

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**AMBIENTAL**



**T E S I S**

**“INFLUENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE HUARANGO  
(*Acacia macracantha*) EN LA REMOCIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL  
EN AGUA POTABLE, CELENDÍN”**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADA POR EI BACHILLER:**

**HORACIO GILBERTO SEGURA ABANTO**

**ASESORES:**

**Ing. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA**

**Ing. JORGE SILVESTRE LEZAMA BUENO**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2017**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico a mis padres por inculcarme una formación en valores y darme el aliento necesario para formarme como un profesional.

A mis compañeros de promoción con quienes compartí muy gratos momentos dentro y fuera de las aulas.

A todos mis amigos que contribuyeron a que este trabajo sea realizado.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a Dios por el hermoso regalo de la vida y la salud, y por darme la fortaleza y sabiduría para afrontar nuevos retos.

A mis padres Cruz A. Segura Aguirre y María P. Abanto Chávez por su incondicional apoyo durante mi formación profesional y en la ejecución del presente trabajo. Asimismo a mis hermanos Walter, Adolfo, Lili, Raúl, Fredy y Kelly, por la motivación para salir adelante.

A la Ing. Giovana Ernestina Chávez Horna y al Ing. Jorge Silvestre Lezama Bueno por su tiempo dedicado como asesores y aporte constructivo en el presente trabajo.

A todos los docentes de mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca – EAPIAC, por haberme brindado los conocimientos para desempeñarme como profesional.

Al Ing. José Antonio Silva Chávez por su amistad, consejos y gran apoyo brindado para la ejecución de este trabajo.

Al Dr. Gerardo Juan Francisco Cruz Cerro, por compartir sus conocimientos y permitirme ejecutar parte de los análisis del presente estudio en el laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes.

A todos los amigos que generosamente me apoyaron en las diferentes etapas de la ejecución del presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
I. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Problema de la investigación.....	4
1.2. Formulación del problema.....	5
1.3. Objetivo de la investigación .....	5
1.3.1. Objetivo general .....	5
1.3.2. Objetivos específicos .....	5
1.4. Hipótesis de la investigación.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Antecedentes .....	6
2.2. Bases teóricas .....	8
2.2.1. Agua potable.....	8
2.2.2. Desinfección del agua para potabilización.....	9
2.2.3. Desinfección con cloro .....	9
2.2.4. Cloro libre residual .....	10
2.2.5. Reacción del cloro residual y formación de Trihalometanos (THM).....	11
2.2.6. Efectos de los Trihalometanos (THM) .....	12
2.2.7. Decloración .....	13
2.2.8. Decloración por adsorción sobre carbón activado.....	13
2.2.9. Carbón activado .....	14
2.2.10. Métodos de activación .....	14
2.2.11. Caracterización del carbón activado .....	16
2.2.12. Adsorción .....	17
2.2.13. Ensayos de cinética de adsorción .....	18
2.2.14. Precursores del carbón activado .....	20
2.2.15. <i>Acacia macracantha</i> “huarango”.....	20

III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1.	Ubicación geográfica de la investigación.....	22
3.2.	Materiales .....	26
3.2.1.	Material biológico.....	26
3.2.2.	Material de campo .....	26
3.2.3.	Material y equipo de laboratorio .....	26
3.3.	Metodología.....	29
3.3.1.	Trabajo de campo .....	29
3.3.2.	Trabajo de laboratorio.....	32
3.3.3.	Trabajo de gabinete.....	41
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
4.1.	Caracterización del carbón activado .....	42
4.1.1.	Rendimiento del material precursor.....	42
4.1.2.	Humedad del carbón activado .....	42
4.1.3.	Contenido de ceniza del carbón activado.....	43
4.1.4.	Caracterización del área superficial y porosidad .....	44
4.1.5.	Capacidad de adsorción .....	44
4.2.	Determinación de la remoción de cloro libre residual.....	52
4.2.1.	Medición de cloro libre residual en la red de agua potable de la ciudad de Celendín.....	52
4.2.2.	Porcentaje de remoción de cloro libre residual con carbón activado .....	52
4.2.3.	Isotermas de adsorción.....	56
4.2.4.	Comparación de la deoloración con CA vs sin CA .....	57
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	59
5.1.	Conclusiones .....	59
5.2.	Recomendaciones .....	59
VI.	BIBLIOGRAFIA.....	61
VII.	ANEXOS .....	66

7.1.	Fichas de identificación de las muestras.....	66
7.2.	Panel fotográfico producción y caracterización del carbón activado .....	70
7.3.	Panel fotográfico análisis de adsorción de cloro libre .....	78
7.4.	Certificado del laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes .....	81
7.5.	Datos obtenidos en la prueba de adsorción de cloro libre residual.....	82
7.6.	Memoria de cálculos de las variables de pseudo segundo orden.....	83
VIII.	GLOSARIO.....	88

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1: Límites máximos permisibles de parámetros de control obligatorio en agua potable .....	8
TABLA 2: Puntos de recojo de las muestras de <i>Acacia macracantha</i> .....	22
TABLA 3: Puntos de monitoreo de pruebas de adsorción de cloro libre residual en agua potable .....	24
TABLA 4: Disposición de las muestras en el agitador orbital, para la prueba de equilibrio .....	38
TABLA 5: Rendimiento de la madera de <i>Acacia macracantha</i> para producción de carbón activado .....	42
TABLA 6: Contenido de humedad del carbón activado .....	42
TABLA 7: Contenido de cenizas del carbón activado.....	43
TABLA 8: Características del área superficial, porosidad y pH del carbón activado de <i>Acacia macracantha</i> .....	44
TABLA 9: Medición de la absorbancia para concentraciones conocidas a fin de construir la curva de calibración.....	45
TABLA 10: Prueba de equilibrio con azul de metileno.....	46
TABLA 11: Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 40 mg/L de azul de metileno .....	48
TABLA 12: Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 60 mg/L de azul de metileno .....	48
TABLA 13: Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 80 mg/L de azul de metileno .....	49
TABLA 14: Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 120 mg/L de azul de metileno .....	49
TABLA 15: Ajuste al modelo de pseudo primer orden para Azul de metileno .....	51
TABLA 16: Ajuste al modelo de pseudo segundo orden para Azul de metileno .....	51
TABLA 17: Cloro libre residual en la red de agua potable de la ciudad de Celendín .....	52
TABLA 18: Porcentaje de remoción de cloro libre en la prueba de cinética de adsorción.....	53
TABLA 19: Ajuste al modelo de pseudo segundo orden para Cloro libre .....	56
TABLA 20: Datos obtenidos en la prueba de adsorción de cloro libre .....	82

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árboles de <i>Acacia macracantha</i> seleccionados .....	29
Figura 2: Medición de la altura para corte .....	30
Figura 3: Tronco libre de ramas y hojas.....	30
Figura 4: Extracción de las muestras y etiquetado .....	30
Figura 5: Muestra embalada y etiquetada .....	31
Figura 6: Muestras listas para envío al laboratorio.....	31
Figura 7: Diagrama de flujo de producción de carbón activado utilizando ZnCl <sub>2</sub> como agente químico de activación .....	32
Figura 8: Secado de la muestra.....	33
Figura 9: Preparación de la muestra.....	33
Figura 10: Mezclado del material precursor con el agente activante.....	33
Figura 11: Sistema de producción de carbón activado (Balón de nitrógeno gas + Dispensador de nitrógeno + Horno horizontal + Recipiente para recuperación del agente activante) .....	34
Figura 12: Proceso de enfriamiento del equipo de carbonización.....	34
Figura 13: Carbón activado en bruto producido .....	34
Figura 14: Lavado del carbón activado con HCl 0.5N .....	35
Figura 15: Lavado del carbón activado con agua destilada hervida .....	35
Figura 16: Secado del carbón activado lavado .....	35
Figura 17: Tamizado del carbón activado limpio .....	36
Figura 18: Curva de calibración para azul de metileno .....	45
Figura 19: Porcentaje de remoción de azul de metileno en la prueba de equilibrio .....	47
Figura 20: Variación del pH 3 en la PE .....	47
Figura 21: Variación del pH 4.5 en la PE .....	47
Figura 22: Variación del pH 6 en la PE .....	47
Figura 23: Variación del pH 7.5 en la PE .....	47
Figura 24: Cinética de adsorción con azul de metileno .....	50
Figura 25: Porcentaje de remoción de cloro libre en muestras con concentración inicial $\leq$ a 0.6 mg/L .....	54
Figura 26: Porcentaje de remoción de cloro libre en muestras con concentración inicial $>$ a 0.6 mg/L .....	55



Figura 27: Isoterma de adsorción para el CA producido de madera de <i>Acacia macracantha</i> .....	57
Figura 28: Remoción de cloro libre con tratamiento con carbón activado y sin tratamiento para soluciones sintéticas de concentración inicial de 1.56 ppm y 2.06 ppm .....	58
Figura 29: Laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes ..	70
Figura 30: Materia prima triturada y tamizada .....	70
Figura 31: Cloruro de Zinc utilizado como agente activante .....	70
Figura 32: Peso de la muestra.....	71
Figura 33: Peso del agente activante.....	71
Figura 34: Llenado mezcla en el tubo de carbonización.....	71
Figura 35: Colocando la muestra en el horno horizontal .....	71
Figura 36: Horno al luego del periodo de activación.....	71
Figura 37: Enfriamiento del horno horizontal .....	71
Figura 38: Carbón activado producido.....	71
Figura 39: Medición del pH del carbón activado .....	72
Figura 40: Muestra de CA en la estufa para determinación de la humedad.....	72
Figura 41: Incineración de muestra de CA para determinar el contenido de ceniza .....	72
Figura 42: Preparación de las soluciones de azul de metileno .....	73
Figura 43: Distribución de concentraciones de 40, 60, 80 y 120 ppm en matraces de 250 ml.....	73
Figura 44: Modificación del pH a valores de 3; 4.5; 6 y 7.5 para cada una de las .....	73
Figura 45: Peso de las muestras.....	74
Figura 46: Etiquetado de muestras.....	74
Figura 47: Añadiendo el carbón activado a las muestras de azul de metileno .....	74
Figura 48: Disposición de las muestras en el agitador orbital.....	74
Figura 49: Muestras luego de 24 horas .....	74
Figura 50: Extracción de alícuotas.....	75
Figura 51: Filtración para remoción del CA .....	75
Figura 52: Medición del pH final de las muestras .....	75
Figura 53: Medición de la concentración final de azul de metileno en el espectrofotómetro .....	75
Figura 54: Pruebas de cinética de adsorción con azul de metileno a cc iniciales de 40 y 60 ppm .....	76

Figura 55: Pruebas de cinética de adsorción con azul de metileno a cc iniciales de 80 y 120 ppm .....	76
Figura 56: Visualización de la remoción de azul de metileno.....	76
Figura 57: Medición de cc finales de azul de metileno.....	77
Figura 58: Medición de cc finales de azul de metileno.....	77
Figura 59: Muestra enviada al laboratorio de la UNI .....	77
Figura 60: Toma de muestra en el PM 03 .....	78
Figura 61: Toma de muestra en el PM 04 .....	78
Figura 62: Reactivo indicador de cloro libre .....	78
Figura 63: Fotómetro multiparamétrico para agua .....	78
Figura 64: Procedimiento para medición de cloro libre (a) Extracción de alícuota de 10 ml y colocación en la cubeta; (b) Añadiendo el reactivo indicador; (c) Colocando la cubeta en la celda de medición del equipo multiparámetros y medición del cloro libre en la muestra.....	78
Figura 65: Medición del cloro libre residual en el agua potable del PM 06 .....	79
Figura 66: Colocando 100ml de agua en el matraz .....	79
Figura 67: Agregando el Carbón activado .....	79
Figura 68: Pruebas de cinética de adsorción (a) Extracción de alícuotas de 10 ml a los 5; 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos (b) Filtración con papel filtro para remover el carbón activado (c) Colocación de la muestra en la cubeta para proceder a la medición de la concentración de cloro libre.....	79
Figura 69: Cinética de adsorción de cloro libre residual con carbón activado producido de madera de <i>Acacia macracantha</i> en el PM 06 (a) Concentración inicial de cloro libre en el agua potable (b) Concentración de cloro libre a los 5 min (c) Concentración de cloro libre a los 10 min (d) Concentración de cloro libre a los 15 min (e) Concentración de cloro libre a los 45 min .....	80
Figura 70: Visualización de la variación de la concentración de cloro libre al inicio, y a los 5, 10 y 15 minutos respectivamente en el PM 06 .....	80

## RESUMEN

El análisis de alternativas para mejorar la calidad de agua para consumo humano en un contexto en que es muy difícil mantener las fuentes naturales libres de contaminación, se convierte en una prioridad que conlleva a realizar investigaciones como la presentada en este estudio; en el cual se estudiaron las características del carbón activado (CA) producido de madera de *Acacia macracantha* y su influencia en la remoción de cloro libre residual del agua potable. Para ello se realizó la producción del carbón activado a través de un proceso de activación química en una proporción 1:1 en peso de materia prima y cloruro de zinc, durante un periodo de 3 horas a una temperatura de 600 °C, lavándose posteriormente con ácido clorhídrico 0.5 N y agua destilada hervida.

Los estudios de caracterización demostraron que el carbón activado obtenido presenta un área superficial de  $1480 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ , es microporoso, presenta un tamaño de partícula menor a 0.25 nm, pH de 5.90 y posee una alta eficiencia en la remoción de colorantes como el azul de metileno, removiendo hasta 100% a concentraciones iniciales de hasta 80 ppm y más del 90% a concentraciones de 120 ppm, con una dosis de absorbente de  $0.5 \text{ gL}^{-1}$ ; asimismo se determinó que el pH al cual el carbón activado aumenta la eficiencia de adsorción es 7.5, lo cual es un buen indicativo para su aplicación en agua potable pues el pH de agua apta para consumo humano se encuentra entre 6.5 y 8.5.

Los análisis de adsorción de cloro libre residual en agua potable se realizaron en viviendas de la ciudad de Celendín, donde las concentraciones de cloro fluctúan entre  $0.12 \text{ mgL}^{-1}$  en la zona más lejana de la red y  $0.90 \text{ mgL}^{-1}$  en las viviendas próximas al reservorio; la dosis de carbón activado que se agregó fue  $0.5 \text{ gL}^{-1}$  y se determinó que la influencia de remoción es de 100% en un tiempo máximo de 45 minutos para las más altas concentraciones y un mínimo de 20 minutos en las más bajas concentraciones, asimismo se comprobó que la máxima cantidad de adsorbato removido es superior a los  $4 \text{ mgCl} - \text{g}^{-1}\text{CA}$ , lo que indica que con una pequeña cantidad de carbón activado se puede purificar una considerable cantidad de agua potable.

## ABSTRACT

The analysis of alternatives to improve the quality of water for human consumption in a context in which it is very difficult to keep natural sources free of contamination becomes a priority that leads to research such as the one presented in this study; In which the characteristics of activated charcoal (AC) produced from *Acacia macracantha* wood and their efficiency in the removal of residual free chlorine from drinking water are studied. For this purpose, the activated carbon was produced through a chemical activation process in a ratio of 1:1 by weight of raw material and zinc chloride, for a period of 3 hours at a temperature of 600 °C, 0.5 N hydrochloric acid and boiled distilled water.

The characterization studies showed that the activated carbon obtained has a surface area of 1480 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>, is microporous, has a particle size of less than 0.25 nm, pH of 5.90 and has a high efficiency in the removal of dyes such as blue Methylene, removing up to 100% at initial concentrations up to 80 ppm and more than 90% at concentrations of 120 ppm, with an adsorbent dose of 0.5 gL<sup>-1</sup>; It was also determined that the pH at which the activated carbon increases the adsorption efficiency is 7.5, which is a good indication for its application in drinking water because the pH of water suitable for human consumption is between 6.5 and 8.5.

The adsorption analysis of residual free chlorine in drinking water was carried out in houses in the city of Celendín, where chlorine concentrations fluctuate between 0.12 mgL<sup>-1</sup> in the farthest area of the network and 0.90 mgL<sup>-1</sup> in homes near Reservoir; The dose of activated charcoal added was 0.5 gL<sup>-1</sup> and it was determined that the removal efficiency is 100% in a maximum time of 45 minutes for the highest concentrations and a minimum of 20 minutes in the lowest concentrations, likewise It was found that the maximum amount of adsorbate removed is greater than 4 mgCl - g<sup>-1</sup>AC, indicating that with a small amount of activated carbon a considerable amount of potable water can be purified.

## I. INTRODUCCIÓN

La preocupación por la calidad del agua que consumimos en los hogares, ha conllevado a la humanidad a la búsqueda constante de tecnologías y métodos para su tratamiento, entre los que sobresale la desinfección con cloro, debido a que el costo de la sustancia es bajo y su aplicación es sencilla y efectiva; sin embargo, la aplicación de cloro genera que al finalizar el proceso de desinfección quede una cierta cantidad de la sustancia y que es conocida como cloro libre residual, el cual según la OMS (2006) puede reaccionar con distintos compuestos orgánicos, generando trihalometanos (THMs) y otros subproductos de desinfección halogenado; los cuales a su vez según Sánchez (2008) representan un riesgo para la salud, pues estudios efectuados en animales han descubierto que el cloroformo en altas dosis es cancerígeno y que los otros THMs son mutagénicos.

Esta situación conlleva a la necesidad de emplear nuevas metodologías de tratamiento que incluyan la remoción de subproductos de desinfección del agua potable, entre las que tenemos el empleo de filtros de carbón activo, con propiedades fijadoras y capacidad de retener los THMs y otras sustancias, eliminándolas del entorno, con lo que el producto final cumple con los estándares de calidad y seguridad de forma sencilla (Sánchez 2008).

En la actualidad el carbón activado es muy utilizado en la purificación de aguas en las industrias farmacéutica y de alimentos; aunque su uso en el tratamiento de agua para consumo en los hogares todavía es limitado, debido al bajo nivel de producción y a su elevado costo. Situación que se puede revertir si se realiza la producción a partir de materias primas abundantes en el país y se difunde la importancia de su utilización.

En ese contexto en el presente trabajo de investigación se analizó la capacidad de adsorción de los carbones activados producidos a partir de *Acacia macracantha* “huarango”, para la remoción de cloro libre y residual del agua potable. Teniendo en consideración que el huarango es una especie ampliamente distribuida en nuestro país; además el ser un recurso renovable comúnmente utilizado como leña, lo cual según May (2013), sugiere que es un producto con alto contenido de carbono y bajo contenido de ceniza; es decir, la materia prima o precursor cuenta con las propiedades de abundancia, dureza, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza, propuestos por Ioannidou y Zabaniotou (2007).

Por ello se realizó la producción y caracterización del carbón activado obtenido, seguido por la determinación de su influencia en cuanto al porcentaje de remoción de cloro libre residual, a nivel de laboratorio.

La importancia del presente trabajo radica en que a partir de los resultados obtenidos, se propone el carbón activado obtenido a partir de una materia prima hasta ahora no utilizada (*Acacia macracantha*), para la remoción de cloro libre y residual de los sistemas de agua potable, con lo que se impide la formación de THMs ya que estas sustancias significan una potencial amenaza para la salud de la población.

### **1.1. Problema de la investigación**

La situación de la calidad del suministro de agua potable en los hogares, es motivo de preocupación de todos los países, debido a que una dotación de mala calidad puede convertirse en un medio para la transmisión de enfermedades. En ese sentido, la OMS propone que para mejorar la calidad del agua para consumo se pueden emplear muchas formas de tratamiento, de las cuales las más comunes son la decantación y el filtrado, seguidas por la desinfección, para lo cual el método más aplicado es la adición de cloro.

No obstante, el sistema de desinfección utilizado no es una garantía para la salud humana, debido a la formación de subproductos que pueden potencialmente traer consecuencias en el largo plazo, y aunque la evidencia existente no es concluyente (Meier *et al.* 1986), tampoco podemos dejar el sistema como está actualmente, sino que al amparo del principio de prevención, debemos proponer alternativas para eliminar el cloro libre residual y por consiguiente evitar la formación de THMs en el agua antes de su consumo.

