de residuos de olivo, y la capacidad de adsorción con el carbón activado a base de residuos de olivo.

##### **4.2.1.1. Diseño experimental**

Para el desarrollo de un diseño factorial  $2^3$ , se considera como máximo tres factores, dos niveles para cada uno, conteniendo 8 combinaciones factores, las combinaciones se efectúan principales ( $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ ), 2 interacciones de dos factores ( $X_1X_2$  y  $X_1X_3$ ) y 1 interacción de tres factores ( $X_1X_2X_3$ ); asimismo, existe intersecciones y/o réplicas en el punto promedio.

La elaboración de una ecuación estadística y solución matemática, nos permite controlar la solución del oro en función con las variables, para efectos de la presente investigación se elaboró un Diseño Factorial 2' donde "n" es igual a 3 variables independientes y "2" significa 2 niveles mínimo y máximo. En el proceso de adsorción de oro en el carbón activado se ha considerado las siguientes variables independientes:

- a. Carbón activado
- b. Tiempo
- c. Temperatura

**Tabla 2**

*Niveles de las variables*

<b>Código</b>	<b>Factor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>
<b>A</b>	Cantidad de carbón	g	0,9	1,3	1.1
<b>B</b>	Tiempo	Min	50	450	250
<b>C</b>	Temperatura	°C	18°	28°	23°

*Nota:* Resultados basados en el análisis de laboratorio

**Tabla 3**

*Matriz factorial*

<b>N°</b>	<b>A (Carbón activado en gramos)</b>	<b>B (Tiempo en minutos)</b>	<b>C (Temperatura)</b>	<b>Y (% adsorción)</b>
<b>1</b>	0,9	50	18	Y1
<b>2</b>	1,3	50	18	Y2
<b>3</b>	0,9	450	18	Y3
<b>4</b>	1,3	450	18	Y4
<b>5</b>	0,9	50	28	Y5
<b>6</b>	1,3	50	28	Y6
<b>7</b>	0,9	450	28	Y7
<b>8</b>	1,3	450	28	Y8
<b>9</b>	1,1	250	23	Y9
<b>10</b>	1,1	250	23	Y10
<b>11</b>	1.1	250	23	Y11

*Nota:* Resultados basados en el análisis de laboratorio

#### 4.2.1.2. Modelo matemático

En el presente punto de la investigación se desarrolla el comportamiento de las columnas de adsorción y la simulación a nivel de laboratorio, el funcionamiento, el proceso de pruebas se realizará en dos fases: fase líquida y la fase sólida, cada fase contará con diferente ecuación.

##### a) Efectos estimados para la adsorción de oro (%)

Para el desarrollo y el moldeo matemático el proceso de adsorción se analizará, con la finalidad de determinar la eficiencia de un sistema de adsorción con carbón activado de residuos de olivo que se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4**  
*Efecto de estimación de adsorción de oro*

<b>Efecto</b>	<b>Estimado (%)</b>	<b>Error Estandar (%)</b>	<b>V.I.F.</b>
A: Carbón activado	9,128	1,28512	1,0
B: Tiempo	25,512	1,28512	1,0
C: Temperatura	0,314	1,28512	1,0
AB	-1,728	1,28512	1,0
AC	-0,013	1,28512	1,0
BC	-0,095	1,28512	1,0
Promedio	87,575	0,534788	1,0

En la tabla 4 se muestra los efectos y combinaciones de variables; asimismo, los efectos estimados de la interacción. Siendo la muestra el porcentaje del error estándar para cada factor interviniente, que mide el

error de muestreo. Finalmente, se puede apreciar que el Factor Inflación de Varianza (VIF) es igual a 1,0, donde el planteamiento de un diseño perfectamente ortogonal los factores deben ser iguales a 1,0.

**b) Coeficiente de regresión para adsorción de oro**

Para el modelo matemático se tiene la siguiente regresión de adsorción de oro:

**Tabla 5**  
*Coeficiente de regresión para la adsorción de oro*

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	55,4827
A: Carbón activado	25,9846
B: Tiempo	0,19785
C: Temperatura	0,0858755
AB	-0,0684444
AC	-0,0709842
BC	-0,000075478

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de adsorción de oro} = & 55,4827 + 25,9846 * \text{Carbón activado} + \\ & 0,19785 * \text{tiempo} + 0,0858755 * \text{Temperatura} - 0,0684444 * \text{Carbón} \\ & \text{activado} * \text{tiempo} - 0,0709842 * \text{Carbón activado} * \text{Temperatura} - \\ & 0,000075478 * \text{tiempo} * \text{Temperatura}. \end{aligned}$$

### c) Optimización de adsorción de oro

El objetivo de la optimización es maximizar el porcentaje de adsorción del oro en el proceso de muestreo, considerando los diferentes factores, para lo cual, se plantea un valor óptimo de 97,931%.