Pues precisamente una opción para la remoción de cloro libre residual y los THMs del agua potable, lo constituye la filtración con carbón activado (Lykins 1988), producto que en la actualidad no está al alcance de toda la población, pues su producción para el tratamiento de agua potable es limitada y el costo no es asequible; por lo que es muy importante identificar una materia prima relativamente abundante o que sea renovable y de bajo costo.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es la influencia del carbón activado obtenido de *Acacia macracantha* “huarango”, en la remoción de cloro libre residual presentes en el agua potable de Celendín en el año 2016?

## **1.3. Objetivo de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la influencia del carbón activado obtenido de *Acacia macracantha* “huarango”, en la remoción de cloro libre residual presentes en el agua potable de Celendín en el año 2016.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar la porosidad, área superficial BET, área superficial de Langmuir, volumen de poros, tamaño promedio de poros, capacidad de adsorción, humedad y contenido de ceniza del carbón activado obtenido de *Acacia macracantha* “huarango”.
- Evaluar la capacidad adsorptiva del carbón activado obtenido de *Acacia macracantha* “huarango”, en la remoción de cloro libre residual del agua potable de Celendín en el año 2016.

## **1.4. Hipótesis de la investigación**

El carbón activado obtenido de *Acacia macracantha* “huarango”, presenta una influencia superior al 90% en la remoción de cloro libre residual presente en el agua potable de Celendín en el año 2016.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

Si bien no se han desarrollado estudios como este, si existen diversas experiencias en cuanto a la producción de carbón activado a partir de diversos productos y aplicados a diferentes procesos ya sea de remoción de contaminantes o de producción de alimentos y bebidas, tales como los siguientes:

- Noboa (2008), en su tesis “Diseño de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable para uso en la industria farmacéutica”, en la cual comparó la efectividad de dos tipos de carbón activado comercial, determinó que este tiene una efectividad en cuanto a la remoción de cloro libre residual del 98%; asimismo recomienda que la instalación de filtros con carbón activado debe realizarse como última etapa de tratamiento de agua pues caso contrario implicaría desproteger el agua de contaminaciones microbianas en el resto del proceso.
- Paredes (2011), en su estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña, determino que los carbones activados sintetizados por activación química de cáscara de castaña presentan áreas superficiales entre 1176-1434 m<sup>2</sup>/g, asimismo comprobó que la retención de los compuestos aromáticos sobre los carbones activados preparados a partir de cáscara de castaña es bastante rápida, pues se remueve el mayor porcentaje en los primeros 20 minutos.
- Martínez (2012), realizó un estudio en desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano, produciendo carbones activados a partir de cáscara de almendra en condiciones experimentales definidas mediante un diseño experimental que utiliza como parámetros de entrada: la temperatura de activación, el ratio de impregnación y el tiempo de activación. Concluyendo que las condiciones de activación influyen de forma importante en las características fisicoquímicas de los carbones activados. Asimismo se determinó que los carbones activados mantienen su capacidad de adsorción después de varios ciclos de adsorción-



desorción, mediante regeneración térmica, por lo que resultan aptos para su aplicación industrial.

- Mestanza (2012), en su tesis doctoral titulada “Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes”, determinó que los materiales carbonosos son adsorbentes muy versátiles ya que las principales fuerzas que se establecen entre la superficie carbonosa y los colorantes ensayados son de naturaleza hidrófoba, permitiéndoles adsorber tanto colorantes aniónicos como catiónicos. Además señala que existe una íntima relación entre la capacidad de adsorción y la superficie específica. Concluyendo que la elección de un adsorbente para el tratamiento de aguas contaminadas viene determinada por el adsorbato principalmente. Si se trata de una mezcla de adsorbatos de diferente carácter iónico lo más recomendable es emplear un adsorbente carbonoso.
- Pilamonta (2013), en su estudio para el mejoramiento del carbón activado contaminado en el tratamiento del agua potable, determinó que el carbón regenerado aumenta la retención de cloro libre del agua potable, que según el análisis del agua se llega a reducir en un valor a 0 mg/l de cloro libre, lo que hace que la regeneración química sea una alternativa para la recuperación de carbones agotados.
- Jiménez (2014), realizó un estudio para el aprovechamiento de residuos celulósicos de piña para la producción de carbón activado. Para ello realizó el proceso de activación química con ácido fosfórico de los principales residuos celulósicos de la piña, cáscara y corona. Posteriormente, mediante la prueba de adsorción del azul de metileno, se pudo determinar que los carbones activados obtenidos cuentan con buenas características adsorbentes, alcanzando valores entre 90.35-99.21 % de remoción del colorante. Ante ello se pudo concluir que la producción de carbón activado por activación química a partir de residuos y desechos de piña es una buena alternativa para disminuir el impacto y la contaminación ambiental causado por la cantidad de residuos generados por este cultivo y que el carbón activado obtenido puede ser de interés para la remoción de colorantes y contaminantes en el agua.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Agua potable

Agua sana, agradable e inocua al ser humano y que cumple con estándares de calidad establecidos por los países (OPS 2001).

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo y accesible). La mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud, y el desarrollo en los ámbitos nacional, regional y local; pues en algunas regiones, se ha comprobado que las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua y de saneamiento pueden ser rentables desde un punto de vista económico, ya que la disminución de los efectos adversos para la salud y la consiguiente reducción de los costos de asistencia sanitaria es superior al costo de las intervenciones. La experiencia ha demostrado asimismo que las medidas destinadas a mejorar el acceso al agua potable favorecen en particular a los pobres, tanto de zonas rurales como urbanas, y pueden ser un componente eficaz de las estrategias de mitigación de la pobreza (OMS 2006).

Según el Ministerio de Salud (2011), todo proveedor de agua potable debe garantizar que el producto cuente con los siguientes parámetros de control obligatorio: coliformes totales, coliformes termotolerantes, color, turbiedad, residual de desinfectante y pH; cuyos límites máximos permisibles se muestran en la tabla 1.

**TABLA 1:** Límites máximos permisibles de parámetros de control obligatorio en agua potable

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100 mL a 35°C	0 (*)
Bacterias Coliformes Termotolerantes o Fecales	UFC/100 mL a 44,5°C	0 (*)
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
Cloro	mg-L <sup>-1</sup>	5
pH	Valor de pH	6.5 a 8.5

(\*) En caso de analizar por la técnica del NMP por tubos múltiples = < 1,8 /100 ml

### **2.2.2. Desinfección del agua para potabilización**

La desinfección del agua se refiere a la inactivación de los microorganismos especialmente los patógenos que son causantes de enfermedades, que pueden causar daños en los consumidores de agua, y cuya intensidad y gravedad varía dependiendo de muchos factores entre ellos: edad y condición física de la persona infectada, así como del tipo de microorganismo causante de la enfermedad y de la intensidad o concentración en el agua del agente infeccioso. La desinfección es tal vez el tratamiento más importante y de mayor trascendencia en la potabilización del agua (Rocha 2010).

Sin embargo, ésta debe ser constante y no debe considerarse como el único tratamiento para el agua de baja calidad. Es importante que la desinfección se combine con la protección de la fuente, operaciones de tratamiento adecuadas, así como la protección del agua durante su almacenamiento y distribución.

El agua puede desinfectarse a través de medios físicos o químicos. La desinfección por medios físicos se realiza a través de procesos como la ebullición o irradiación para obtener agua apta para beber. La filtración también puede considerarse un método de desinfección. Muchos productos químicos, en particular el cloro y el yodo, se usan como desinfectantes, aunque la controversia reciente acerca de la seguridad del cloro y sus subproductos ha renovado el interés en otras formas de desinfección, como el uso de ozono. Los factores que determinan la selección de desinfectantes son principalmente la disponibilidad, el costo, la logística, el costo del equipo y la seguridad (Reid 1998).

El uso de productos químicos desinfectantes en el tratamiento del agua genera habitualmente subproductos como los Trihalometanos y otros a consecuencia de la reacción del desinfectante con la materia orgánica presente en el agua. No obstante, los riesgos para la salud que ocasionan estos subproductos en el corto plazo son extremadamente pequeños en comparación con los asociados a una desinfección insuficiente, y es importante que el intento de controlar la concentración de estos subproductos no limite la eficacia de la desinfección (OMS 2006).

### **2.2.3. Desinfección con cloro**

El cloro es un producto químico relativamente barato y ampliamente disponible que, cuando se disuelve en agua limpia en cantidad suficiente, destruye los organismos causantes de enfermedades, sin poner en peligro a las personas (OMS 2009).

Cuando se añade cloro, éste purifica el agua al destruir la estructura celular de los organismos, lo cual los elimina. Sin embargo, según la OMS (2004) este proceso sólo funciona si se cumplen ciertas condiciones tales como:

- El cloro debe entrar en contacto directo con los organismos. Si el agua contiene lodo, las bacterias se pueden esconder dentro del mismo y no son alcanzadas por el cloro.
- El cloro necesita cierto tiempo para destruir todos los organismos. En agua a una temperatura mayor de 18°C, el cloro debe estar en contacto con el agua, al menos 30 minutos. Si el agua está más fría, el tiempo de contacto se debe incrementar. Por esta razón, se añade cloro al agua en el tanque de almacenamiento o en una tubería larga de distribución, para darle tiempo a que el producto reaccione con el agua antes de llegar al consumidor.
- La efectividad del cloro también se ve afectada por el pH (acidez) del agua. La cloración no es efectiva si el pH es mayor de 7,2 o menor de 6,8.

El cloro y sus derivados son por mucho los agentes desinfectantes que más se emplean en el mundo. Es posible emplear compuestos tales como: el cloro gas, el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio o compuestos organoclorados como el ácido tricloroisocianurico (cloro 90). Todos ellos producen el ácido hipocloroso y el ión hipoclorito que son los agentes activos (Rocha 2010).

#### **2.2.4. Cloro libre residual**

Cantidad de cloro presente en el agua en forma de ácido hipocloroso e hipoclorito que debe quedar en el agua de consumo humano para proteger de posible contaminación microbiológica, posterior a la cloración como parte del tratamiento (MINSA 2011). Este permanece en el agua hasta perderse en el mundo exterior o hasta usarse para contrarrestar una nueva contaminación (OMS 2009).

Según Montesdeoca (2004), la presencia de cloro residual en el agua potable es indicativo de dos aspectos fundamentales que cualquier operador y/o ingeniero de una planta de tratamiento de agua debe dominar:

- Que una suficiente cantidad de cloro fue añadida inicialmente al agua para inactivar las bacterias y algunos virus causantes de enfermedades.
- Que el agua se encuentra protegida de posibles recontaminaciones microbiológicas durante su almacenamiento o transferencia.

El cloro produce una acción desinfectante residual sostenida que es única entre los desinfectantes de agua en gran escala. La superioridad del cloro como desinfectante residual sigue siendo válida hasta hoy. Ello implica que el agua queda protegida, por la presencia de un residuo sostenido que mantiene la higiene del agua de consumo humano en las fases de transporte y distribución hasta su llegada al consumidor (Melendreras 2015).

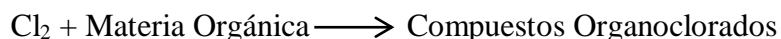
#### **2.2.5. Reacción del cloro residual y formación de Trihalometanos (THM)**

Los trihalometanos, son compuestos orgánicos basados en una molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ) en la que los átomos de hidrógeno presentes habitualmente han sido reemplazados por tres átomos de elementos halogenados (cloro, bromo, flúor y/o yodo). En general, con el término trihalometanos totales hacemos referencia a la suma de varios subproductos de cloración: cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo (Singer 1995 y Galvín 2015).

Los THMs se encuentran en el agua potable como resultado de la interacción del cloro con materia orgánica natural que se encuentra en el agua. Estos estarán presentes mientras el agua contenga cloro o hipoclorito, además de los precursores orgánicos. Es por esto que hay que mantener la cantidad de cloro residual dentro de unos límites. La concentración de THMs también depende del tiempo de contacto, la temperatura del agua y el pH (Rodríguez *et al* 2003).

En estudios efectuados en animales, se ha descubierto que el cloroformo en altas dosis es cancerígeno y que los otros THMs son mutagénicos (Sánchez 2008).

El cloro cuando genera hipoclorito y ácido hipocloroso no solo reacciona con las células microbianas. Es un agente químico sumamente activo y reacciona con el material orgánico y con otras especies químicas que se encuentran presentes en el agua a desinfectar. Así tenemos que destruye materia orgánica formando compuestos organoclorados:



La presencia de trihalometanos puede ser detectada en aguas que han sido desinfectadas con cloro (Rocha 2010).

#### **2.2.6. Efectos de los Trihalometanos (THM)**

Los estudios epidemiológicos asocian determinadas exposiciones a THM y en general la exposición a subproductos de la desinfección con efectos sobre la salud como el cáncer de vejiga y determinados defectos de nacimiento en recién nacidos de madres expuestas. Los estudios sobre el cáncer de vejiga encuentran un incremento del riesgo debido a largas exposiciones a los THM a pesar de que los resultados no son siempre significativos. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasifica el cloroformo y el bromodiclorometano como posibles carcinógenos para los humanos en ciertas condiciones de exposición (Agencia de Salud Pública 2012).

Entre los estudios acerca de los efectos de los THMs en humanos tenemos el desarrollado por Cantor *et al.* (1987) sobre la incidencia de cáncer de vejiga en una población, durante un estudio de casos/controles aplicado a 4,657 personas, que consumían agua clorada y no-clorada. Los investigadores informaron de una asociación entre el riesgo de cáncer de vejiga y el consumo de agua clorada; pues no se reportó presencia alguna de cáncer de vejiga en personas que consumían agua subterránea no clorada. Asimismo la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), citado por Sánchez (2008) calcula que un 2-17% de los cánceres de vejiga en Estados Unidos se podrían atribuir a la exposición a subproductos de la cloración.

Existen diferentes rutas de exposición a los THMs: ingestión oral, inhalación y absorción dérmica, de las cuales la de mayor riesgo de producir cáncer es la ingestión oral y la de menor la absorción dérmica (Wang *et al.*, 2007)

### **2.2.7. Decloración**

La razón de remover el cloro, es que este desinfectante es necesario que se encuentre presente para evitar que se desarrollen microorganismos en el agua. Pero una vez que el cloro cumple su objetivo y el agua se va a consumir, el cloro residual ya no es deseable y se debe remover; pues si el agua se consume como agua de beber, el sabor del cloro la hace objetable para la mayoría de los consumidores y en su empleo en la industria de alimentos y bebidas, por la posibilidad de tener reacciones secundarias y por el sabor mismo (Rocha 2010).

Otra razón por la que se debe remover el cloro residual libre, es que Rodriguez *et al.* (2003) investigo la formación de THMs en pequeños sistemas de distribución en Quebec, encontrando que las concentraciones de estos subproductos que llegaban a los hogares, y las presentes en los termos de agua caliente de los mismos, eran de 1,3 a 2,5 veces superiores a las de las propias redes de distribución. Deduciendo que la causa de esta mayor concentración se debe al mayor tiempo de contacto.

Orellana (2005), señala que algunos métodos de decloración son:

- Adición de productos químicos reductores
- El paso a través de lechos de carbón activado
- La aireación

De los cuales la decloración mediante adsorción sobre carbón activado proporciona una completa eliminación tanto del cloro residual libre como del combinado.

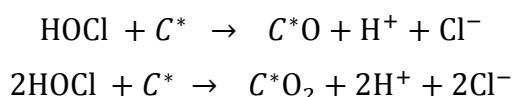
### **2.2.8. Decloración por adsorción sobre carbón activado**

Si es inevitable la formación de THM en la cloración, es posible disminuir la cantidad formada de estos con dos acciones preventivas (Rocha 2010):

- Agregando solo la dosis de cloro requerida, pero esencialmente disminuyendo la cantidad de materia orgánica presente en el agua a desinfectar, ya que sin estos no se produce la formación de THMs.
- Otra forma de controlar muy efectivamente la presencia de THM en el agua potable es con el uso del *carbón activado*. Los filtros de este tipo

han probado ser muy eficientes en remover no solo cloro residual en el agua sino también los THM.

Cuando el carbón se expone al cloro libre, se llevan a cabo reacciones en las que el HOCl o el OCl<sup>-</sup> se reducen a ión cloruro (Cl<sup>-</sup>). Dicha reducción es el resultado de distintos caminos de reacción posibles. En dos de los más comunes, el CA actúa como un agente reductor, de acuerdo con las siguientes reacciones:



En donde C\* representa al carbón activado. C\*O y C\*O<sub>2</sub> son óxidos superficiales, que poco a poco van ocupando espacios (poros). En cuanto al Cl<sup>-</sup>, también se acumula en la superficie del carbón durante los primeros momentos de operación. Al seguir llegando HOCl u OCl<sup>-</sup> a la superficie del carbón, la reacción se hace un poco más lenta, y entonces se empieza a liberar el Cl<sup>-</sup>, dicho proceso continua de manera gradual mientras disminuye la capacidad, tanto de adsorción como de deoloración del CA (Pilamonta 2013).

### **2.2.9. Carbón activado**

Material sólido, poroso, carbonoso preparado por carbonización y la activación de sustancias orgánicas. Las materias primas, que incluyen aserrín, turba, lignito, carbón, residuos de celulosa, cáscaras de coco, coque de petróleo, etc., puede ser carbonizado y activado a alta temperatura, con o sin la adición de sales inorgánicas en una corriente de gases de activación tal como vapor de agua o dióxido de carbono. Alternativamente, la materia carbonosa puede ser tratada con un agente activador químico tal como ácido fosfórico o cloruro de zinc y la mezcla carbonizada a una temperatura elevada, seguido por eliminación del agente de activación química mediante lavado con agua (FAO 1992).

El término carbón activado se refiere a carbones muy porosos producidos a partir de materiales ricos en carbono, mediante diversas formas de activación química o física (Rouquerol *et al.* 1999)

### **2.2.10. Métodos de activación**

#### **A. Activación física**



Según Fombuena y Valentín (2010) el proceso físico también se conoce como activación térmica a pesar de que la activación se produce debido a una reacción (química) del agente activante (un oxidante como el aire, vapor de agua, CO<sub>2</sub>, entre otros).

El método de activación física tiene lugar en dos etapas: carbonización y activación del carbonizado, siendo el agente activante el responsable de quemar las partes más reactivas del esqueleto carbonoso y el alquitrán retenido dentro de la estructura porosa.

A veces es necesaria la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante.

Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad incipiente en el carbonizado, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación, en la que se expone éste a un agente oxidante, la reacción es endotérmica por lo que es necesario generar una temperatura constante entre 800 y 1000 °C.

## **B. Activación química**

Este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900 °C. No obstante, en este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante.

Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, aunque los más usados en la industria son el cloruro de zinc (ZnCl<sub>2</sub>), el ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) y el hidróxido de potasio (KOH). La

activación con  $ZnCl_2$  fue el método más usado hasta 1970, principalmente para la activación de residuos de madera (Metcalf & Eddy 2003).

Inicialmente, el precursor se mezcla con el producto químico en una solución acuosa para formar una pasta, que más tarde se evapora. Durante la evaporación, hay un debilitamiento de la estructura lignocelulósica debido a reacciones de hidrólisis (con pérdida de materia volátil), lo que lleva a un aumento de elasticidad y un hinchamiento de las partículas precursoras. Después de la evaporación, el de carbono impregnado se trata térmicamente en una atmósfera inerte a temperaturas finales entre 773 y 1073 K (Bandosz 2006).

### **2.2.11. Caracterización del carbón activado**

El carbón activado se evalúa por su área o superficie activa de adsorción. Para esto se determina la cantidad de nitrógeno o de butano que es adsorbido por un carbón. Cuanto mayor sea la cantidad de gas adsorbido mayor es su superficie y por lo tanto mayor es su capacidad de retención de moléculas de gas.

Para la adsorción en fase líquida se emplea el índice de yodo, donde se evalúa la cantidad de yodo que adsorbe un carbón determinado y se compara su valor con los parámetros o valores estándar (Rocha 2010).

Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), citado por Gómez *et al.* (2010), la clasificación de los poros se basan en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente:

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

El área superficial está formada por la estructura porosa del carbón activado, su determinación se realiza a partir de mediciones experimentales de isothermas de adsorción y cálculo de la cantidad máxima adsorbida en monocapa. Con este valor y con un diámetro efectivo de las moléculas adsorbidas es posible calcular el área cubierta por una de las moléculas. Esta área se considera igual al área superficial específica del sólido. Dentro de los principales modelos que

describen la adsorción por cubrimiento se encuentran los de Langmuir y Brunauer, Emmett y Teller (BET) (Gómez *et al.* 2010).

En términos generales, los carbones microporosos son más adecuados para la remoción de moléculas pequeñas, por ejemplo los trihalometanos, los cuales consisten de estructuras simples como:  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CHClBr}_2$  (Rocha 2010).

### **2.2.12. Adsorción**

Según Drogue (1983), la adsorción es la propiedad de atraer y atrapar ciertas moléculas del fluido que rodea al carbón. A esta propiedad se le llama “adsorción”; al sólido que adsorbe se le denomina adsorbente y a la molécula atrapada, adsorbato.

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para quitar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500  $\text{m}^2/\text{g}$ ). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activo se usa por ejemplo en los siguientes procesos:

- Depuración de agua subterránea
- Decloración del agua
- Refinamiento de las aguas residuales tratadas

La adsorción ocurre por la acción de fuerzas superficiales, que se originan por la falta de compensación de fuerzas de atracción moleculares o falta de enlaces en los átomos, y se incrementa con el descenso de la temperatura. El aumento de la presión parcial del gas, así como de la superficie del adsorbente favorece la adsorción. Además, las partículas retenidas en la superficie del sólido tienen una movilidad restringida al plano de la superficie. La adsorción puede ser química o física en función de las fuerzas responsables de la adhesión. El fenómeno inverso a la adsorción se denomina desorción.

#### **A. Adsorción química**

Es el resultado de la interacción química entre una molécula de adsorbato y la superficie del adsorbente. La fuerza con la que se unen se aproxima a la de un enlace químico, aunque a veces se puede dar sólo la modificación o la deformación parcial de los orbitales moleculares. Por estas razones, se producen cambios en la estructura de las especies involucrados. Este tipo de adsorción es irreversible. Ocurre con frecuencia en procesos catalíticos y en casos específicos está implicado en procesos de separación (Droguett 1983).

### **B. Adsorción física**

Es el resultado de la acción de fuerzas de van der Waals entre el adsorbato y el adsorbente. El proceso es reversible debido a la naturaleza de la unión bastante débil, la cual se puede romper por modificaciones en la temperatura, presión o concentración. Sobre la superficie del adsorbente se pueden depositar varias capas de adsorbato formando multicapas (Martín 1990).

#### **2.2.13. Ensayos de cinética de adsorción**

El estudio de la cinética de adsorción es importante porque permite entender mejor la ruta y el mecanismo de la reacción; además, para predecir el tiempo en el adsorbato será removido de la solución acuosa (Che, 2011 y Noll, 1992). La cinética describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y determina el tiempo en que se alcanza el equilibrio. La aplicación del modelo cinético solo depende de la concentración inicial y final de la solución a diferentes intervalos de tiempo. Actualmente, existen ciertos modelos matemáticos empíricos que se utilizan en la obtención de parámetros cinéticos que pueden ser útiles en los cálculos posteriores (Avella 2011).

#### **A. Modelo pseudo primer – orden**

Este modelo propuesto por Lagergren (1898), expresa la ecuación de la tasa de pseudo - primer orden para los sistemas de adsorción líquido – sólido basado en una reacción superficial, y se resume de la siguiente manera:

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t)$$

Integrando la ecuación en condiciones  $q_t = 0$  a  $t = 0$ , la ecuación quedará:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - \frac{K_1}{2.303} t$$

Siendo:

- $q_t$  = capacidad de adsorción del adsorbato a tiempo  $t$  (mg de adsorbato/g de adsorbente)
- $K_1$  = constante de pseudo primer orden ( $h^{-1}$ )

Se obtienen los parámetros  $q_e$  y  $K_1$  a partir de la regresión lineal de  $\ln(q_e - q_t)$  en función de  $t$ .

### **B. Modelo pseudo segundo – orden**

Este modelo propuesto por Ho y McKay (1999), asume que la capacidad de adsorción es proporcional al número de sitios activos ocupados en el adsorbente; es decir, este modelo se basa en la capacidad de adsorción al equilibrio cuyo mecanismo de remoción es la quimisorción como paso dominante en el sistema. Entonces la ley de velocidad cinética se puede reescribir como sigue:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Integrando esto para las condiciones límite  $t = 0$  a  $t = t$  y  $q_t = 0$  a  $q_t = q_t$ , se obtiene:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

Dónde:

- $t$ : es el tiempo de adsorción (min),
- $q_t$ : es la cantidad adsorbido en el tiempo  $t$  (mg de adsorbato/g de adsorbente),
- $K_2$ : es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden (g de adsorbente/mg de adsorbato min),
- $q_e$ : es la cantidad de adsorbato en solución adsorbido en el equilibrio (mg de adsorbato/g de adsorbente) se calculó de acuerdo  $h = K_2 q_e^2$ .

Nota: Los parámetros  $q_e$  y  $K_2$  pueden calcularse mediante la regresión lineal de  $t/q_t$  en función de  $t$ .

#### **2.2.14. Precursores del carbón activado**

Ioannidou y Zabaniotou (2007), sugieren que una buena materia prima debe tener propiedades bien definidas tales como abundancia, dureza, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización.

Cualquier material carbonos (animal, vegetal o mineral) con alta concentración de carbono puede ser transformado en carbón activado, las materias primas más comunes son de madera, cáscaras, huesos de fruta, carbones bituminosos y polímeros sintéticos como el PVC. Sin embargo el carbón activado obtenido a partir de madera dura es preferible para la adsorción porque carbón obtenido a partir de madera blanda, como madera de pino, es muy inestable y se desintegra fácilmente; es decir, las propiedades resultantes del producto dependen del precursor, y por tanto, los carbonos se pueden adaptar para aplicaciones seleccionadas. Además, las propiedades de carbón activado son también influenciadas por el tratamiento de activación (Marsh *et al.* 1997).

Según May (2013), generalmente se considera que las mismas especies que son buenas para leña son buenas para carbón, y los criterios a tener en cuenta para que se prefiera una determinada especie para leña, son los siguientes:

- Buena brasa que no se apague fácilmente
- La leña dura mucho en la candela
- Produce poca ceniza
- Se puede utilizar inmediatamente después de cortar, sin esperar que seque

Según el MINAGRI (2013), de las 132 especies para leña y carbón que existen en el Perú, las más resaltantes son el Huarango (*Acacia macracantha*), Itimpa (*Podocarpus glomeratus*), entre otros.

#### **2.2.15. *Acacia macracantha* “huarango”**

##### **Clasificación taxonómica**

**Reino** : Plantae

<b>División</b>	: Magnoliophyta
<b>Clase</b>	: Magnoliopsida
<b>Orden</b>	: Fabales
<b>Familia</b>	: Fabaceae o Leguminosae
<b>Subfamilia</b>	: Mimosoideae
<b>Género</b>	: Acacia
<b>Especie</b>	: <i>Acacia macracantha</i>

Según Whaley *et al.* (2010), esta especie posee las siguientes características:

**Descripción:** Árbol leñoso de hasta 12 m de altura, con amplia copa. Tallo marrón oscuro, con ramas marrones – verdosas, espinas alargadas. Hojas compuestas, con hojitas muy pequeñas de color verde oscuro en gran número. Flores en motitas de color amarillo-mostaza, muy perfumadas. Frutos tipo vaina mediana y curvada de color marrón oscuro, con semillas marrones-verdosas.

**Hábitat:** Zonas ribereñas, orillas de campos de cultivo, a lo largo de caminos. Asociada a *Prosopis*, *Trixis*, *Waltheria*. Presencia de insectos, abejas, moscardones.

**Usos:** es uno de los árboles más abundantes en las zonas secas del país. Proporciona fertilidad al suelo; ramas para riego; hábitat importante para protección de biodiversidad. Madera, madera de rebrote, leña y carbón; como planta ornamental (parques); forraje para ganado; polen para abejas.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ubicación geográfica de la investigación

El presente trabajo de investigación se realizó en dos etapas:

- La primera etapa consistió en la producción y caracterización del carbón activado, que se realizó en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes, ubicado en el distrito de Tumbes, provincia y departamento de Tumbes. Para ello las muestras de *Acacia macracantha* “huarango” fueron recolectadas en cuatro puntos ubicados en el trayecto de la carretera que une la ciudad de Celendín con el C.P. Llanguat, tal como se puede visualizar en el mapa 1, específicamente en las zonas señaladas en la tabla 2.

**TABLA 2:** Puntos de recojo de las muestras de *Acacia macracantha*

CÓDIGO	UBICACIÓN GEOGRÁFICA		ZONA	LOCALIDAD
	Norte	Este		
A-01	9246757.00	812751	LA REPRESA	CELENDÍN
A-02	9247271.00	812585	YANAQUERO	CELENDÍN
A-03	9247797.00	812378	QUEBRADA DEL OSO	CELENDÍN
A-04	9249292.00	811728	LA TOMA	CELENDÍN

- La segunda etapa que consistió en las pruebas de adsorción de cloro libre residual del agua potable, se realizó en la ciudad de Celendín, con 10 muestras tomadas en viviendas del área urbana seleccionadas al azar, cuya ubicación georreferenciada se presenta en la tabla 3 y se puede visualizar en el Mapa 2.



## MAPA 01

**TABLA 3:** Puntos de monitoreo de pruebas de adsorción de cloro libre residual en agua potable

CÓDIGO	COORDENADAS DEL PUNTO		DIRECCIÓN	PROPIETARIO
	NORTE	ESTE		
PM 1	9240640	815803	Jr. José Gálvez cdra. 6	Giovana E. Chávez Horna
PM 2	9241123	815318	Psj. El Triunfo #33	María P. Abanto Chávez
PM 3	9239730	815573	Av. Pumarume S/N	Rosa Pérez Quiroz
PM 4	9240139	816034	Jr. Arequipa cdra. 7	Pamela Alcalde Yupanqui
PM 5	9240917	815730	Jr. Dos de Mayo cdra. 10	Avelino Abanto Chávez
PM 6	9240440	815463	Jr. Grau cdra. 1	Agustín E. Medina Chávez
PM 7	9240169	815876	Jr. Cáceres cdra. 3	Keyth F. Calla Alvarado
PM 8	9241855	815709	Jr. Ayacucho cdra. 18	Mercedes M. Vásquez Soto
PM 9	9239544	815907	Jr. Santiago H. Rabanal cdra. 1	Alberto Alcalde Chávez
PM 10	9241365	815998	Jr. El Maestro cdra. 4	Cesáreo Cueva Infante

## MAPA 02

## **3.2. Materiales**

### **3.2.1. Material biológico**

10 Kg de madera de *Acacia macracantha* “huarango” extraídos de cuatro árboles maduros de las zonas de la Represa, Yanaquero, Quebrada del Oso y la Toma en el caserío de Llanguat, distrito y provincia de Celendín; el cual fue sometido a trituración para obtener un determinado tamaño de partículas.

### **3.2.2. Material de campo**

- GPS eTrex 20x
- Sierra de cortar madera
- Prensa botánica
- Libretas de campo
- Etiquetas para muestra
- Fichas de colección y envío de muestras al laboratorio
- Cámara fotográfica
- Caja de cartón
- Plumón indeleble
- Cinta adhesiva

### **3.2.3. Material y equipo de laboratorio**

- Horno horizontal de carbonización  
Modelo: Tube Furnace
- Dispensador de nitrógeno  
Modelo: 32907 – 63
- Horno mufla  
Modelo: KL – 05/12
- Espectrofotómetro  
Modelo: Spectroquant pharo 300 e UV-VIS
- Fotómetro Multiparamétrico  
Modelo: HI 83200
- Estufa  
Modelo: BINDEK – BI0496

- pHmetro portátil WTW  
Modelo: pH 3210 SET 2
- Agitador orbital  
Modelo: GFL – 3015
- Balanza analítica  
Modelo: ABK – 210
- Compresor de aire
- Agitadores magnéticos
- Balón de nitrógeno gas
- Juego de Tamices
- Cocina eléctrica
- Beakers o vasos de precipitado de 100ml, 250 ml y 500 ml
- Probetas graduadas de vidrio de 50 ml y 100 ml
- Pipetas graduadas de vidrio de 10 ml
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml
- Balón de base plana de 2 L
- Fiolas de vidrio de 250 ml
- Tubos de ensayo de 30 ml
- Micropipetas Eppendorf
- Bomba de succión
- Placas Petri
- Crisoles
- Gradilla
- Espátula
- Jeringas de 20 ml
- Tijeras
- Cronómetro
- Cloruro de zinc –  $ZnCl_2$  1:1
- Ácido clorhídrico – HCl 0.5N
- Ácido sulfúrico –  $H_2SO_4$  cc
- Hidróxido de Sodio – NaOH 1N
- Reactivo DPD HI 93701-0 (polvo)

- Azul de metileno
- Agua destilada
- Papel aluminio
- Papel filtro
- Bolsas herméticas
- Papel toalla
- Muestras de agua potable
- Guantes de látex
- Mascarilla
- Guardapolvo

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Trabajo de campo

En esta etapa del trabajo se realizó la recolección de las muestras hasta su transporte al laboratorio, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

##### A. Identificación del punto para recolección de muestras

Se buscó 4 árboles maduros de *Acacia macracantha* “huarango” en los sectores de La Represa, Yanaquero, Quebrada del Oso y La Toma, teniendo en cuenta las características fisiomorfológicas propias de esta especie, y además con DAP promedio de 10 cm, buen porte y estado sanitario, troncos rectos y altura promedio de 3m.



Figura 1: Árboles de *Acacia macracantha* seleccionados

Con ayuda de un GPS se georreferenció la ubicación de cada uno de los árboles y posteriormente se trasladó estas coordenadas a un mapa a través del programa ArcGIS. Seguidamente se procedió a recoger muestras de ramas con flores y frutos de cada uno de los árboles para llevarlos al herbario de la Universidad Nacional de Cajamarca donde se confirmaría que las muestras corresponden a la especie *Acacia macracantha*, tal como se puede ver en el Anexo 1.

##### B. Recolección de la muestra

Para esto se siguió las recomendaciones establecidas en las norma COPANT 458, por lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Se cortó el tronco principal del árbol identificado a una altura de 1.5 m a partir del suelo, con el empleo de herramientas manuales de uso común en la zona.



**Figura 2:** Medición de la altura para corte

- Posteriormente se retiró las ramas del árbol dejando el tronco libre del fuste para extraer la muestra.



**Figura 3:** Tronco libre de ramas y hojas

- De cada árbol se extrajeron 2 muestras de 15 cm cada una, las cuales fueron correctamente etiquetadas, indicando las características del árbol de procedencia y de la propia muestra.



**Figura 4:** Extracción de las muestras y etiquetado

- Se cubrieron ambos extremos de cada una de las muestras y se envolvieron en plástico con el fin de evitar la disminución acelerada del contenido de humedad, evitando así su agrietamiento.





**Figura 5:** Muestra embalada y etiquetada

### C. Transporte al laboratorio

Las muestras recolectadas y correctamente identificadas, fueron colocadas en una caja e inmediatamente se procedió a su transporte al laboratorio de la Universidad Nacional de Tumbes, donde se realizaron los demás pasos contemplados en el marco de la presente investigación.



**Figura 6:** Muestras listas para envío al laboratorio

### 3.3.2. Trabajo de laboratorio

#### A. Producción del carbón activado

Las muestras de *Acacia macracantha* seleccionadas fueron sometidas a un proceso de activación química utilizando cloruro de zinc, siguiendo el procedimiento de la figura 7 propuesto por Cruz *et al.* (2012).



**Figura 7:** Diagrama de flujo de producción de carbón activado utilizando ZnCl<sub>2</sub> como agente químico de activación

Antes de iniciar con el trabajo de laboratorio propiamente dicho, y por requerimiento de la presente investigación, se procedió a triturar las muestras de madera de *Acacia macracantha* “huarango”, hasta alcanzar finas partículas.

El procedimiento comenzó con el secado del material en una estufa a una temperatura de entre 80 y 100 °C, durante un periodo de 24 horas hasta alcanzar peso constante.



**Figura 8:** Secado de la muestra

Luego el material seco y molido se hizo pasar a través de un juego de tamices de abertura de 1 mm y 0.5 mm, desechando el material de tamaño de partícula mayor a 1 mm y menor a 0.5 mm, quedándonos con la fracción de material que quedo entre ambos tamices; es decir, entre 0.5 mm y 1 mm.



**Figura 9:** Preparación de la muestra

Seguidamente se realizó el mezclado del material precursor o materia prima con el agente activador (cloruro de zinc) en una proporción de 1/1 en peso (materia prima/agente activador).



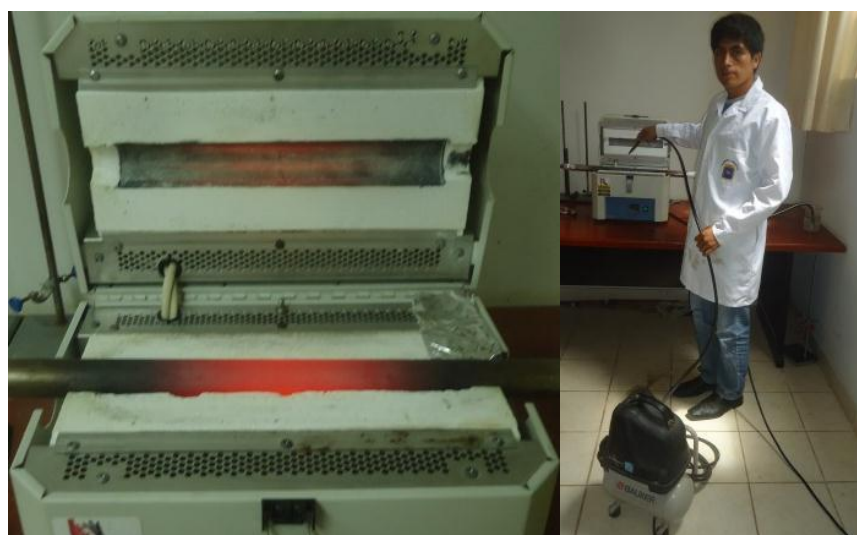
**Figura 10:** Mezclado del material precursor con el agente activante

Luego la muestra mezclada con el agente activante fue colocada en un reactor con inyección de nitrógeno (para conseguir una atmósfera inerte) a la temperatura de 600 °C, durante un tiempo de 3 horas, que es donde se produce el proceso de activación.



**Figura 11:** Sistema de producción de carbón activado (Balón de nitrógeno gas + Dispensador de nitrógeno + Horno horizontal + Recipiente para recuperación del agente activante)

Luego el reactor con el material será enfriado con aire frío hasta que el equipo alcance una temperatura próxima a los 40 °C para poder retirar el carbón activado producido.



**Figura 12:** Proceso de enfriamiento del equipo de carbonización



**Figura 13:** Carbón activado en bruto producido

Una vez producido el carbón activado, se procedió a su lavado con solución de HCl (0.5 N), por tres veces con una duración de 30 minutos cada una; para retirar los restos de agente activante que bloquea los poros limita la capacidad adsortiva del producto.



**Figura 14:** Lavado del carbón activado con HCl 0.5N

Luego se lavó con agua destilada hervida a 100°C unas 30 repeticiones por un tiempo de 15 minutos cada una, para seguir retirando los materiales que pudieran estar obstruyendo los poros y la vez regular el pH hasta un promedio de 6 a 7.



**Figura 15:** Lavado del carbón activado con agua destilada hervida

Posteriormente el carbón activado lavado fue sometido a un proceso de secado en una estufa, a 100°C por un período de 48 horas.



**Figura 16:** Secado del carbón activado lavado



Finalmente el carbón activado limpio y seco fue tamizado para obtener carbón activado en polvo, por lo que se utilizó un tamiz con tamaño de abertura de 0.25 mm.