**Tabla 6**  
*Adsorción de oro estimado*

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Carbón activado (g)	0,9	1,3	1,1
Tiempo (min)	50,0	450,0	250,0
Temperatura (°C)	18,0	28,0	23,0

En la Tabla 6, se puede observar la combinación de los factores que maximiza la adsorción de oro; asimismo, se aprecia los valores óptimos que se debe alcanzar para recibir mayor beneficio de adsorción, con la optimización de la adsorción se puede alcanzar a un porcentaje de 97,931%, así también, se observa las muestras de las variables óptimas de carbón activado, tiempo y temperatura de adsorción.

#### 4.2.2. Metodología de circuito

##### 4.2.2.1. Carbón activado de residuos de olivo

Las columnas de adsorción tienen el objetivo de lograr una recuperación de los valores de oro disueltos en la solución de cianuro en las cantidades acordes al diseño experimental. La solución resultante del despojo se

conduce al área de refinería, donde se encuentran las celdas electrolíticas en las cuales se deposita el oro.

#### **4.2.2.2. Reactivación del carbón activado de residuos de olivo**

Al carbón descargado se le realiza un proceso de reactivación que consiste en someterlo a una etapa de reactivación en un horno, elevando su temperatura entre los 600°C y los 700°C durante un recorrido de una hora, en una atmósfera pobre en oxígeno a fin de eliminar las materias orgánicas contaminantes sin producir combustión.

#### **4.2.2.3. Trayectoria de la solución para la adsorción**

La técnica utilizada para el proceso de circuito de lixiviación será Carbón en Pulpa (CIP), que es aplicada a pulpas salientes de cianuración por agitación, su procesamiento es para la separación del sólido/líquido, en tanques separados en varias etapas.

En los procedimientos llevados a cabo en Planta ADR intervienen ciertos compuestos principales para cada etapa. El agente lixivante en este caso, es el cianuro de sodio por sus características ideales y afinidad hacia el oro y la plata. El ácido clorhídrico es el reactivo utilizado para realizar el lavado del carbón previo a la desorción.

El hidróxido de sodio tiene dos importantes funciones en el proceso, las cuales son regular el pH de la solución y la desorción del oro y la plata de los sitios activos del carbón.

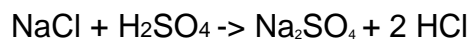
#### **4.2.2.4. Preparación y uso de cianuro de sodio**

El cianuro es la sustancia química determinada para la recuperación de oro, porque es uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en agua. Es una sustancia química industrial común que se consigue fácilmente. Por razones técnicas y económicas, el cianuro es la sustancia química elegida para la recuperación del oro del mineral. Las operaciones mineras para la extracción de oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio, típicamente entre 0,01% y 0,05% de cianuro (100 a 500 ppm).

#### **4.2.2.5. Preparación y uso del ácido clorhídrico**

El ácido clorhídrico es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno (HCl). Esta disolución resulta un líquido transparente o ligeramente amarillo que en estado concentrado produce emanaciones de cloruro de hidrógeno, las que combinadas con el vapor de agua del aire son muy cáusticas y corrosivas de color blanquecino y muy irritante a las vías respiratorias. El ácido clorhídrico reacciona con los metales activos o sus sales de ácidos más débiles para formar cloruros. Casi todos los cloruros son solubles en agua, por eso el ácido clorhídrico encuentra aplicación como eliminador de los sedimentos, carbonatos de calcio, magnesio, hierro.

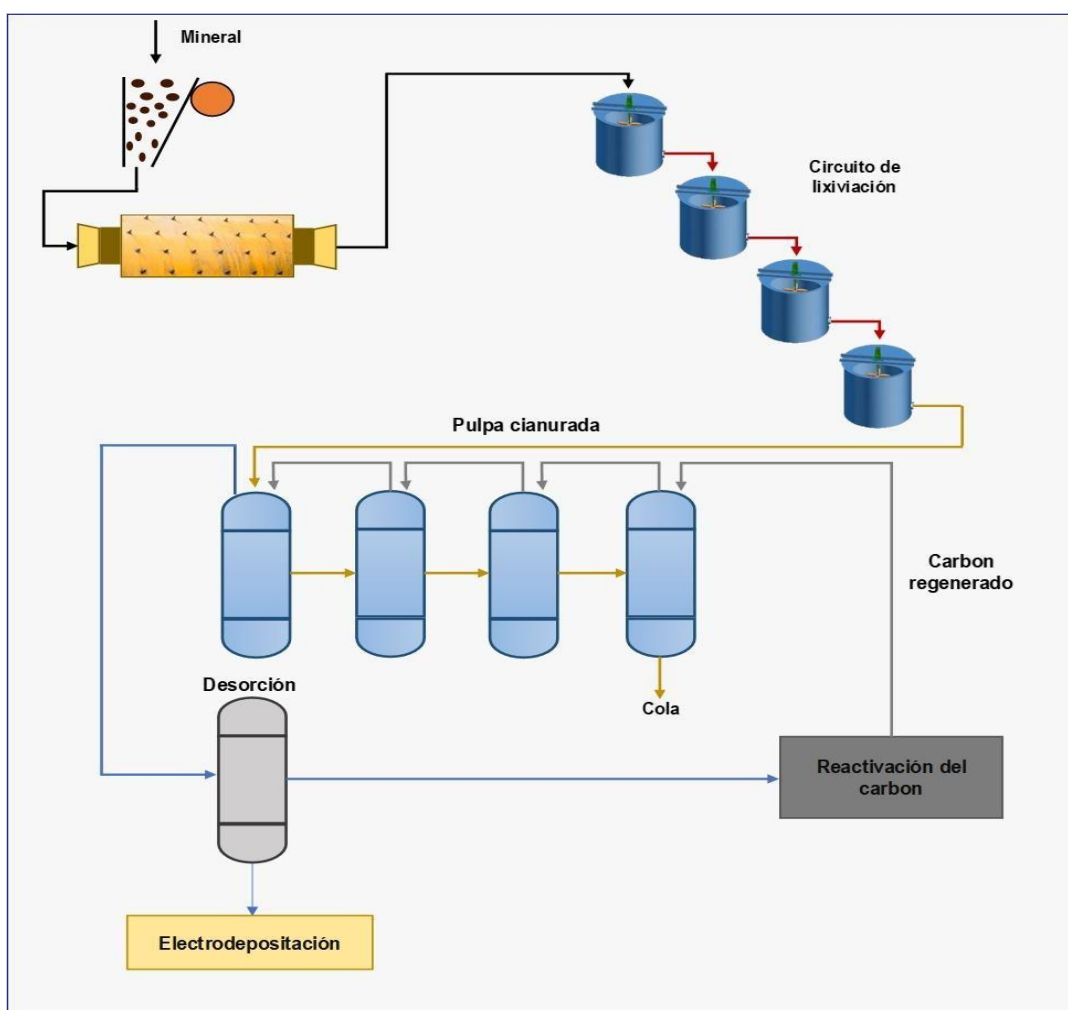
Puede obtenerse haciendo reaccionar ácido sulfúrico con sal común (cloruro de sodio) según la ecuación:



[1]

Durante la reacción se forma el ácido y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Industrialmente se producen grandes cantidades de ácido clorhídrico haciendo reaccionar el cloro y el hidrógeno, procedentes de la celda electrolítica de cloruro de sodio, utilizada para la producción de sosa caustica.

**Figura 3**  
*Circuito de adsorción de carbón activado*



#### **4.2.2.6. Estructura y caracterización**

##### **Elaboración del carbón activado**

La elaboración del carbón activado a base de los residuos olivícolas, es todo aquel derivado no utilizado de olivo, considerados como residuos olivícolas, dichos residuos (hueso de aceituna, troncos de olivo, ramas de olivo, raíces de olivo) son secadas para su posterior selección de acuerdo a los tamaños tamizados en una malla número 79 con una abertura de 0,162mm). De acuerdo al pesado de las muestras, en seguida, se desarrolla la impregnación con soluciones al 87% de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) a una temperatura ambiente por 24 horas. Post impregnación, las soluciones fueron filtradas para remover el ácido residual. Posteriormente, las muestras impregnadas se secaron a temperatura ambiente por 2 días, en la etapa de carbonización se colocan las muestras en crisoles herméticos. En la carbonización se incrementa progresivamente de menor a mayor la temperatura con una constancia de calentamiento de 90 °C/min hasta llegar a los 540 °C donde se mantendrá la temperatura constante en un tiempo de 40 minutos. En seguida, se extrajo la mufla con las muestras, dejando enfriar en un desecador. El material (las muestras) activado es sumergido en agua destilada caliente hasta obtener un valor de *pH* entre 6 y 8, con el objetivo de remover los elementos químicos impregnados. El proceso de secado de las muestras realizadas a 90 °C por 2,5 horas, y es enfriado en un desecador hasta obtener un peso constante, finalmente,

todas las muestras son almacenadas en envases de laboratorio.