Figura 17: Tamizado del carbón activado limpio

## B. Caracterización del carbón activado

Para el carbón activado producido a partir de madera de *Acacia macracantha* “huarango”, se determinaron las siguientes características:

- Rendimiento del material precursor

El rendimiento del material precursor fue calculado teniendo los datos del proceso de producción del carbón activado y luego a través del desarrollo de la siguiente ecuación:

$$R(\%) = \frac{PF}{PI} \times 100$$

Dónde:

- R : Representa el rendimiento en porcentaje
- PF : Es el peso final después del proceso de carbonización
- PI : Es el peso inicial de la materia prima que fue usada antes de la adición del agente químico activador

- Humedad del carbón activado

La humedad se determinó por el método gravimétrico, colocando a 0.5 g de carbón activado a una estufa por un período de 24 horas a una temperatura de 100 °C, y luego resolviendo la siguiente ecuación:

$$H(\%) = \frac{Pi - Pf}{Pi} \times 100$$

Dónde:

H (%) : Porcentaje de humedad

P<sub>i</sub> : Es el peso inicial antes del proceso de secado

P<sub>f</sub> : Es el peso final luego del proceso de secado

- Contenido de ceniza del carbón activado

El contenido de cenizas se determinó siguiendo el método estándar ASTM, procedimiento D2866-94, para lo cual se realizó los siguientes pasos:

Se colocó el crisol en la estufa a 80 °C durante 1 h, hasta que esté totalmente seco.

Luego se llevó el crisol al desecador, para que se enfríe a temperatura ambiente y se tomó su peso.

Se secó una muestra adecuada de carbón activo hasta peso constante a 150 °C.

Se pesó 0.5 g de carbón activado seco en el crisol y se colocó en el horno de mufla a 650 °C. La incineración requirió de 3h (el tiempo normal esta entre 3 y 16 h dependiendo del tamaño y el tipo de carbón activado, la incineración puede considerarse completa cuando se alcanza un peso constante).

Luego se colocó el crisol en un desecador y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Finalmente se pesó el crisol con las cenizas y con los datos se calculó el contenido de ceniza a través de la fórmula que se describe a continuación:

$$\text{Cenizas totales (\%)} = [(D - B) / (C - B)] \times 100$$

Dónde:

B = peso del crisol, g

C = peso del crisol más la muestra original, g

D = peso del crisol más la muestra incinerada, g

- Área superficial BET, Área superficial de Langmuir, Volumen de poros, Tamaño promedio de poros


Para determinar estos parámetros se envió una muestra de 1 g del carbón activado producido al laboratorio de análisis de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se utilizó un analizador de superficie y porosidad - Serie Gemini VII 2390. Esta opción es ideal para determinaciones rápidas y precisas del área superficial. También proporciona métodos estándar para: áreas de superficie de un solo punto y Langmuir, volumen de poro total y análisis de microporos mediante el método t. Las determinaciones se basan en los métodos estándar como ASTM D 6556, entre otros.

- Capacidad de adsorción

La determinación de la capacidad de adsorción se hizo a través de pruebas de equilibrio y cinética de adsorción.

La pruebas de equilibrio se realizó a través de un experimento en BATCH a pH 3; 4.5; 6 y 7.5 a un temperatura de 25°C, a una concentración constante del carbón activado obtenido (0.5 g/l) y una concentración de azul de metileno de 40; 60; 80 y 120 mg/l, colocando los matraces en el agitador orbital a 540 rpm durante 24 horas; para determinar el pH más apropiado.

**TABLA 4:** Disposición de las muestras en el agitador orbital, para la prueba de equilibrio

		pH			
		3	4.5	6	7.5
CONCENTRACIÓN (ppm)	120				
	80				
	60				
	40				



Con el pH que resulto ser más eficiente se realizaron las pruebas de cinética de adsorción, durante 4 horas para las concentraciones de 40; 60; 80 y 120 mg/l de azul de metileno, a las que se les agregó una concentración constante del carbón activado obtenido (0.5 g/l). Durante el tiempo de 4 horas las muestras fueron agitadas continuamente con un agitador magnético, y se sacaron alícuotas de 10 ml a los 0; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 90; 120; 150; 180; 210 y 240 min, a las cuales se les fue midiendo la concentración de azul de metileno removida.

### **C. Determinación de la remoción de cloro libre residual en agua potable**

Se realizó mediante el análisis químico fotométrico que se basa en la posibilidad de desarrollar un compuesto absorbente a partir de una reacción química específica entre la muestra y los reactivos. Dado que la absorción de un compuesto depende estrictamente de la longitud de onda del haz de luz incidente. Todo el procedimiento se realizó en la misma vivienda donde se tomó la muestra, pues el cloro es una sustancia bastante volátil. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- Se abrió el grifo, hasta que alcance su flujo máximo y se dejó correr el agua durante dos minutos (este procedimiento limpió la salida y descargó el agua que ha estado almacenada en la tubería).
- Se enjuagó el vaso de muestreo tres veces consecutivas antes de tomar la muestra definitiva.
- Inmediatamente se puso el frasco debajo del chorro de agua y se llenó con la cantidad deseada.
- Se analizó el cloro libre residual inmediatamente después de la toma de muestra, para ello se siguió el procedimiento indicado en el manual del Fotómetro Multiparamétrico HI 83200:
  - En primer lugar se seleccionó el método cloro libre en el equipo.
  - Se extrajo con una pipeta 10 ml de muestra y se trasladó hacia la cubeta que tiene una marca para esta cantidad y se clicó la tapa.

- Seguidamente se introdujo la cubeta en la célula de medición y se cerró la tapa.
  - Pulsamos la tecla ZERO, y aparece -0,0- lo que indica que el equipo está listo para la medición.
  - Retiramos la cubeta.
  - Añadimos el contenido de un sobre de reactivo DPD HI 93701-0, colocamos la tapa y agitamos durante unos 20 segundos.
  - Introducimos la cubeta en la célula de medición y pulsamos la tecla TIMER, en el display se mostró la cuenta atrás de 1 minuto. Una vez terminada la cuenta, el instrumento realizó la lectura. Se muestran los resultados en mg/L de cloro libre.
- Una vez que se comprobó que el agua si tiene cloro libre residual, se extrajo del recipiente en el que se recolectó la muestra 100 ml del agua y se depositó en un matraz de 250 ml.
  - Se añadió inmediatamente el carbón activado de tamaño de partícula menor a 0.25 mm, teniendo en cuenta la proporción de 0.5 g/L.
  - Al mismo tiempo se colocó el matraz con la muestra a un agitador magnético, programándole la mínima cantidad de RPM del equipo.
  - Luego se extrajo una alícuota de 10 ml a los 5 minutos.
  - Esta muestra se hizo pasar a través de papel filtro para retener el carbón activado y recoger únicamente la muestra de agua en un tubo de ensayo.
  - Una vez que se culminó con el paso anterior se procedió inmediatamente a medir la concentración de cloro siguiendo el procedimiento indicado en el manual del Fotómetro Multiparamétrico HI 83200.
  - Esto se repitió a los 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos.

Las pruebas se realizaron en 10 viviendas urbanas de la ciudad de Celendín, las cuales accedieron a la toma de muestra y brindaron las facilidades para realizar el procedimiento de determinación de la remoción de cloro libre residual.

Asimismo para verificar la influencia de remoción, del carbón activado en relación a la dechloración por aireación, se realizó el mismo procedimiento con dos muestras sintéticas realizando las mediciones correspondientes por un periodo de 2 horas.

Posteriormente se determinó el porcentaje de remoción de cloro libre residual a través de la siguiente fórmula:

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

Para evaluar la cinética de adsorción se utilizó el modelo de cinética de 2° pseudo orden.

### **3.3.3. Trabajo de gabinete**

En esta etapa se realizó el procesamiento de la información, el análisis de los datos obtenidos durante el trabajo de campo y de laboratorio, así como su respectiva interpretación.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización del carbón activado

#### 4.1.1. Rendimiento del material precursor

TABLA 5: Rendimiento de la madera de *Acacia macracantha* para producción de carbón activado

ESPECIE	MADERA			CARBÓN ACTIVADO			Rendimiento de Carbón Activado %
	humedad	Carga húmeda	Carga seca	humedad	Producto húmedo	Producto seco	
	%	g	g	%	g	g	
<i>Acacia macracantha</i>	26.60	245.30	180.00	12.08	69.15	60.80	33.80

En los resultados obtenidos del proceso de conversión de la madera de *Acacia macracantha* en carbón activado mostrados en la tabla 5, se ve que esta madera presenta un alto rendimiento (33.8%) a comparación de la madera de otras especies, tales como las de Quinilla, Shihuahuaco y Capirona estudiadas por Gonzales y Teruya (2004), quienes determinaron que estas especies tienen un rendimiento de 17.9%, 15.6% y 26.8% respectivamente. Asimismo a nivel de laboratorio analizaron aserrín de madera Tornillo, Manchinga y Caoba, obteniendo rendimientos promedio de 27.3 %, 21.1 % y 23.0% respectivamente.

#### 4.1.2. Humedad del carbón activado

TABLA 6: Contenido de humedad del carbón activado

CODIGO DEL PRODUCTO	DATOS INICIALES		DATOS FINALES		HUMEDAD %
	Peso muestra húmeda		Peso muestra seca		
	g		g		
CA – AM*	0.5007		0.4402		12.08

\* CA – AM: Carbón activado a partir de *Acacia macracantha*

Comparando el resultado obtenido en la Tabla 6, con el valor establecido en la NTP 311.331, que establece la humedad en carbones activados debe ser como máximo del 12%, se puede decir que el carbón activado producido cumple con este parámetro aunque de forma ajustada, lo cual no influye en la calidad aunque si en la cantidad, pues disminuye la cantidad de carbón neto.

### 4.1.3. Contenido de ceniza del carbón activado

TABLA 7: Contenido de cenizas del carbón activado

CÓDIGO	DATOS INICIALES		DATOS FINALES		CONTENIDO DE CENIZA
	Peso crisol + muestra	Peso muestra (CA)	Peso crisol + ceniza	Peso ceniza	
	g	g	g	g	%
CA-AM 1	35.2980	0.5000	34.7996	0.0016	0.32
CA-AM 2	34.5242	0.5002	34.0254	0.0014	0.28
PROMEDIO					0.30

El contenido de cenizas del carbón activado producido calculado en la Tabla 7 es 0.30%, una cantidad bastante baja en comparación con el parámetro indicado en la NTP 311.331, que señala una cantidad máxima de 12%. Esto indica que la calidad del carbón activado en cuanto a esta característica es buena para el tratamiento de agua, pues generalmente un alto porcentaje indica presencia de impurezas que influyen negativamente en la capacidad de adsorción y otras propiedades.

Comparado con el contenido de cenizas de carbones activados producidos a partir de otras materias primas, es bastante bajo, pues tenemos por ejemplo que el carbón activado producido a partir de torta de higuera con  $K_2CO_3$  por parte de Ospina *et al.* (2014), presenta un contenido de cenizas entre 7.55 y 23.63% para las proporciones de 1:1 y 2:1 de agente activante respectivamente; en tanto que el carbón activado producido a partir de semillas de eucalipto con  $H_3PO_4$  a concentraciones de 30% y 80% v/v de agente activante, por parte de Mojica *et al.* (2012), presenta un contenido de cenizas de 3.61 y 1.81% respectivamente; mientras que el carbón activado producido por Gonzales y Teruya (2004), a partir de madera de quinilla, shihuahuaco y capirona con  $H_3PO_4$ , presenta contenidos de ceniza de 12.1, 32.3, y 17.1% respectivamente.

#### 4.1.4. Caracterización del área superficial y porosidad

**TABLA 8:** Características del área superficial, porosidad y pH del carbón activado de *Acacia macracantha*

CODIGO DE LA MUESTRA	$S_{BET}$	$S_{Langmuir}$	$S_{meso}$	$V_{micro}$	$V_{net}$	$V_{micro}/V_{net}$	$T_p$	<i>pH</i>
	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> liq.g <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> liq.g <sup>-1</sup>	%	nm	
CA - AM	1480	2178	743	0.38	0.77	49	1.13	5.90

$S_{BET}$  (m<sup>2</sup>/g): área superficial según el método BET (Brunauer - Emmett - Teller).

$S_{Langmuir}$  (m<sup>2</sup>/g): área superficial según el método de Langmuir

$S_{meso}$  (m<sup>2</sup>/g): área superficial de la región mesoporosa

$V_{micro}$  (cm<sup>3</sup>liq.g<sup>-1</sup>): Determinación del volumen de poros por altas presiones de introducción de mercurio.

$V_{net}$  (cm<sup>3</sup>liq.g<sup>-1</sup>): Volumen total de poros determinado de la adsorción de nitrógeno a la máxima presión.  $p/p^0$  (~0.98036)

$V_{micro}/V_{net}$  (%): porcentaje de porosidad del carbón activado, obtenido de la relación entre el volumen de los microporos y el volumen total.

$T_p$  (nm): Tamaño promedio de poro.

*pH*: potencial de hidrogeno del carbón activado.

En la tabla 8 se puede visualizar la alta área superficial que presenta el carbón activado, así como también que gran parte corresponde a la superficie de los mesoporos con poco más de la mitad del área total. El porcentaje de porosidad también es elevada y revela que el carbón activado obtenido ha desarrollado una alta porosidad durante el proceso de activación. En tanto que el tamaño promedio de poros indica que el carbón activado producido bajo las condiciones de activación es microporoso, lo que lo convierte en apto para aplicaciones en medio líquido. En referencia al pH, el producto cumple con las condiciones establecidas en la NTP 311.331 sobre tratamiento de agua potable con carbón activado, pues indica que el pH del carbón activado debe estar en el rango entre 5.5 y 7.5; aunque influye en los primeros litros de agua tratada, estabilizándose a medida que pase el agua por la superficie porosa.

#### 4.1.5. Capacidad de adsorción

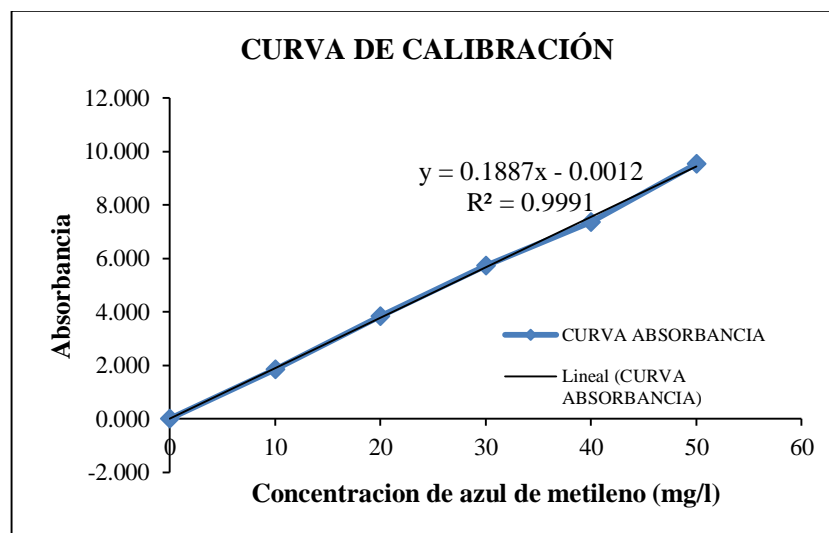
La determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado producido a partir de madera de *Acacia macracantha* se hizo con azul de metileno a través de pruebas de equilibrio y cinética, obteniendo los resultados mostrados a continuación:

## A. Curva de calibración para azul de metileno

**TABLA 9:** Medición de la absorbancia para concentraciones conocidas a fin de construir la curva de calibración

CONCENTRACIÓN (mg/L)	ABSORBANCIA
0	0.000
10	1.856
20	3.834
30	5.722
40	7.352
50	9.534

Para determinar la concentración de azul de metileno en una muestra cualquiera, es necesario construir la curva de calibración que señale la relación entre concentraciones conocidas y su respectiva absorbancia, determinada por la lectura en el espectrofotómetro. Dichas mediciones se realizaron a una longitud de onda de 664 nm que es la apropiada para el azul de metileno.



**Figura 18:** Curva de calibración para azul de metileno

A partir de la figura 18 se puede determinar que la ecuación que relaciona la concentración de azul de metileno con la absorbancia es:

$$y = 0.1887x - 0.0012$$

Dónde:

y: Absorbancia

x: Concentración de azul de metileno

## B. Prueba de equilibrio

**TABLA 10:** Prueba de equilibrio con azul de metileno

CÓDIGO DEL CARBÓN ACTIVADO	pH Inicial	pH Final	Dosis de carbón activado	Concentración Inicial Azul de metileno	Concentración final Azul de metileno	% Remoción
			(gL <sup>-1</sup> )	(ppm)	(ppm)	
CA - AM	2.97	4.82	0.5	40	0.030	99.93
	3.03	3.91		60	0.054	99.91
	3.07	3.64		80	0.081	99.90
	3.09	3.59		120	0.414	99.65
	4.53	5.46	0.5	40	0.031	99.92
	4.40	5.17		60	0.054	99.91
	4.59	4.92		80	0.075	99.91
	4.45	4.57		120	0.330	99.73
	5.91	6.75	0.5	40	0.024	99.94
	5.97	6.30		60	0.049	99.92
	6.00	6.03		80	0.083	99.90
	6.06	5.85		120	0.293	99.76
	7.58	7.54	0.5	40	0.007	99.98
	7.47	6.95		60	0.038	99.94
	7.52	6.58		80	0.017	99.98
	7.58	5.82		120	0.160	99.87

En la prueba de equilibrio se pudo determinar que el carbón activado producido a partir de madera de *Acacia macracantha*, presenta una alta eficiencia en la remoción de azul de metileno, removiendo concentraciones superiores a 99%, aun con las altas concentraciones iniciales, tal como se muestra en la Tabla 10; sin embargo, el pH al cual el carbón activado incrementa su eficiencia es 7.5, esto se reduce a medida que los pH son más ácidos, lo cual se visualiza mejor en la figura 19. En tanto que el pH final de las muestras varía hasta niveles próximos al pH del carbón activado (5.90), de acuerdo a lo que se puede ver en las figuras 20, 21, 22 y 23.