#### **a. Cenizas y/o material volátil**

Un crisol fue precalentado en un horno a 500°C, enfriado en un desecador y pesado. 1 g de muestras de carbón activado fueron transferidos en los crisoles y pesados de nuevo. Los crisoles que contenían las muestras fueron colocados en un horno a una temperatura de 500°C por un tiempo de 3 horas. En seguida, los crisoles se retiraron del horno y enfriaron en un desecador a temperatura ambiente y pesados nuevamente. El contenido de ceniza fue calculado usando la ecuación (Ekpete y Horsfall, 2011).

$$\%Ceniza = \frac{\text{Peso de ceniza (g)}}{\text{Peso de muestra seca (g)}} \times 100 \quad [2]$$

De la misma forma, la materia volátil se halló mediante la ecuación (Ekpete y Horsfall, 2011).

$$\% \text{ material volátil} = \frac{\text{Peso de componentes volátiles (g)}}{\text{Peso de muestra seca (g)}} \times 100 \quad [3]$$

#### **b. Humedad**

Según Ekpete y Horsfall (2011), el método de secado térmico fue utilizado en la determinación del contenido de humedad de la muestra. 1 g de carbón activado seco, fueron pesados y colocados en crisoles lavados, secados y pesados. Los crisoles fueron colocados en una estufa y secados a 105°C hasta pesarlos en forma constante por 4 horas. El porcentaje de humedad contenido fue calculado de la siguiente forma:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso en secado (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100 \quad [4]$$

### c. Carbón fijo

Para hallar el porcentaje de carbón fijo se utilizó la determinación mediante el ASTM D-1762.

$$\% \text{ Carbón} = 100 - \% \text{ Materia volátil} - \% \text{ Ceniza} \quad [5]$$

### d. Densidad aparente

La densidad aparente del material fue obtenida pesando 5 g del carbón activado y transfiriendo en probeta graduada de 10 mL. La probeta fue apisonada con una almohadilla de goma mientras que el carbón activado era agregado hasta que la muestra original entera fue transferida a la probeta. El apisonamiento se continuó por 5 minutos. La densidad fue calculada mediante la ecuación (Al-Qodah y Shawabkan, 2018).

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso de la muestra (g)}}{\text{Volumen de la muestra (g)}} \quad [6]$$

### e. pH

1 g de carbón activado fue pesado y transferido en un matraz. 100 mL de agua destilada fue medido y añadido y agitado por una hora. Las muestras se estabilizaron antes de que el *pH* fuera medido usando un pHmetro.

### Análisis de la caracterización del carbón activado

Mediante la aplicación de la recolección de datos se obtiene los siguientes resultados:

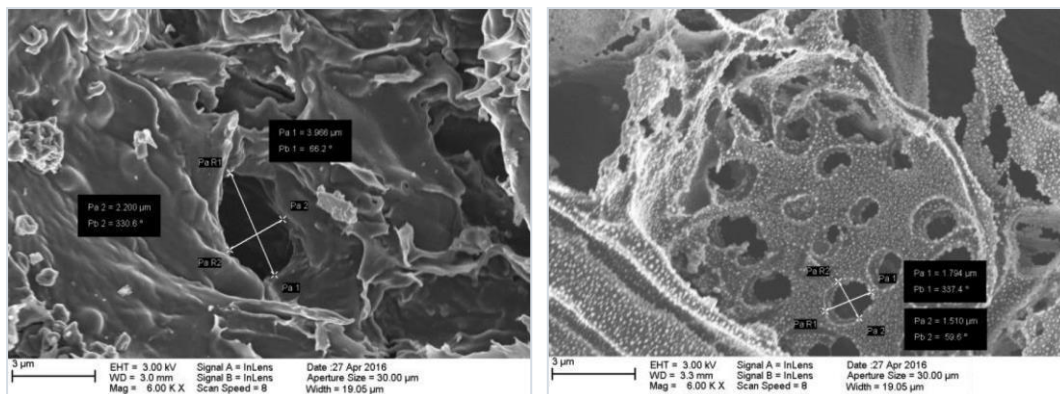
**Tabla 7***Caracterización del carbón activado*

Porcentaje de materia volátil	Porcentaje de humedad	Porcentaje de ceniza	Porcentaje de carbón fijo	$\rho$ Aparente ( $g/cm^2$ )	pH
6,35	7,52	8,95	71,84	0,38	4,96

En la tabla 7, se puede observar los resultados obtenidos del análisis sobre la estructura física del carbón activado a base de residuos olivícolas para la recuperación de oro, donde se puede resaltar que se tiene un 71,84% de carbón fijo, con una densidad de 0,38 G/cm<sup>2</sup>

Los resultados de porcentajes de ceniza fue 8,95%, dicho resultado es mayor al reportado por Yampasi (2017) para el carbón activado de tallos y hojas de cañihua, cuyo valor fue 8,31%. Las cenizas constituyen un residuo inorgánico, dicho valor indica la cantidad de minerales presentes en el carbón activado. El alto contenido de ceniza en el carbón activado de residuos de olivo es indeseable porque disminuye la fuerza mecánica.

Al realizar los análisis de valores de superficie específica se destacan 2 valores (hueso y madera de aceituna) procesando con dióxido de carbono a 900° y 790° durante 60 min, respectivamente.



#### **4.2.3. Adsorción con carbón activado de olivo**

El oro disuelto en una solución cianurada, la mejor manera de recuperarlo es mediante el uso de carbón activado, que es una alternativa viable al uso de cinc. El proceso de recuperación de oro por medio de carbón activado de residuos olivícolas se lleva a cabo de la siguiente manera:

- f.** El carbón activado de residuos olivícolas es colocado en un cilindro pequeño, la solución cianurada pasará a través del carbón activado.
- g.** Cuando la solución cianurada pasa a través del lecho del carbón activado de residuos olivícolas el oro queda atrapado en los microporos.
- h.** La solución cianurada es retirada completamente libre de oro.
- i.** Se realiza un paso de desorción, es decir, el carbón activado de residuos olivícolas que llevara a cabo la adsorción del oro es despojado del mismo para su recuperación.
- j.** El oro aislado se puede reutilizar, al igual que el carbón que es reactivado para un siguiente proceso de recuperación de oro, incluso se puede utilizar en procesos diferentes, tales como la filtración de agua, según sea el caso.

**Tabla 8**  
*Niveles de análisis*

<b>Código</b>	<b>Factor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>
A	Cantidad de carbón	g	0,9	1,3	1,1
B	Tiempo	Min	50	450	250,0
C	Temperatura	°C	18	28	23,0

*Nota:* Resultados basados en el análisis de adsorción de oro

### **Operacionalización**

**Tabla 9**  
*Condiciones*

<b>Condición</b>	<b>Datos</b>
Cantidad de carbón activado	0,9 – 1,4
Ley de oro	0.140 mg/l
Granulometría	Malla – 80
Carbón activado obtenido	Residuos de olivo
Volumen de solución cianurada	550ml
pH	12,5