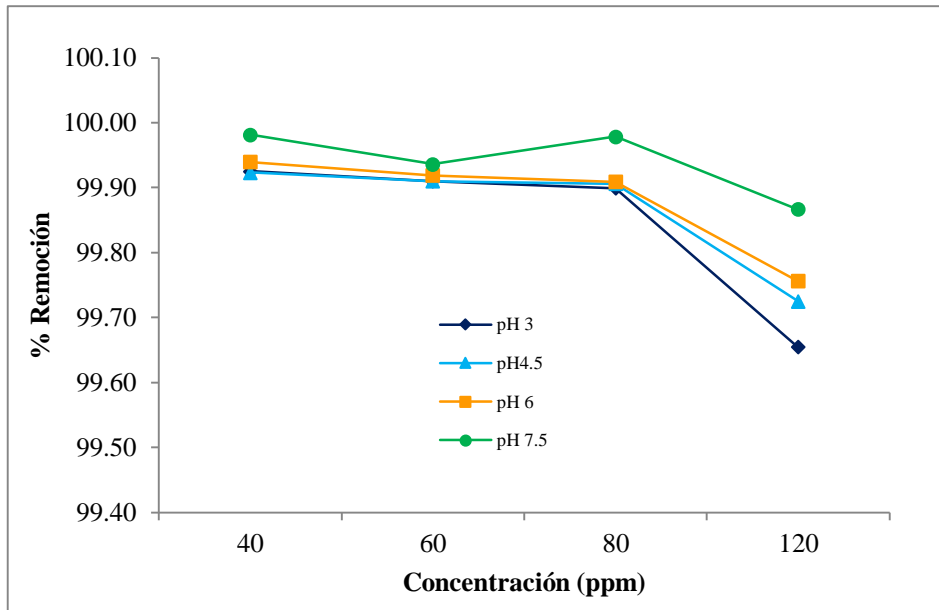


Figura 19: Porcentaje de remoción de azul de metileno en la prueba de equilibrio

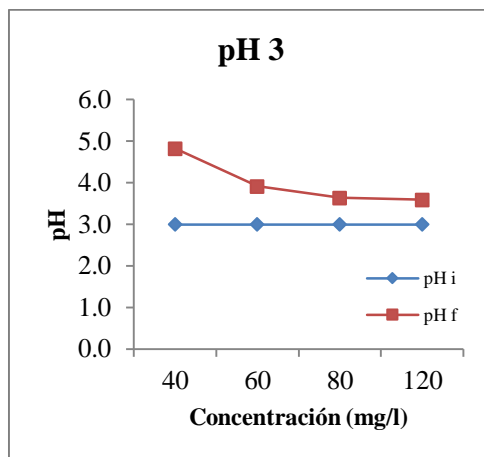


Figura 20: Variación del pH 3 en la PE

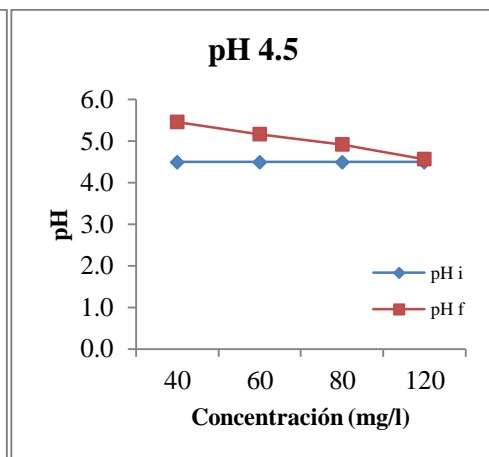


Figura 21: Variación del pH 4.5 en la PE

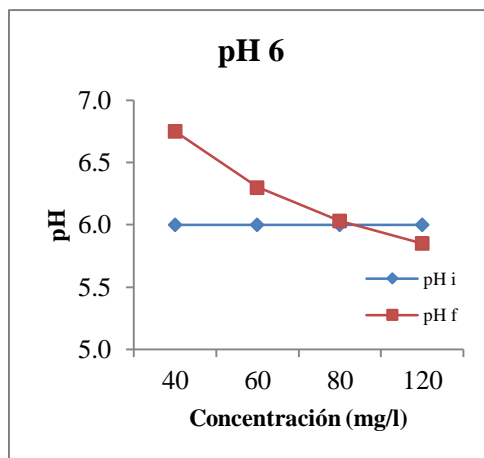


Figura 22: Variación del pH 6 en la PE

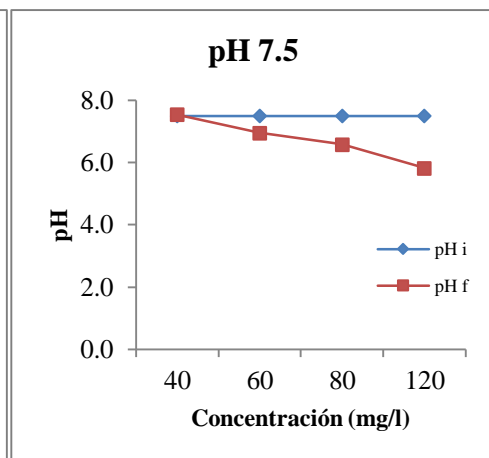


Figura 23: Variación del pH 7.5 en la PE

### C. Prueba de cinética de adsorción

**TABLA 11:** Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 40 mg/L de azul de metileno

<b>Tiempo</b>	<b>pH</b>	<b>Dosis de carbón activado</b>	<b>Concentración de azul de metileno</b>	<b>Remoción</b>
<b>min</b>		<b>g/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>%</b>
0			39.00	0.00
5			13.00	66.67
10			8.10	79.23
15			7.00	82.05
20			5.00	87.18
30			2.50	93.59
40			1.40	96.41
50	7.500	0.50	0.50	98.72
60			0.20	99.49
90			0.05	99.87
120			0.00	100.00
150			0.00	100.00
180			0.00	100.00
210			0.00	100.00
240			0.00	100.00

**TABLA 12:** Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 60 mg/L de azul de metileno

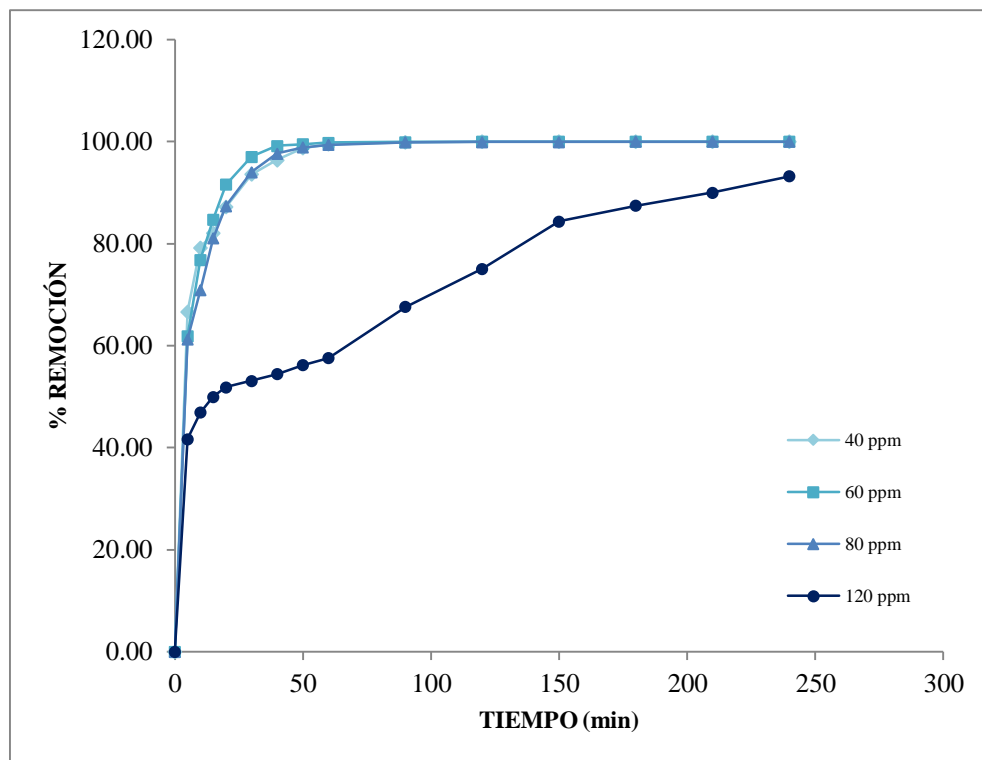
<b>Tiempo</b>	<b>pH</b>	<b>Dosis de carbón activado</b>	<b>Concentración de azul de metileno</b>	<b>Remoción</b>
<b>min</b>		<b>g/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>%</b>
0			60.40	0.00
5			23.00	61.92
10			14.00	76.82
15			9.20	84.77
20			5.10	91.56
30			1.80	97.02
40			0.50	99.17
50	7.5	0.5	0.30	99.50
60			0.10	99.83
90			0.05	99.92
120			0.02	99.97
150			0.00	100.00
180			0.00	100.00
210			0.00	100.00
240			0.00	100.00

**TABLA 13:** Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 80 mg/L de azul de metileno

<b>Tiempo</b>	<b>pH</b>	<b>Dosis de carbón activado</b>	<b>Concentración de azul de metileno</b>	<b>Remoción</b>
<b>min</b>		<b>g/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>%</b>
0			80.80	0.00
5			31.30	61.26
10			23.50	70.92
15			15.30	81.06
20			10.20	87.38
30			4.80	94.06
40			1.90	97.65
50	7.5	0.5	0.90	98.89
60			0.50	99.38
90			0.10	99.88
120			0.07	99.91
150			0.04	99.95
180			0.03	99.96
210			0.02	99.98
240			0.00	100.00

**TABLA 14:** Prueba de cinética de adsorción para la concentración inicial de 120 mg/L de azul de metileno

<b>Tiempo</b>	<b>pH</b>	<b>Dosis de carbón activado</b>	<b>Concentración de azul de metileno</b>	<b>Remoción</b>
<b>min</b>		<b>g/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>%</b>
0			119.3	0.00
5			69.53	41.71
10			63.28	46.96
15			59.68	49.98
20			57.40	51.89
30			55.92	53.13
40			54.33	54.46
50	7.5	0.5	52.21	56.24
60			50.62	57.57
90			38.59	67.66
120			29.68	75.12
150			18.61	84.40
180			14.97	87.45
210			11.94	90.00
240			8.10	93.21



**Figura 24:** Cinética de adsorción con azul de metileno

Para cualquiera de las concentraciones estudiadas y cuyos resultados se muestran en las tablas 11, 12, 13 y 14, y en la figura 24, la adsorción es bastante rápida en los primeros 5 minutos de exposición, con más de 60% remoción para las concentraciones de 40, 60, 80 ppm y un poco más de 40% para la concentración de 120 ppm de azul de metileno, esto se debe a que al inicio toda el área superficial está disponible para adsorber al adsorbato, mientras que con el transcurso del tiempo el proceso se va haciendo más lento debido a la saturación del carbón activado. Para las tres primeras concentraciones analizadas en el tiempo de 4 horas se llega a adsorber el 100% de azul de metileno, siendo más rápido el de menor concentración y decrece a medida que se incrementa la concentración inicial, mientras que para la concentración más elevada solo se llega a adsorber un 93% en todo el tiempo debido a la alta concentración de adsorbato.

#### D. Isotermas de adsorción

- Modelo de pseudo primer orden

**TABLA 15:** Ajuste al modelo de pseudo primer orden para Azul de metileno

Adsorbato	Concentración mg/L	Código del CA	Dosis de CA g/L	pH	R <sup>2</sup>
AZUL DE METILENO	40	CA - AM	0.5	7.5	0.9791
	60				0.9555
	80				0.8830
	120				0.9504

En la tabla 15 se puede observar según el coeficiente de correlación que los datos obtenidos no se ajustan correctamente al modelo de pseudo primer orden.

- Modelo de pseudo segundo orden

**TABLA 16:** Ajuste al modelo de pseudo segundo orden para Azul de metileno

Adsorbato	Concentración n mg/L	Código del CA	Dosis de CA g/L	pH	q <sub>e</sub> mg/g	H	K <sub>2</sub> g/(mg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
AZUL DE METILENO	40	CA-AM	0.5	7.5	78.74	40	0.0065	0.999 9
	60				121.9	77.5	0.0052	0.999 9
	80				163.9	74.0	0.0028	0.999 8
	120				227.2	11.4	0.0002	0.978 3

**q<sub>e</sub>**: cantidad de adsorbato en solución adsorbido en equilibrio (mg azul de metileno/g CA)

**H**: constante equivalente a  $K_2q_e^2$

**K<sub>2</sub>**: constante de velocidad de pseudo-segundo orden (g CA/mg azul de metileno x min)

**R<sup>2</sup>**: coeficiente de correlación

En la tabla 16 se puede observar según el coeficiente de correlación que los datos obtenidos se ajustan correctamente al modelo de pseudo segundo orden. Asimismo se puede ver que la capacidad de adsorción calculada para el equilibrio es equivalente a la concentración inicial de adsorbato, excepto en la concentración de 120 mg/l donde es un poco menor debido a en el ensayo de cinética no se llega a adsorber el 100%. En cuanto a la constante de

velocidad se observa que esta se reduce a medida que se incrementa la concentración del adsorbato.

## 4.2. Determinación de la remoción de cloro libre residual

### 4.2.1. Medición de cloro libre residual en la red de agua potable de la ciudad de Celendín

TABLA 17: Cloro libre residual en la red de agua potable de la ciudad de Celendín

PUNTO DE MUESTRO	FECHA	HORA	COLORO LIBRE RESIDUAL (mg/L)
PM 1	14/12/2016	08:38 a.m.	0.83
PM 2	14/12/2016	04:10 p.m.	0.40
PM 3	15/12/2016	08:42 a.m.	0.23*
PM 4	15/12/2016	10:48 a.m.	0.60
PM 5	15/12/2016	05:30 p.m.	0.90
PM 6	16/12/2016	02:50 p.m.	0.74
PM 7	16/12/2016	05:50 p.m.	0.82
PM 8	17/12/2016	10:57 a.m.	0.72**
PM 9	18/12/2016	10:00 a.m.	0.55
PM 10	19/12/2016	09:24 a.m.	0.12
CC CLORO LIBRE RESIDUAL MAYOR			<b>0.90</b>
CC CLORO LIBRE RESIDUAL MENOR			<b>0.12</b>

\* Agua potable proveniente del reservorio de bello horizonte

\*\* Agua potable proveniente del reservorio el Guayao

De los puntos de muestreo (PM) mostrados en la tabla 17, solo tres de ellos presentan niveles de cloro residual por debajo del parámetro de 0.5 mg/L recomendado por la OMS y corresponden a puntos finales de la red de distribución y/o sistemas en los que el agua no se clora constantemente; mientras que en los 7 puntos restantes los niveles de cloro libre residual son muy superiores al límite indicado por el Organismo Mundial de la Salud.

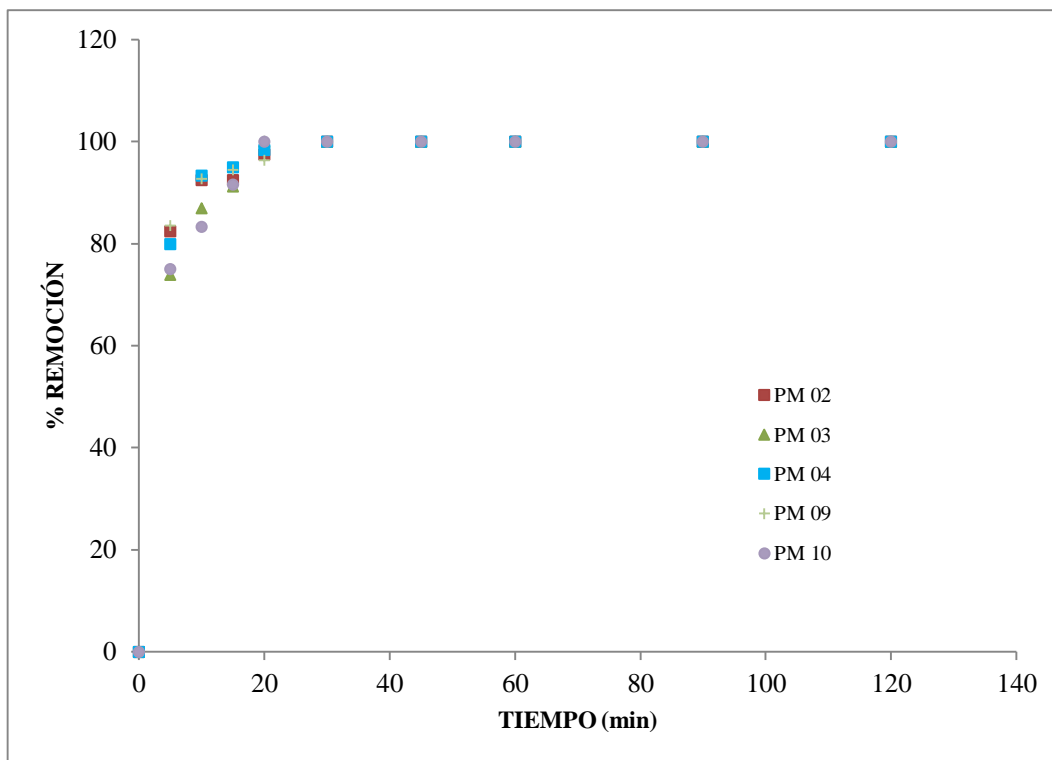
### 4.2.2. Porcentaje de remoción de cloro libre residual con carbón activado

Se realizó a través de pruebas de cinética de adsorción para dechloración con el uso de carbón activado producido con madera de *Acacia macracantha*, agregando una

dosis de 0.5g a un litro de agua. Los resultados obtenidos en cuanto a porcentajes de remoción se muestran en la tabla 18 y visualiza en las figuras 25 y 26.

**TABLA 18:** Porcentaje de remoción de cloro libre en la prueba de cinética de adsorción

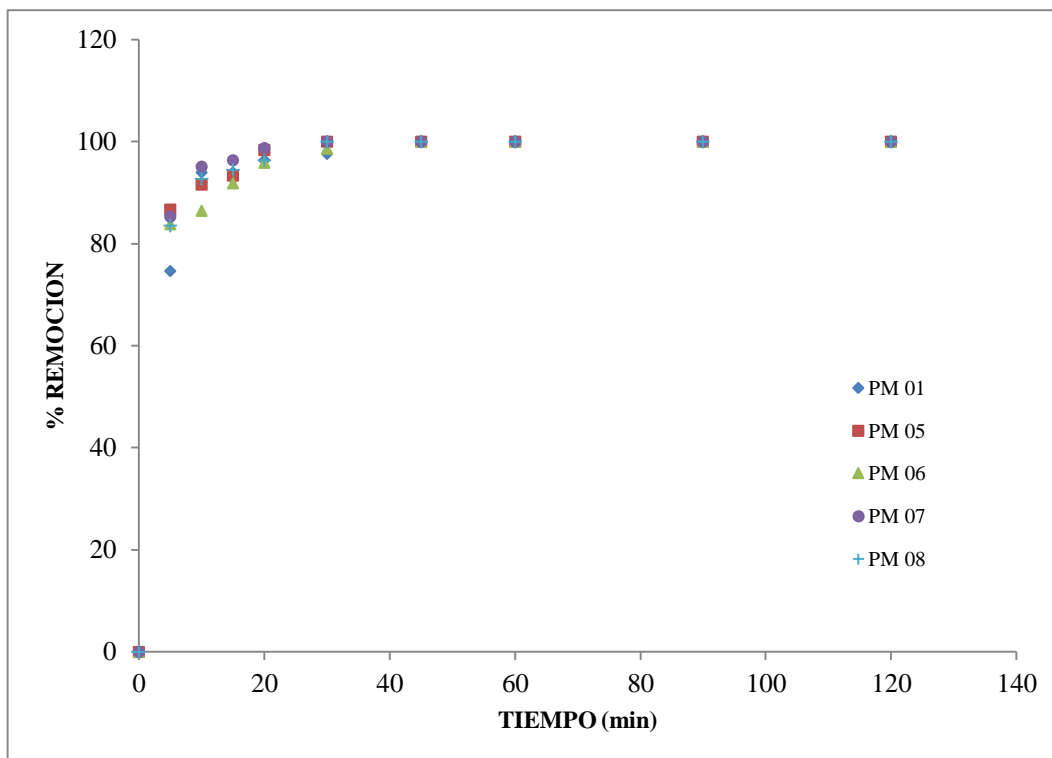
	<b>PORCENTAJE DE REMOCION DE CLORO LIBRE</b>									
	<b>TIEMPO (min)</b>									
	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>
<b>PM 01</b>	0	74.70	93.98	93.98	96.39	97.59	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 02</b>	0	82.50	92.50	92.50	97.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 03</b>	0	73.91	86.96	91.30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 04</b>	0	80.00	93.33	95.00	98.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 05</b>	0	86.67	91.67	93.33	98.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 06</b>	0	83.78	86.49	91.89	95.95	98.65	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 07</b>	0	85.37	95.12	96.34	98.78	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 08</b>	0	83.33	91.67	95.83	97.22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 09</b>	0	83.64	92.73	94.55	96.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>PM 10</b>	0	75.00	83.33	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



**Figura 25:** Porcentaje de remoción de cloro libre en muestras con concentración inicial  $\leq$  a 0.6 mg/L

En la figura 25 se puede notar que para concentraciones iniciales menores o iguales a 0.6 mg/L de cloro libre residual, los mayores porcentajes de remoción se producen en los primeros 5 minutos de añadido el carbón activado, con valores alrededor del 80% y la remoción al 100% se logró con tiempo de exposición de entre 20 y 30 minutos, a partir de este tiempo la concentración de cloro fue 0, lo que quiere decir que la remoción fue de 100% y no se presentó un proceso de desorción, debido a los enlaces que se forman entre el cloro y los grupos activos presentes en la superficie del carbón activado.