*Nota:* Resultados basados en el análisis de adsorción de oro

#### 4.2.4. Porcentaje de adsorción

Tabla 10

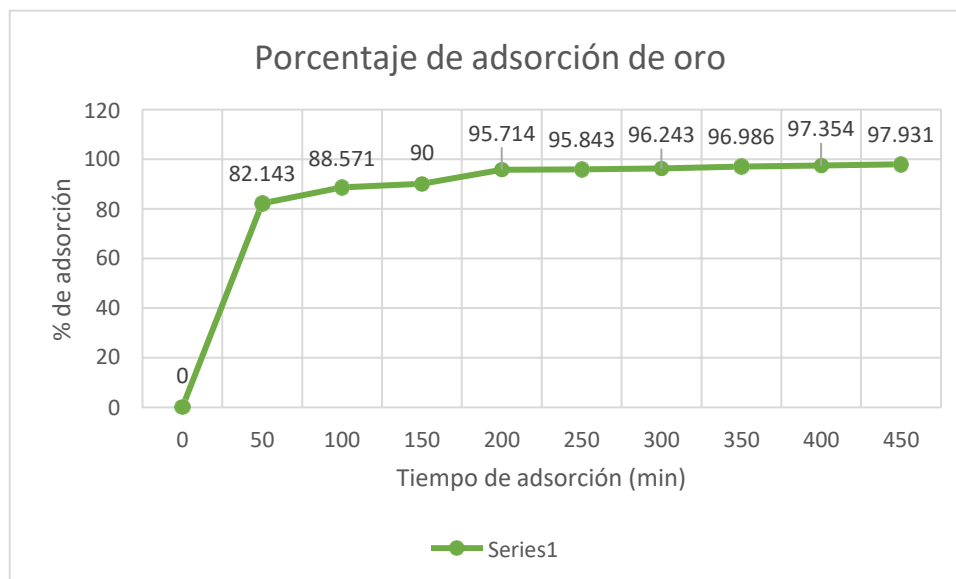
Porcentaje de adsorción de oro

Tiempo (min)	mg/l de Au	% adsorción de Au
0	7.000	0.000
50	1.250	82.143
100	0.800	88.571
150	0.700	90.000
200	0.400	95.714
250	0.350	95.843
300	0.243	96.243
350	0.180	96.986
400	0.135	97.354
450	0.113	97.931

Nota: Resultados basados en el análisis de adsorción de oro

Figura 4

Análisis del % de adsorción de oro



En la Figura 4 respecto al análisis de ensayos de adsorción de oro a diferentes tiempos de acuerdo al diseño de adsorción, en el cual, se puede observar que a 450 min se logra alcanzar la adsorción de oro al 97,93%. También cabe resaltar que en 50 minutos logra una adsorción de 82,14%, esto

nos indica que la cinética de reacción es rápida en los primeros minutos.

### **4.3. RECUPERACIÓN DE ORO**

#### **4.3.1. Desorción del carbón activado de olivo**

Los resultados de la prueba en laboratorio nos muestran el comportamiento de la lixiviación que ocurre por la mezcla de la disolución de las partículas superficiales y la difusión donde se puede ver que el contenido de oro en la solución se está reduciendo, y finalmente la lixiviación que ocurre por difusión, donde el oro que está en el interior del mineral tiene que migrar hacia la superficie, caracterizándose por el poco contenido de oro en la solución.

La lixiviación se desarrolló en dos partes primero con 50ppm de cianuro libre y después con 30ppm, la recuperación promedio de 95,84% de acuerdo a la tabla. Pudiéndose optimizar en el proceso de adsorción a un 97,93%.

#### **4.3.2. Verificación del modelo con resultados experimentales**

**Tabla 11**

*Verificación del modelo con resultados experimentales*

<b>Tipo de carbón activado</b>	<b>% de Adsorción de oro</b>
• Carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco.	98% a 99%
• Carbón activado obtenido a partir de residuos olivícolas.	97,93%

La Tabla 11 nos muestra los resultados de adsorción de oro utilizando dos tipos de carbones activados. Yampasi (2017) la adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco tiene la capacidad de adsorción del 97 a 99%. De acuerdo a los resultados obtenidos utilizando carbón activado obtenido a partir de residuos olivícolas alcanza una adsorción del 97,93%. Por lo tanto, son comparables los resultados de adsorción en oro.

## CONCLUSIONES

El tiempo óptimo fue 450 minutos logrando la absorción de 97,931% de residuos olivícolas obteniendo en laboratorio.

Con los parámetros metodológicos, técnicos, materiales, equipos, reactivos e instrumentos adecuados, se estableció un buen desempeño del sistema de adsorción con carbón activado a base de residuos olivícolas, con el diseño experimental aplicado mediante factores de análisis y el modelo matemático, se obtuvo un resultado de adsorción muy similar al carbón industrial a base de cáscara de coco teniendo un valor de 98% de adsorción.

Mediante la investigación se estableció las características del carbón activado de residuos olivícolas, de acuerdo a los resultados obtenidos la composición del carbón activado de residuos olivícolas es; humedad corresponde el 7,52%, la ceniza y material volátil de 3,95%, la densidad aparente de 0,38% y el carbón fijo de un 71,84%, la determinación de las características del carbón activado a base de residuos olivícolas, dichos datos se pueden apreciar en la Tabla 7.

De acuerdo a los análisis de laboratorio tanto en lixiviación y adsorción se pudo determinar que se tiene una capacidad de desorción de 97,93% de recuperación de oro, determinando la eficiencia de desorción del carbón activado de residuos de olivo mediante la metodología empleada y los modelos matemáticos.

Al establecer los parámetros de diseño para mejorar la recuperación de oro mediante la adsorción con carbón activado a base de residuos olivícolas, se identificó que la recuperación del carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco tiene un porcentaje promedio de 98%, sin embargo, con el carbón activado a base de residuos de olivo se tiene una calidad similar

## RECOMENDACIONES

Sería importante que, mediante el presente sistema de adsorción, se pueda generar una planta piloto para producir carbón activado a base de residuos olivícolas puesto que tiene altas propiedades de adsorción siendo un producto eficiente, de esta manera se podría fortalecer la economía local.

Siendo alta la capacidad de adsorción del carbón activado a base de residuos olivícolas, sería pertinente, el desarrollo de investigaciones que fortalezcan el presente estudio, debido a que la región de Tacna tiene alta producción de olivo, se reitera que el carbón activado en base a dicho producto, tiene un gran potencial de adsorción.

Los parámetros y metodología planteados en la presente investigación, deben ser tomados en cuenta, a fin de ser mejorados y poner en marcha su ejecución, contando con el apoyo de la inversión privada y pública.

Considerar los datos vertidos en cuanto a las características y datos hallados en la investigación para el uso adecuado del carbón activado a base de residuos de olivo, de manera que, se pueda recuperar el carbón fijo, mejorar la densidad para obtener mayor beneficio y mejorar la capacidad de adsorción.

Desarrollar diferentes técnicas de desorción para determinar una técnica adecuada beneficiando el uso de dicho producto en la región de Tacna.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alguacil, F. J. (1995). El refinado del oro. *Revista Metalurgia*, 182-191.
- Al-Qodah, Z. y Shawabkiah, R. (2018, 01 de febrero). *Production and characterization of granular activated carbon from activated sludge. Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 26, 10.*  
[https://www.researchgate.net/profile/Zakaria-Al-Qodah/publication/235176988\\_PRODUCTION\\_AND\\_CHARACTERIZATION\\_OFGRANULAR\\_ACTIVATED\\_CARBON\\_FROMACTIVATED\\_SLUDGE/links/004635165841750030000000/PRODUCTION-AND-COMPARISON-OF-GRANULAR-ACTIVATED-CARBON-FROM-A](https://www.researchgate.net/profile/Zakaria-Al-Qodah/publication/235176988_PRODUCTION_AND_CHARACTERIZATION_OFGRANULAR_ACTIVATED_CARBON_FROMACTIVATED_SLUDGE/links/004635165841750030000000/PRODUCTION-AND-COMPARISON-OF-GRANULAR-ACTIVATED-CARBON-FROM-A)
- ANA, A. N. (2018, noviembre). Buenas prácticas para proteger la calidad de las fuentes de agua. *Protección*, 4(5), p. 40.  
<file:///C:/Users/Eva/Downloads/ANA0001737.pdf>
- Asalde Horna, R. M. (2010). *Optimización de un Proceso de Recuperación de Oro mediante carbón activado*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.
- Avendaño Chura, M. (2018). *Diseño del circuito de desorción para tratar 200 kilos de carbón activado* [Tesis de pregrado Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna].  
<http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3188>

- Barazorda Cuellar, K. R. y Lima Condori, E. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña* [Tesis de pregrado Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco].
- Bueno, L. A. y Oviedo, A. S. (2014). *Plantación del Olivo*. San Juan, Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Cárdenas Oré, G. A. (2016). *Diseño evaluativo y balance del proceso de desorción de oro en carbón activado y su reactivación en la U.M. Antonio Raymondi* [Tesis de pregrado Universidad Nacional San Agustín, Arequipa].
- Cárdenas Oré, G. A. y Espinel Maque, H. (2016). *Diseño evaluativo y balance del proceso de desorción de oro en carbón activado y su reactivación en la U.M. Antonio Raymondi*. [Tesis de pregrado Universidad Nacional San Agustín, Arequipa].
- Cortés Cortés, M. E. y Iglesias León, M. (2004). *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Universidad Autónoma del Carmen. México. U.A. Carmen (Ed.).
- De la Torre, E. y Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro*. Quito.
- Díaz, X. y Guevara, A. (2002). *Taller de cianuración, una alternativa a la amalgamación*. Quito.
- Ekpete, O. y Horsfall, J. (2011, 17 de junio). *Preparation and*

*Characterization of Activated Carbon derived from Fluted Pumpkin Stem Waste (Telfairia occidentalis Hook F).* Research Journal of Chemical Sciences, 1, 9.