**Figura 26:** Porcentaje de remoción de cloro libre en muestras con concentración inicial > a 0.6 mg/L

En la figura 26 se muestran los porcentajes de remoción de cloro libre residual en muestras con concentración inicial mayor a 0.6 mg/L, donde la mayor parte se remueve en los primeros 5 minutos con porcentajes promedio de 80% y hacia los diez minutos ya se ha removido más del 90%, mientras que para lograr la remoción total se tarda entre 30 y 45 minutos, a partir de este tiempo la concentración de cloro fue 0, lo que quiere decir que la remoción fue de 100% y no se presentó un proceso de desorción, debido a los enlaces que se forman entre el cloro y los grupos activos presentes en la superficie del carbón activado.

### 4.2.3. Isotermas de adsorción

TABLA 19: Ajuste al modelo de pseudo segundo orden para Cloro libre

Adsorbato	Concentración	Código del CA	Dosis de CA	$q_e$	H	$K_2$	$R^2$
	mg/L		g/L	mg/g		$g/(mg^{-1} \cdot min^{-1})$	
Cl libre	0.83	CA - AM	0.5	1.67	2.02	0.7218	0.9999
	0.40			0.81	1.25	1.9269	0.9999
	0.23			0.46	0.53	1.8693	0.9997
	0.60			1.21	2.14	1.4677	0.9999
	0.90			1.81	5.07	1.553	1.0000
	0.74			1.49	1.68	0.7539	0.9998
	0.82			1.65	4.15	1.5276	1.0000
	0.72			1.45	2.57	1.2252	0.9999
	0.55			1.11	2.19	1.7874	0.9999
	0.12			0.24	0.26	4.4297	0.9997

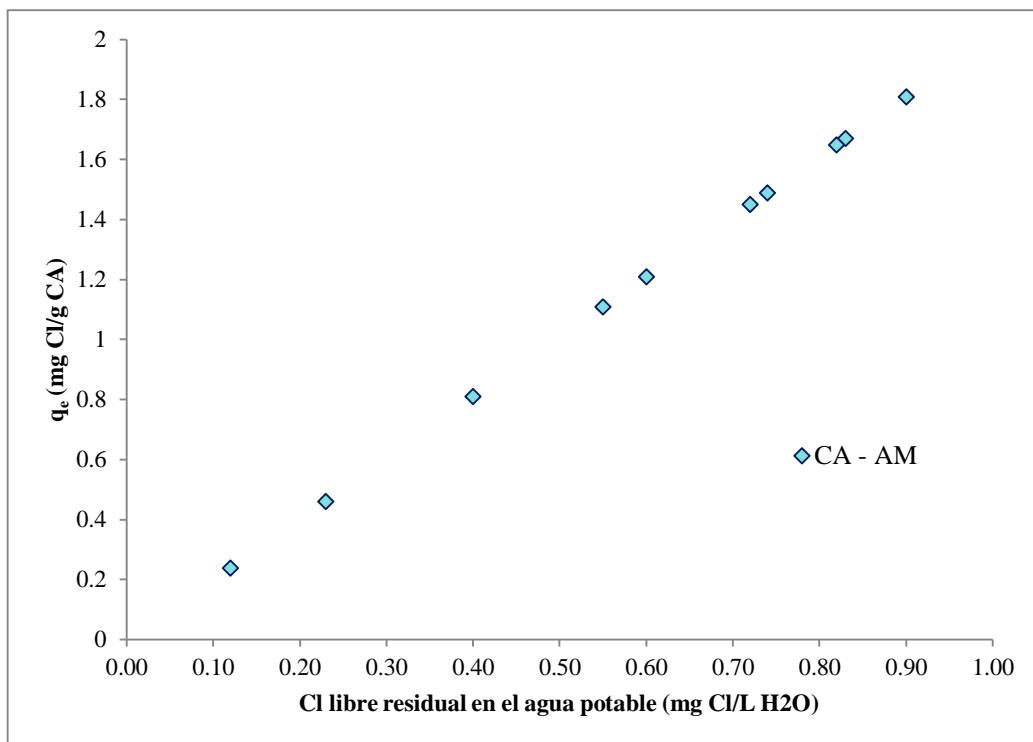
$q_e$ : cantidad de adsorbato en solución adsorbido en equilibrio (mg Cl/g CA)

$H$ : constante equivalente a  $K_2 q_e^2$

$K_2$ : constante de velocidad de pseudo-segundo orden (g CA/mg Cl x min)

$R^2$ : coeficiente de correlación

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 19, utilizando el modelo de cinética de segundo pseudo orden, se puede decir que la dosis de carbón activado de 0.5 g para 1 L de agua es buena pues logra remover el 100% de cloro libre residual en todas las muestras. La cantidad de adsorbato en solución adsorbido en el equilibrio, es proporcional a la concentración inicial pues el cloro libre fue adsorbido en su totalidad. Respecto a constante de velocidad, esta es inversamente proporcional a la concentración inicial de adsorbato; es decir, a bajas concentraciones de adsorbato la velocidad de adsorción es rápida mientras que a altas concentraciones de adsorbato va disminuyendo la velocidad de adsorción. En cuanto al coeficiente de correlación, este muestra que los datos obtenidos se ajustan correctamente al modelo de pseudo segundo orden, lo que indica que el mecanismo de remoción del adsorbente es la quimisorción a través de la ocupación de los sitios activos presentes en la superficie del carbón activado (Ho y McKay 1999).



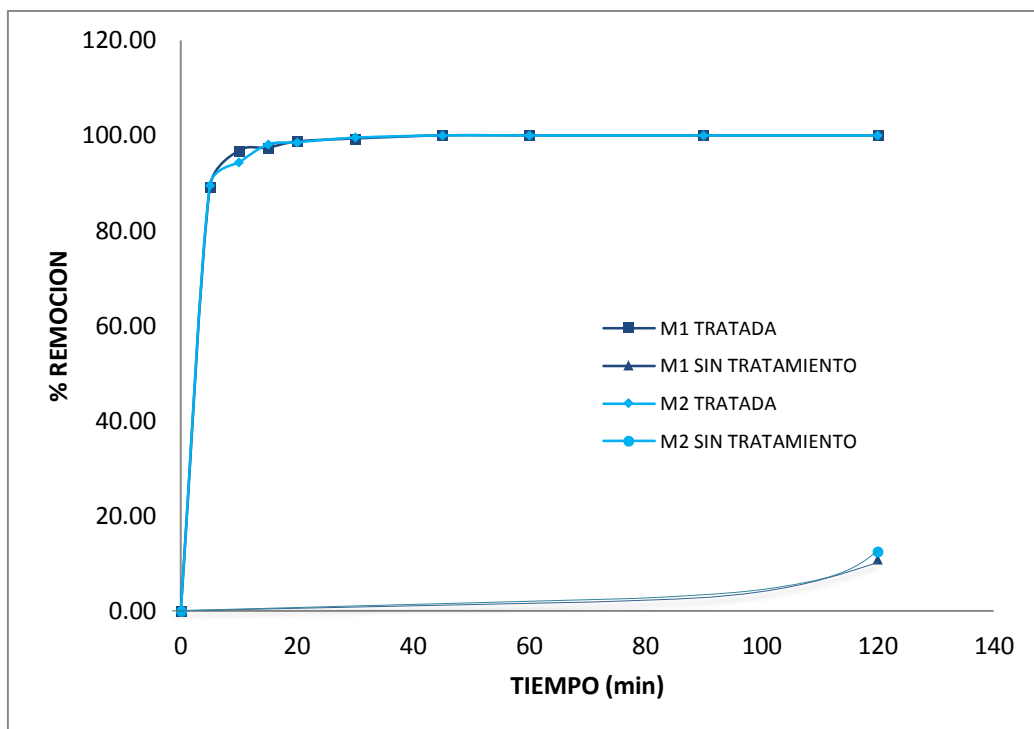
**Figura 27:** Isotherma de adsorción para el carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha*

En la figura 27 se muestra la relación entre las concentraciones iniciales de cloro libre residual y la capacidad de adsorción alcanzada en equilibrio por el carbón activado, notándose que esta va aumentando a medida que aumenta la concentración inicial del adsorbato; sin embargo, para las concentraciones analizadas el carbón activado no ha alcanzado su máxima eficiencia, lo que indica que el carbón activado puede remover concentraciones superiores de cloro residual. Asimismo comparado con otros tipos de carbones activados estudiados, el carbón producido de madera de *Acacia macracantha* es más eficiente pues supera ampliamente el valor de 1mg de Cl/g de CA, mientras que otros carbones como los estudiados por Noboa (2008), alcanzan un valor máximo de 0.8mg de Cl/g de CA.

#### 4.2.4. Comparación de la decloración con CA vs sin CA

En la figura 28 se puede visualizar el comportamiento de los procesos de decloración con la aplicación de carbón activado y sin la aplicación del adsorbente, comprobándose que la influencia del carbón activado es muy alta pues al añadir esta sustancia la decloración completa del agua se produce en un tiempo máximo de 30 minutos, mientras que al dejar el agua en reposo durante el tiempo que dura el experimento, únicamente se reduce la cantidad de cloro libre en entre

un 10 a 12% a pesar de que el volumen de agua es pequeño. Esto coincide con el experimento realizado por Noboa (2008), quien determinó que el agua en reposo necesita de por lo menos un tiempo de 14 horas para su dechloración completa por evaporación.



**Figura 28:** Remoción de cloro libre con tratamiento con carbón activado y sin tratamiento para soluciones sintéticas de concentración inicial de 1.56 ppm y 2.06 ppm

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* “huarango”, presenta un rendimiento de 33.8% lo que indica que esta especie es una buena materia prima para producir este producto adsorbente.
- Las características que presenta el carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* “huarango” bajo las condiciones de activación indicadas anteriormente son las siguientes: presenta un contenido de humedad de 12%; contenido de cenizas de 0.3%; un área superficial BET de 1480 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>; área superficial de Langmuir de 2178 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>; tamaño promedio de poros de 1.13 nm, es decir es un carbón activado microporoso; volumen de poros de 0.77 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>; un porcentaje de porosidad del 49%; y un valor de pH de 5.90, es decir ligeramente ácido.
- La capacidad de adsorción analizada con azul de metileno, nos permitió conocer que el carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* “huarango” presenta una mayor eficiencia a pH 7.5, lo cual es ideal pues la aplicación que se le pretende dar es para la purificación de agua potable, la cual debe presentar pH entre 6.5 y 8.5 según el Ministerio de Salud (2011). Asimismo para este colorante se logró su remoción en un 100% para concentraciones iniciales de 40, 60 y 80 ppm, y 93% para la concentración inicial de 120 ppm.
- La capacidad de adsorción del carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* “huarango” aplicada a la remoción de cloro libre residual en agua potable es altamente influyente, pues se alcanza porcentajes de remoción del 100% en un máximo de 45 min de exposición con una dosis de 0.5g-L<sup>-1</sup> de adsorbente, con un máximo de 80% en los primeros 5 minutos y luego disminuyendo a medida que se saturan los sitios activos.

### 5.2. Recomendaciones

- Analizar la capacidad de adsorción del carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* “huarango” para otros productos como colorantes, metales pesados, contaminantes de aguas residuales como nitratos y fosfatos, entre otros a fin de determinar su eficiencia y compararlo con carbones activados producidos a partir de otras materias primas.

## VI. BIBLIOGRAFIA

Agencia de Salud Pública. 2012. Los trihalometanos (THM) en el agua de consumo. Consorcio Sanitario de Barcelona. España. Consultado 18 Mar. 2016. Disponible en: [http://www.aspb.cat/quefem/docs/THM\\_esp.pdf](http://www.aspb.cat/quefem/docs/THM_esp.pdf).

Avella S, SV. 2011. Evaluación de la adsorción de iones de níquel de soluciones acuosas usando arcilla bentónica peletizada. Tes. Ing. Quim. Universidad Industrial de Santander. 45 p.

Bandosz, T. 2006. Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation. 1° Ed. New York – USA. Ed. ELSEVIER. 588 p.

Cantor KP, Hoover R, Hartge P, Mason TJ, Silverman DT. 1987. Bladder Cancer, Drinking Water Source, and Tap Water Consumption: A Case - Control Study. J Natl Cancer Inst. 79: 1269-1279.

Che G, Gamaliel. 2011. Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante adsorción en una zeolita natural. Tesis maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Cruz G, Pirilä M, Huuhtanen M, Carrión L, Alvarenga E, et al. 2012. Production of Activated Carbon from Cocoa (Theobroma cacao) Pod Husk. J Civil Environment Engg 2:109.

Droguett, SE. 1983. Elementos de Catálisis Heterogénea. Monografía N° 26, Washington D.C.: Secretaría General de la O.E.A. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. pp. 3-13.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1992. Compendio de especificaciones para aditivos alimentarios: Carbón activado. Consultado 18 feb. 2016. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agn/jecfa-additives/specs/Monograph1/Additive-006.pdf>

Fombuena, M y Valentín, A. 2010. Manual del carbón activo. Aguapedia. U. Sevilla. 89 p.

Galvín, R. M. 2015. Evolución de compuestos orgánicos y subproductos de desinfección en sistemas de potabilización de agua. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*, 28(183): 78-87.

Gomes, A; Klose, W y Rincon, S. 2010. Carbón activado de cuesco de palma: estudio de termogravimetría y estructura. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – Colombia. 123 p.

Gonzales M, HE y Teruya CH, R. 2004. Estudio de proceso de carbón activado: obtención por método químico. UNALAM. Lima – Perú. 60 p.

Hernández S, R; Fernández C, C y Baptista L, P. 1998. Metodología de la investigación. 2º ed. Mexico: McGRAW-HILL. 503 p.

Ho, YS y McKay, G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34: 451 – 465.

IARC (Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer). 1999. Monografías sobre la evaluación de los riesgos carcinogénicos para los humanos. Vol. 73. Francia.

Ioannidou O y Zabaniotou A. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 1966-2005.

Jiménez B, JM. 2014. Aprovechamiento de residuos celulósicos de piña para la producción de carbón activado. TESIS para acreditar Experiencia Educativa. México, Universidad Veracruzana. 54 p.

Lagergren, S. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar*, 24 (4): 1-39.

Lykins B, Clark R, Adams J. 1988. Granular Activated Carbon for Controlling THMs. *J. AWWA* 80: 85-92.

Martín, J. 1990. Adsorción física de gases y vapores por carbonos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante (Ed.). España. 116 p.



Marsh, H; Heintz, EA; Rodriguez Reinoso, F. 1997. Introduction to carbon Technologies. Publicaciones Universidad de Alicante. España. 669 p.

Martínez YA de, A. 2012. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. Tes. Doct. España. Universidad San Jorge. 215 p.

May, T. 2013. Plantas preferidas para leña en la zona de bosque seco de Pedro Santana y Bánica, República Dominicana. Aspectos etnobotánicos y de manejo sustentable. Ambiente y Desarrollo, 17(33), pp. 71-85.

Meier JR, Ringhand HP, Coleman WE. 1986. Mutagenic by-products from chlorination of humic acid. Environ. Health Perspect. 69, 101-107.

Melendreras R, F. 2015. Estudio de la formación de trihalometanos en las fases de elaboración de transformados vegetales y en procesos auxiliares de la industria alimentaria. Tes. Doct. España. Universidad de Murcia. 213 p.

Mestanza M, M. 2012. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Tes. Doct. España. Universidad Complutense de Madrid. 318 p.

Metcalf and Eddy, Inc. (2003) Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> Ed. New York, NY: McGraw-Hill.

MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2013. “Riquezas y biodiversidad de especies”. Consulta: 20 de Marzo de 2016. Disponible en: <http://dgffs.minag.gob.pe/index.php/riqueza-y-biodiversidad-de-especies>

MINSA (Ministerio de Salud). 2011. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA. Lima – Peru: Ministerio de Salud.

Mojica S, LC; Ramirez G, WM; Rincón S, NG; Blanco M, DA; Giraldo, L y Moreno P, JC. 2012. Síntesis de carbón activado proveniente de semillas de Eucalipto por activación física y química. Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia. pp. 203 – 210.

Montesdeoca, C. 2009. Determinación de Cloro Residual y Cloro Total. Folleto Técnico INDUQUIM ACI-004

Noboa V, E. 2008. Diseño de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable para uso en la industria farmacéutica. Tesis Ing. Quim. Ecuador, USFQ. 76 p.

Noll, KE; Gounaris, V; & Hou, W. 1992. Adsorption technology for air and water pollution control. Chelsea, Mich: Lewis Publishers.

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2004. Guidelines for drinking water quality, 3° Ed., OMS, Ginebra.

\_\_\_\_\_ 2006. Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1. N° 3. Ginebra (Suiza). 408 p.

\_\_\_\_\_ 2009. Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud: Medición del cloro residual en el agua. N° 3. Ginebra (Suiza). 4 p.

OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2001. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas: Agua Potable y Saneamiento, Estado Actual y Perspectivas. Washington, D.C.

Orellana, J. 2005. Unidad temática N° 6: Tratamiento de las Aguas. Universidad Tecnológica Nacional. Rosario – Argentina. pp. 123. Revisado el 21 de Mar. de 2016. Disponible en: [http://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing\\_sanitaria/Ingenieria\\_Sanitaria\\_A4\\_Capitulo\\_06\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas.pdf](http://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf).

Ospina G, VM; Buitrago S, R y López L, DP. 2014. “Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera”. Tecno Lógicas, vol. 17, no. 32, pp. 75 – 84.

Paredes D, AL. 2011. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña. Tesis Lic. Quim. Perú, PUCP. 118 p.

Pilamonta M, JV. 2013. Mejoramiento del carbón activado contaminado en el tratamiento del agua potable. Tesis Ing. Quim. Universidad Central del Ecuador. 157 p.

Reid R. 1998. Situación de la desinfección del agua en América Latina y el Caribe. Simposio regional sobre calidad de agua: desinfección efectiva. CEPIS/OPS (27 al 29 de octubre). Lima, Perú. Consultado 16 feb. 2016. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/simposio/ponen1.pdf>

Rocha C, E. 2010. Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas. Ed. Universidad Autónoma de Chihuahua. Mexico. 239 p.

Rodriguez, MJ; Vinette, Y; Sérodes, JB y Bouchard, C. 2003. Trihalomethanes in Drinking Water of Greater Québec Region (Canada): Occurrence, Variations and Modelling. *Environmental Monitoring Assessment*, 89 (1): 69-93.

Rouquerol, F; Rouquerol, J; Sing, K. 1999. Adsorption by powders and porous solids. London: Academic Press. pp. 237-285.

Sánchez Z, A. 2008. Efectos de los trihalometanos sobre la salud. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8. España. pp. 280-290.

Singer, PC. 1995. Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products. *Water Science Technology*, 40: 25-30.

Wang, GS; Deng, YC and Lin, TF. 2007. Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water. *The Science of the Total Environment*, 387: 86-95.

Whaley, OQ; Orellana, A; Pérez, E; Tenorio, M; Quinteros, F; Mendoza, M & Pecho, O. 2010. *Plantas y Vegetación de Ica, Perú – Un recurso para su restauración y conservación*. 1° Ed. Lima – Perú. Royal Botanic Gardens, Kew.

## VII. ANEXOS

### 7.1. Fichas de identificación de las muestras



#### DATOS DE CAMPO DEL ARBOL

##### 1.1. IDENTIFICACION

Fecha de selección ..... 05 - 08 - 2016 ..... N° de árbol ..... A-01 .....  
Nombre común ..... Huarango .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quino .....  
Nombre científico ..... Acacia macracantha Humboldt & Bonpland ex Willdenow .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quino .....  
Fecha de la toma de las muestras botánicas ..... 05 - 08 - 2016 .....  
Hojas  Ramitas  Corteza  Flores  Frutos   
Otros detalles ..... Ramas con presencia de espinas .....  
.....

##### 1.2. UBICACIÓN

Distrito ..... Celendin .....  
Zona ..... La Represa .....  
Carretera ..... Celendin - Llangat .....  
Coordenadas NORTE: 9246757 ..... Coordenadas ESTE: 812751 .....  
Otros detalles ..... Clima: calido con presencia de lluvias estacionales .....  
.....