[https://www.researchgate.net/profile/Ozioma-Ekpete/publication/262834592\\_preparation\\_and\\_characterization\\_of\\_activated\\_carbon\\_derived\\_from\\_fluted\\_pumpkin\\_stem\\_wastetelfairia\\_occidentalis\\_hook\\_f/links/00b7d538f5876b55aa000000/preparation-and-characterization](https://www.researchgate.net/profile/Ozioma-Ekpete/publication/262834592_preparation_and_characterization_of_activated_carbon_derived_from_fluted_pumpkin_stem_wastetelfairia_occidentalis_hook_f/links/00b7d538f5876b55aa000000/preparation-and-characterization)

Gasca Torres, J. A. (2016). *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados.* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. San Luis de Potosí. México.

Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Habashi, F. (1999). *Textbook of Hydrometallurgy.* Canada: Quebec.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación (Sexta Edición ed.).* Ed. Mc Graw Hill. México.

Jaramillo, O. (2007, 03 de mayo). *OJS Termodinámica.* Recuperado de <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/node9.html>

Lázaro Yachachin, E. M. (2006). *Implementación de una planta de desorción a presión de carbón activado y electrodeposición de oro de 6 toneladas* [Tesis de pregrado Universidad Nacional de Ingeniería, Lima].

León, B. R. (2017). *“Eficiencia del método ecológico sin mercurio respecto*

*al tradicional con mercurio en la extracción de oro en minería artesanal en Ollachea – Puno.* [Tesis de pregrado Universidad Nacional del Altiplano, Puno].

[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6409/Le%C3%B3n\\_Banegas\\_Ruth%20\\_Gabriela.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6409/Le%C3%B3n_Banegas_Ruth%20_Gabriela.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Lovera Dávila, D. F. (1999). *Investigaciones hidrometalúrgicas de tecnologías limpias.* Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, VII (03).

[https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02\\_n3/investigaciones.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02_n3/investigaciones.htm)

Marsden, J. y House, L. (1992). *The chemistry of gold extraction.* Interdisciplinary Science Reviews.

Misari, C. F. (2010). *Metalurgia del oro.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima.

Misari, F. S. (1993). *Metalurgia del oro.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima.

Orihuela Iranzo, E. (2015). *Adsorción de disolución acuosas: isothermas de adsorción y coeficientes de difusión.* Universitas Complutensis Matritensis. Madrid.

<https://eprints.ucm.es/id/eprint/52719/1/5309859314.pdf>

Paz Rubio, J. A. (1998). *Estudio de la implementación de adsorción en carbón en pulpa como complemento de la planta de cianuración Maraón para la Compañía Minera Poderosa S.A.* Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.

- Pazmiño, J. (2007). *Generalidades del carbón activado. Obtenido de carbón activado.*
- Tómala Andrade, C. (2016). *Análisis de un sistema de adsorción y desorción de oro de carbón.* Escuela Superior Politécnica del litoral. Guayaquil.
- Ures Rodríguez, P., Jácome Burgos, A. y Suarez López, J. (2014). *Adsorción en carbón activado (FT-TER-002).* Ficha técnica de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. España.
- Varillas Sánchez, J. C. (2014). *Uso de resina AuRIX100 para optimizar la recuperación del oro de de la solución cianurante de la planta de beneficio Laytaruma.* [Tesis de pregrado Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo].
- Yampasi Cáceres, O. (2017). *Adsorción del Carbón Activado de Tallos y Hojas de Cañihua (Chenopodium pallidicaule), para la recuperación del oro en la Minera Colibrí S.A.C.* [Tesis de pregrado Universidad Nacional del Altiplano, Puno].
- <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5556>

# **ANEXOS**

**Figura 1**

*Pesado me muestra de residuos de aceituna*



*Nota: Vilca, M. 2021*

**Figura 2**

*Temperatura de secado de la muestra carbón activado.*



*Nota: Vilca, M. 2021*

**Figura 3**

*Secado de muestra antes de la molienda.*



*Nota: Vilca, M. 2021*

**Figura 4**

*Carbonización del carbón activado.*



Nota: Vilca, M. 2021

**Figura 5**

*Muestra en el crisol antes de la carbonización.*



*Nota: Vilca, M. 2021*

**Figura 6**

*Obtención del carbón activado.*



*Nota: Vilca, M. 2021*