##### 1.3 DESCRIPCIÓN

Clase: Dominante  Intermedia   
D.A.P. .... 12 ..... cms. Altura total .... 4 ..... m. Altura comercial .... 3 ..... m.  
Copa y follaje: Grande  Mediana  Pequeña   
Tipo de bosque: ..... Seco .....  
Forma del tronco: Aletones  Recto  Torcido   
Cilíndrico  Excéntrico   
Tipo de corteza: Externa: Color: Marron oscura Superficie: ..... Rugosa .....  
Espesor .... 28 ..... cms. Espinosa: ..... Solo en las ramas .....  
Interna: Color: Amer. y rojo Olor ..... Sabor .....  
Exudaciones: Laca  Resina   
Goma  Colorante   
Otros detalles .....  
.....

Firma de la persona responsable de la identificación

Firma de la persona responsable de la toma de muestra





### DATOS DE CAMPO DEL ARBOL

#### 1.1. IDENTIFICACION

Fecha de selección ..... 05 - 08 - 2016 ..... Nº de árbol ..... A-02 .....  
Nombre común ..... Huarango .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Nombre científico ..... *Acacia macracantha humboldt. & Bonpland ex Willdenow* .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Fecha de la toma de las muestras botánicas ..... 05 - 08 - 2016 .....  
Hojas  Ramitas  Corteza  Flores  Frutos   
Otros detalles ..... Ramas con presencia de espinas .....  
.....

#### 1.2. UBICACIÓN

Distrito ..... Celendin .....  
Zona ..... Yanaquera .....  
Carretera ..... Celendin - Uanguat .....  
Coordenadas NORTE: ..... 9247271 ..... Coordenadas ESTE: ..... 812585 .....  
Otros detalles ..... Clima cálido con presencia de lluvias estacionales .....  
.....

#### 1.3 DESCRIPCIÓN

Clase: Dominante  Intermedia   
D.A.P. .... 13 ..... cms. Altura total ..... 3.5 ..... m. Altura comercial ..... 2.8 ..... m.  
Copa y follaje: Grande  Mediana  Pequeña   
Tipo de bosque: ..... Seco .....  
Forma del tronco: Aletones  Recto  Torcido   
Cilíndrico  Excéntrico   
Tipo de corteza: Externa: Color Marrón oscuro Superficie ..... Rugosa .....  
Espesor ..... 3.2 ..... cms. Espinosa ..... Solo en las ramas .....  
Interna: Color Amar. y rojo Olor ..... Sabor .....  
Exudaciones: Laca  Resina   
Goma  Colorante   
Otros detalles .....  
.....

Firma de la persona responsable de la identificación \_\_\_\_\_

Firma de la persona responsable de la toma de muestra \_\_\_\_\_





## DATOS DE CAMPO DEL ARBOL

### 1.1. IDENTIFICACION

Fecha de selección ..... 05 - 08 - 2016 ..... N° de árbol ..... A-03 .....  
Nombre común ..... Huarango .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Nombre científico ..... Acacia macracantha humboldt. & Bonpland ex Willdenow .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Fecha de la toma de las muestras botánicas ..... 05 - 08 - 2016 .....  
Hojas  Ramitas  Corteza  Flores  Frutos   
Otros detalles ..... Ramas con presencia de epinas .....  
.....

### 1.2. UBICACIÓN

Distrito ..... Celendin .....  
Zona ..... Quebrada del Oso .....  
Carretera ..... Celendin - Hanguat .....  
Coordenadas NORTE: ..... 9247797 ..... Coordenadas ESTE: ..... 812378 .....  
Otros detalles ..... Clima calido con presencia de lluvias estacionales .....  
.....

### 1.3 DESCRIPCIÓN

Clase: Dominante  Intermedia   
D.A.P. .... 11 ..... cms. Altura total ..... 3.5 ..... m. Altura comercial ..... 3 ..... m.  
Copa y follaje: Grande  Mediana  Pequeña   
Tipo de bosque: ..... Seco .....  
Forma del tronco: Aletones  Recto  Torcido   
Cilíndrico  Excéntrico   
Tipo de corteza: Externa: Color ..... Marron oscuro ..... Superficie ..... Rugosa .....  
Espesor ..... 29 ..... cms. Espinosa ..... Solo en las ramas .....  
Interna: Color ..... Amar y rojo ..... Olor ..... Sabor .....  
Exudaciones: Laca  Resina   
Goma  Colorante   
Otros detalles .....  
.....

Firma de la persona responsable de la identificación \_\_\_\_\_

Firma de la persona responsable de la toma de muestra \_\_\_\_\_

Norma COPANT 458





## DATOS DE CAMPO DEL ARBOL

### 1.1. IDENTIFICACION

Fecha de selección ..... 05 - 08 - 2016 ..... N° de árbol ..... A-04 .....  
Nombre común ..... Huarango .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Nombre científico ..... Acacia macracantha humboldt & Bonpland ex Willdenow .....  
Identificado por ..... Juan Montoya Quina .....  
Fecha de la toma de las muestras botánicas ..... 05 - 08 - 2016 .....  
Hojas  Ramitas  Corteza  Flores  Frutos   
Otros detalles ..... Ramas con presencia de espinas .....  
.....

### 1.2. UBICACIÓN

Distrito ..... Celendin .....  
Zona ..... La toma .....  
Carretera ..... Celendin - Uluabat .....  
Coordenadas NORTE: 92.49292 ..... Coordenadas ESTE: 811728 .....  
Otros detalles ..... Clima calido con presencia de lluvias estacionales .....  
.....

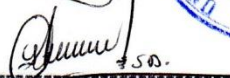
### 1.3 DESCRIPCIÓN

Clase: Dominante  Intermedia   
D.A.P. .... 10 ..... cms. Altura total .... 4.5 ..... m. Altura comercial .... 4 ..... m.  
Copa y follaje: Grande  Mediana  Pequeña   
Tipo de bosque: ..... Seco .....  
Forma del tronco: Aletones  Recto  Torcido   
Cilíndrico  Excéntrico   
Tipo de corteza: Externa: Color Marron verdosa Superficie ..... Rugosa .....  
Espesor .... 2.9 ..... cms. Espinosa ..... Solo en las ramas .....  
Interna: Color ..... Amarilla ..... Olor ..... Sabor .....  
Exudaciones: Laca  Resina   
Goma  Colorante   
Otros detalles .....  
.....

Firma de la persona responsable de la identificación

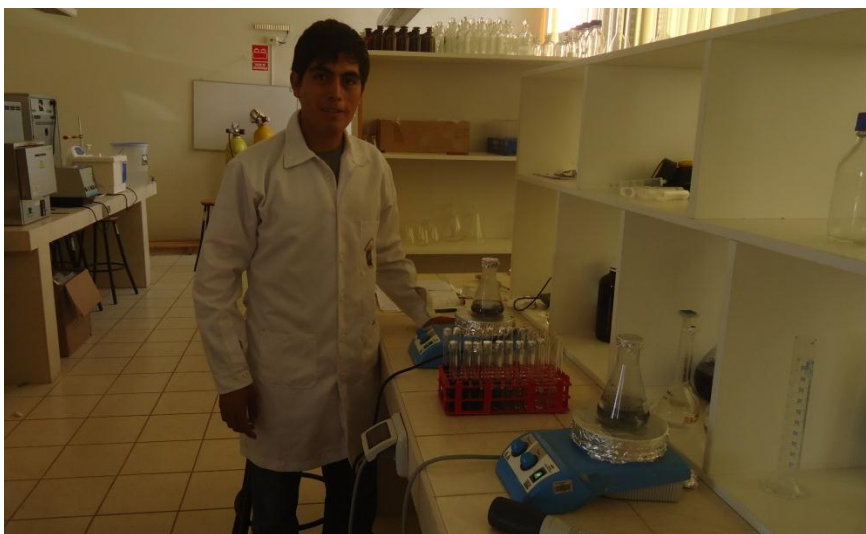
  


Firma de la persona responsable de la toma de muestra

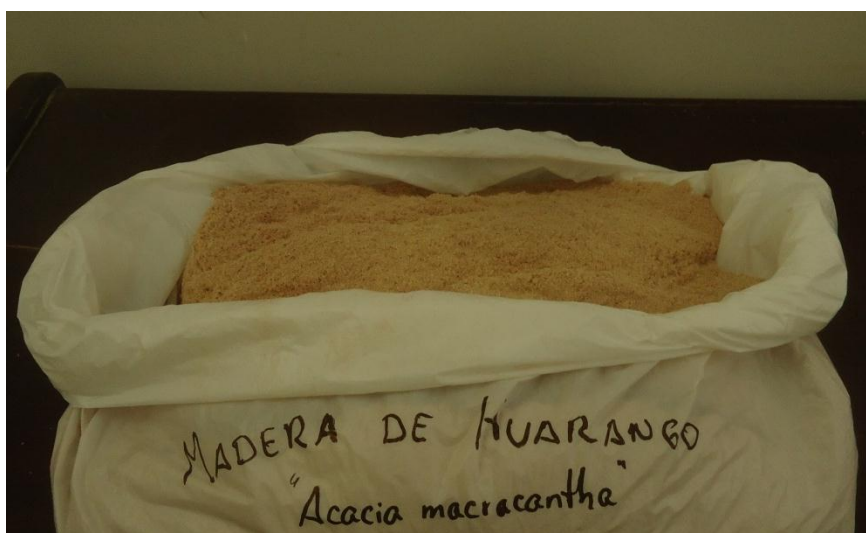


Norma COPANT 458

## 7.2. Panel fotográfico producción y caracterización del carbón activado



**Figura 29:** Laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes



**Figura 30:** Materia prima triturada y tamizada



**Figura 31:** Cloruro de Zinc utilizado como agente activante





**Figura 32:** Peso de la muestra



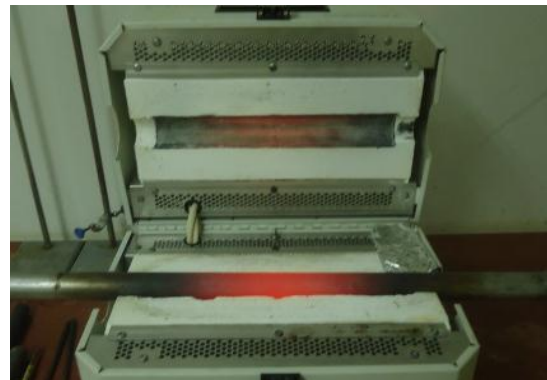
**Figura 33:** Peso del agente activante



**Figura 34:** Llenado mezcla en el tubo de carbonización



**Figura 35:** Colocando la muestra en el horno horizontal



**Figura 36:** Horno al luego del periodo de activación



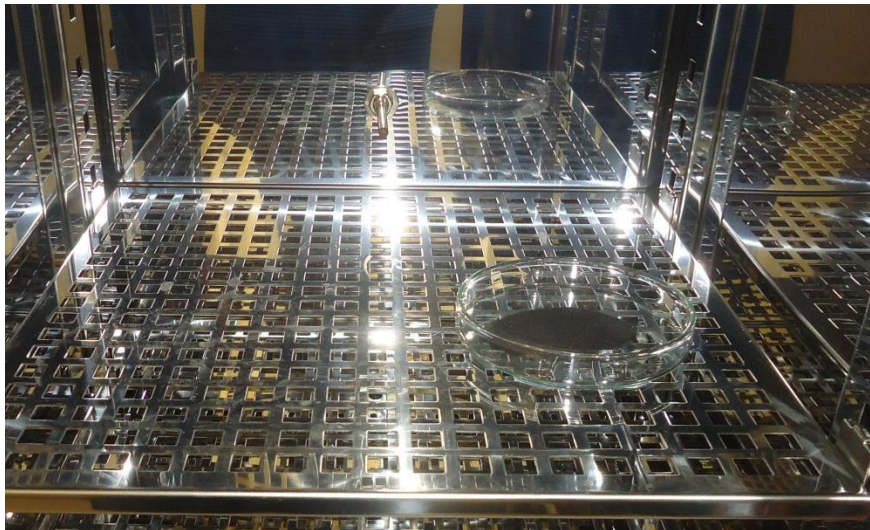
**Figura 37:** Enfriamiento del horno horizontal



**Figura 38:** Carbón activado producido



**Figura 39:** Medición del pH del carbón activado



**Figura 40:** Muestra de CA en la estufa para determinación de la humedad



**Figura 41:** Incineración de una muestra de CA para determinar el contenido de ceniza





**Figura 42:** Preparación de las soluciones de azul de metileno



**Figura 43:** Distribución de concentraciones de 40, 60, 80 y 120 ppm en matraces de 250 ml



**Figura 44:** Modificación del pH a valores de 3; 4.5; 6 y 7.5 para cada una de las concentraciones, con  $H_2SO_4$  y  $NaOH$



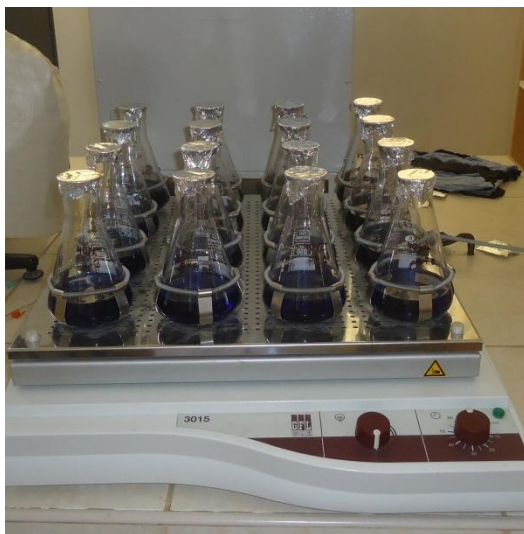
**Figura 45:** Peso de las muestras



**Figura 46:** Etiquetado de muestras



**Figura 47:** Añadiendo el carbón activado a las muestras de azul de metileno



**Figura 48:** Disposición de las muestras en el agitador orbital

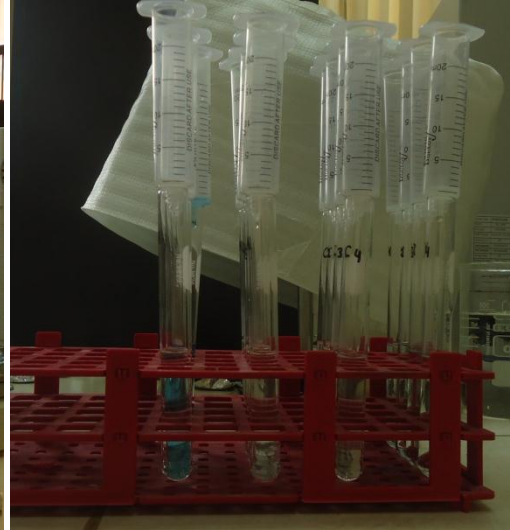


**Figura 49:** Muestras luego de 24 horas

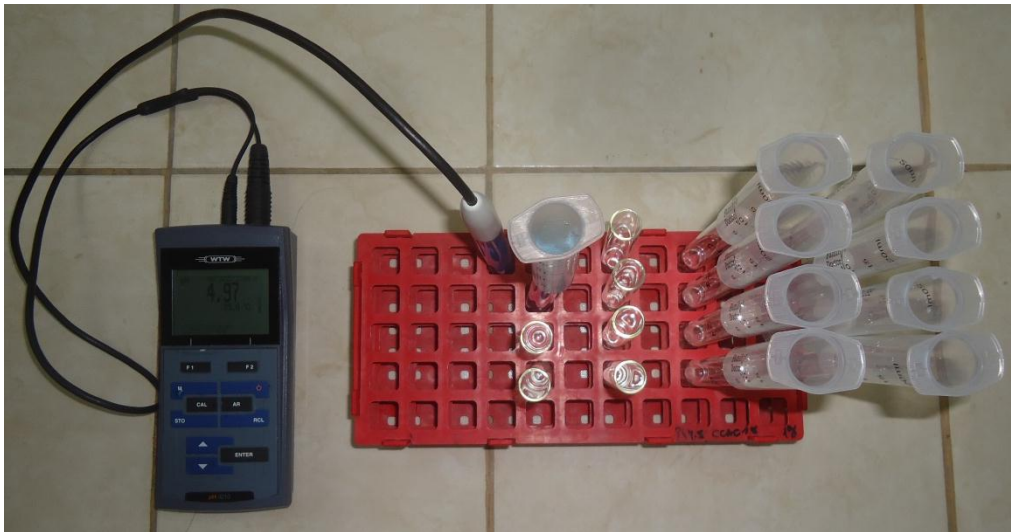




**Figura 50:** Extracción de alícuotas



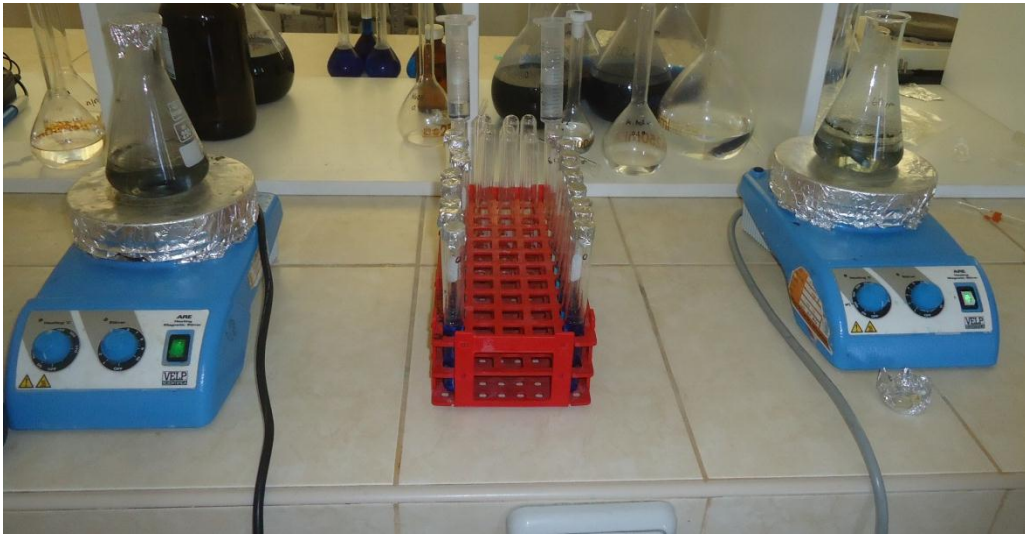
**Figura 51:** Filtración para remoción del CA



**Figura 52:** Medición del pH final de las muestras



**Figura 53:** Medición de la concentración final de azul de metileno en el espectrofotómetro



**Figura 54:** Pruebas de cinética de adsorción con azul de metileno a cc iniciales de 40 y 60 ppm



**Figura 55:** Pruebas de cinética de adsorción con azul de metileno a cc iniciales de 80 y 120 ppm



**Figura 56:** Visualización de la remoción de azul de metileno



**Figura 57:** Medición de cc finales de azul de metileno



**Figura 58:** Medición de cc finales de azul de metileno



**Figura 59:** Muestra enviada al laboratorio de la UNI para determinación de las características del área superficial y porosidad



### 7.3. Panel fotográfico análisis de adsorción de cloro libre



Figura 60: Toma de muestra en el PM 03



Figura 61: Toma de muestra en el PM 04



Figura 62: Reactivo indicador de cloro libre



Figura 63: Fotómetro multiparamétrico para agua

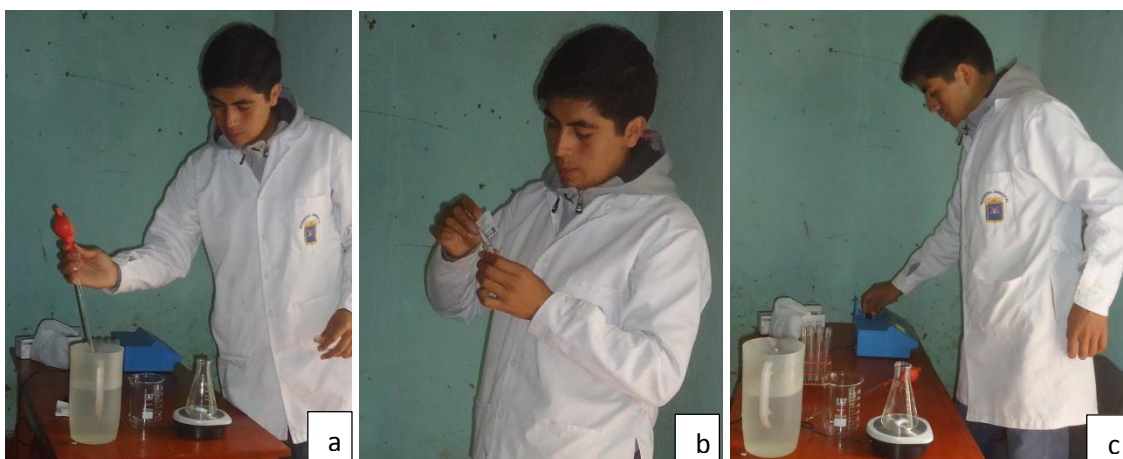


Figura 64: Procedimiento para medición de cloro libre (a) Extracción de alícuota de 10 ml y colocación en la cubeta; (b) Añadiendo el reactivo indicador; (c) Colocando la cubeta en la celda de medición del equipo multiparámetros y medición del cloro libre en la muestra





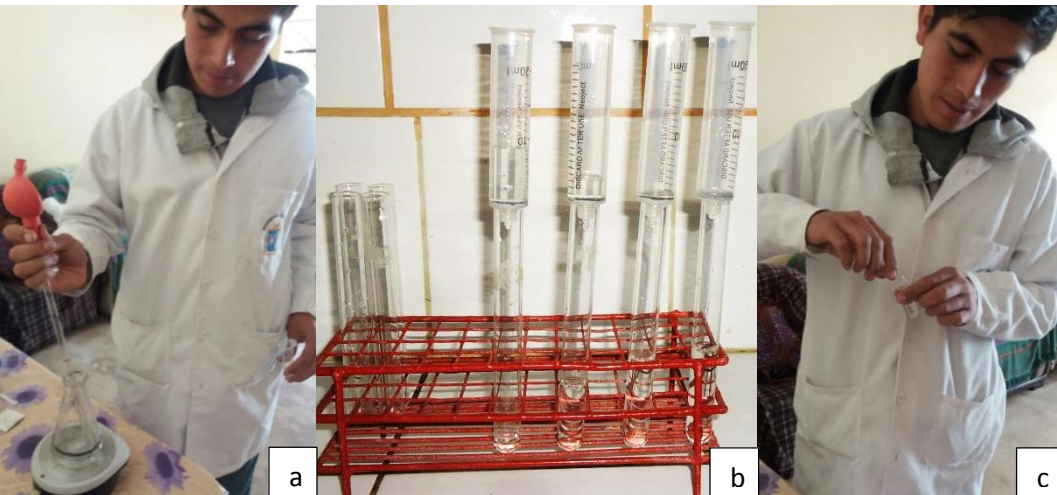
**Figura 65:** Medición del cloro libre residual en el agua potable del PM 06



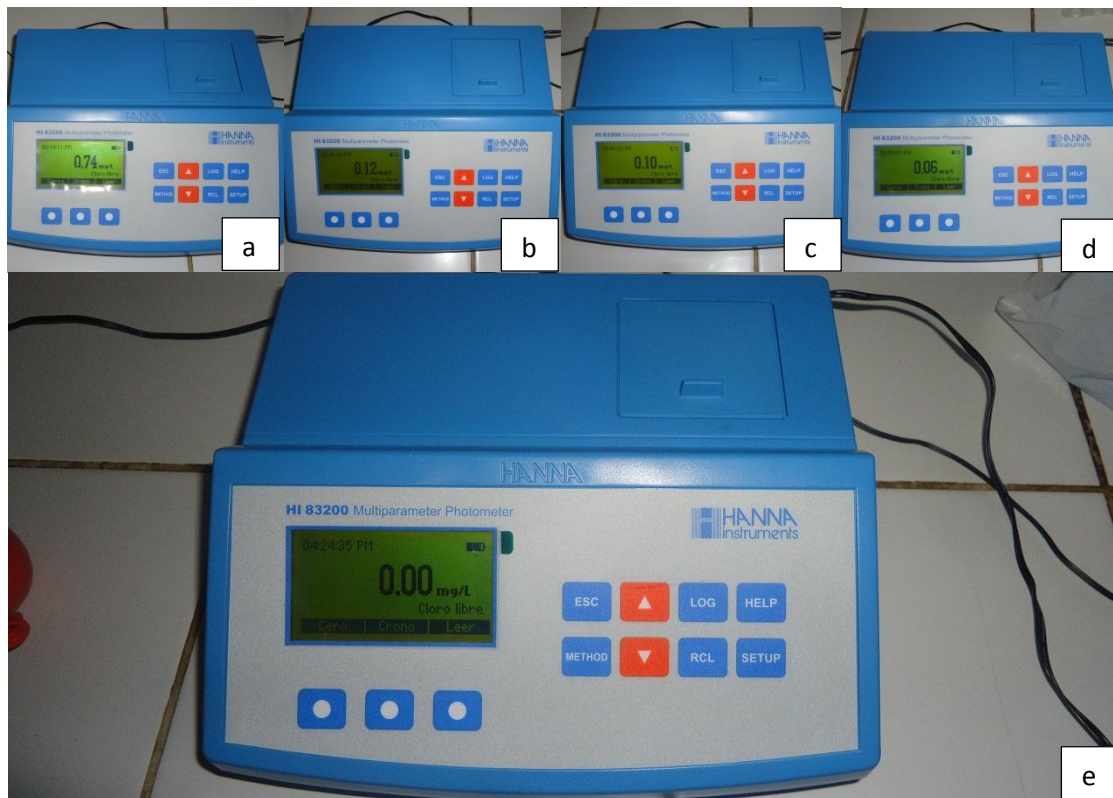
**Figura 66:** Colocando 100ml de agua en el matraz



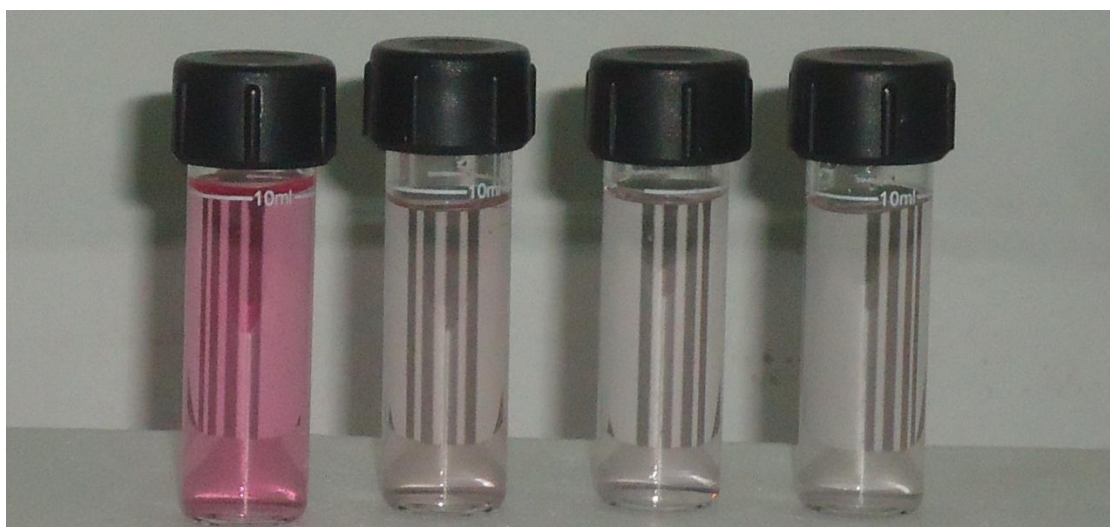
**Figura 67:** Agregando el Carbón activado



**Figura 68:** Pruebas de cinética de adsorción (a) Extracción de alícuotas de 10 ml a los 5; 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos (b) Filtración con papel filtro para remover el carbón activado (c) Colocación de la muestra en la cubeta para proceder a la medición de la concentración de cloro libre.



**Figura 69:** Cinética de adsorción de cloro libre residual con carbón activado producido de madera de *Acacia macracantha* en el PM 06 (a) Concentración inicial de cloro libre en el agua potable (b) Concentración de cloro libre a los 5 min (c) Concentración de cloro libre a los 10 min (d) Concentración de cloro libre a los 15 min (e) Concentración de cloro libre a los 45 min



**Figura 70:** Visualización de la variación de la concentración de cloro libre al inicio, y a los 5, 10 y 15 minutos respectivamente en el PM 06



#### 7.4. Certificado del laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes



### UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE



"AÑO DEL BUEN SERVICIO AL CIUDADANO"

EL QUE SUSCRIBE:

Jefe del laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes

HACE CONSTAR:

Que el bachiller en ciencias ambientales HORACIO GILBERTO SEGURA ABANTO con DNI 47380854, procedente de la Universidad Nacional de Cajamarca, realizó las siguientes actividades en este laboratorio, como parte del proyecto de tesis "Eficiencia del carbón activado obtenido de huarango (*Acacia macracantha*) en la remoción de cloro libre residual en agua potable, Celendín 2016":

- » Producción de carbón activado a partir de madera de *Acacia macracantha*.
- » Caracterización del carbón activado producido en lo referente a: rendimiento de la materia prima, contenido de humedad del carbón activado, contenido de cenizas del carbón activado y determinación de la capacidad de adsorción con azul de metileno; asimismo se hizo el contacto para la caracterización del área superficial y porosidad del carbón activado en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Dichas actividades se realizaron entre los meses de Agosto a Octubre del año 2016.

Se expide la presente constancia a solicitud del tesista a fin de corroborar que los datos que presenta corresponden a los análisis realizados en este laboratorio.

Tumbes, 31 de enero del 2017

Universidad Nacional de Tumbes

Ing. JOSE ANTONIO SILVA CHAVEZ  
Jefe del Laboratorio de Análisis Ambiental

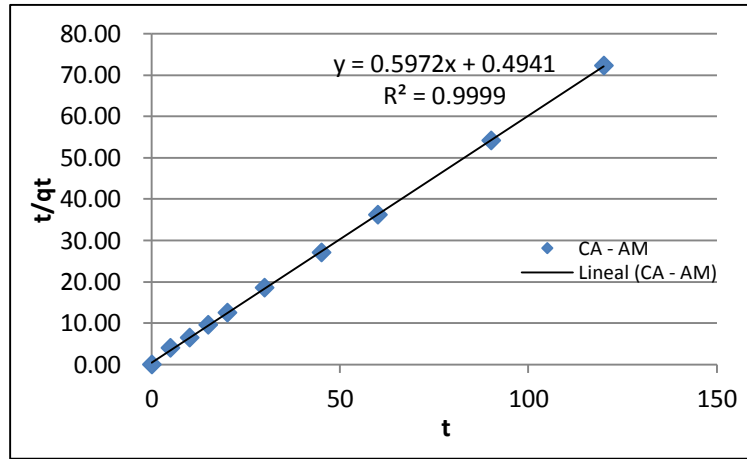
## 7.5. Datos obtenidos en la prueba de adsorción de cloro libre residual

**TABLA 20:** Datos obtenidos en la prueba de adsorción de cloro libre

		CONCENTRACION DE CLORO LIBRE									
		TIEMPO (min)									
		0	5	10	15	20	30	45	60	90	120
<b>CODIGO DE LA MUESTRA</b>	<b>PM 01</b>	0.83	0.21	0.05	0.05	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 02</b>	0.40	0.07	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 03</b>	0.23	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 04</b>	0.60	0.12	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 05</b>	0.90	0.08	0.05	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 06</b>	0.74	0.12	0.1	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 07</b>	0.82	0.12	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 08</b>	0.72	0.12	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 09</b>	0.55	0.09	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>PM 10</b>	0.12	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

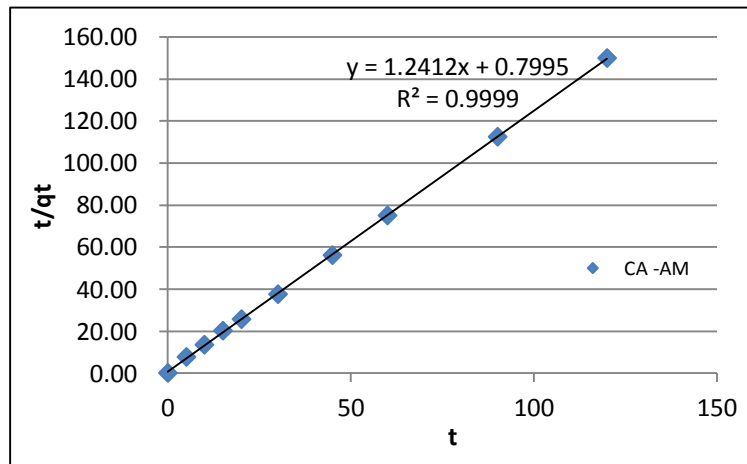
### 7.6. Memoria de cálculos de las variables de pseudo segundo orden

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.83	0	0.00
5	0.21	1.24	4.03
10	0.05	1.56	6.41
15	0.05	1.56	9.62
20	0.03	1.60	12.50
30	0.02	1.62	18.52
45	0.00	1.66	27.11
60	0.00	1.66	36.14
90	0.00	1.66	54.22
120	0.00	1.66	72.29



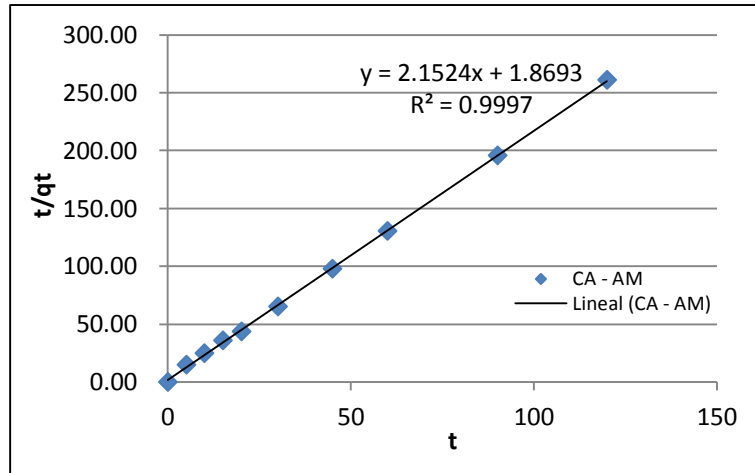
t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.5972	
qe	1.67	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.4941	
k <sub>2</sub>	0.7218	g/mg.min
h	2.02	
R <sup>2</sup>	0.9999	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.40	0	0.00
5	0.07	0.66	7.58
10	0.03	0.74	13.51
15	0.03	0.74	20.27
20	0.01	0.78	25.64
30	0.00	0.80	37.50
45	0.00	0.80	56.25
60	0.00	0.80	75.00
90	0.00	0.80	112.50
120	0.00	0.80	150.00



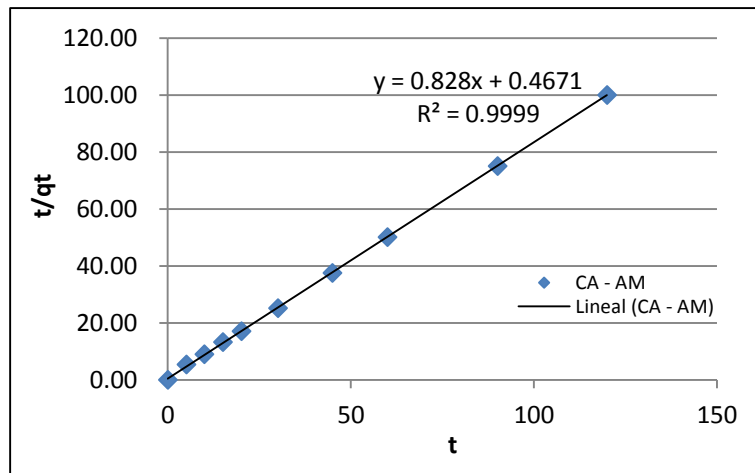
t	x	
t/qt	y	
1/qe	1.2412	
qe	0.81	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.7995	
k <sub>2</sub>	1.9269	g/mg.min
h	1.25	
R <sup>2</sup>	0.9999	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.23	0	0.00
5	0.06	0.34	14.71
10	0.03	0.40	25.00
15	0.02	0.42	35.71
20	0.00	0.46	43.48
30	0.00	0.46	65.22
45	0.00	0.46	97.83
60	0.00	0.46	130.43
90	0.00	0.46	195.65
120	0.00	0.46	260.87



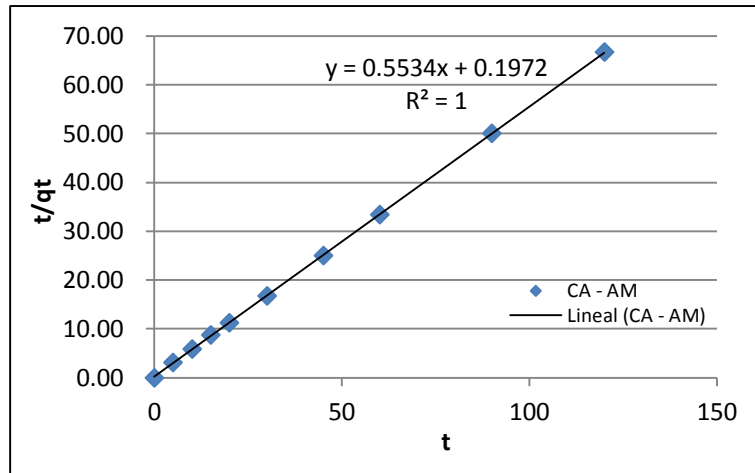
t	x	
t/qt	y	
1/qe	2.1524	
qe	0.46	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	1.8693	
k <sub>2</sub>	2.4784	g/mg.min
h	0.53	
R <sup>2</sup>	0.9997	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.60	0	0.00
5	0.12	0.96	5.21
10	0.04	1.12	8.93
15	0.03	1.14	13.16
20	0.01	1.18	16.95
30	0.00	1.20	25.00
45	0.00	1.20	37.50
60	0.00	1.20	50.00
90	0.00	1.20	75.00
120	0.00	1.20	100.00



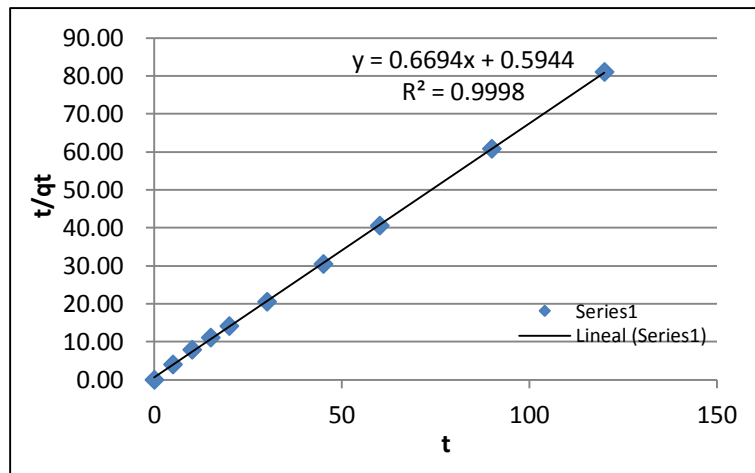
t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.828	
qe	1.21	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.4671	
k <sub>2</sub>	1.4677	g/mg.min
h	2.14	
R <sup>2</sup>	0.9999	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.90	0	0.00
5	0.08	1.64	3.05
10	0.05	1.70	5.88
15	0.04	1.72	8.72
20	0.01	1.78	11.24
30	0.00	1.80	16.67
45	0.00	1.80	25.00
60	0.00	1.80	33.33
90	0.00	1.80	50.00
120	0.00	1.80	66.67



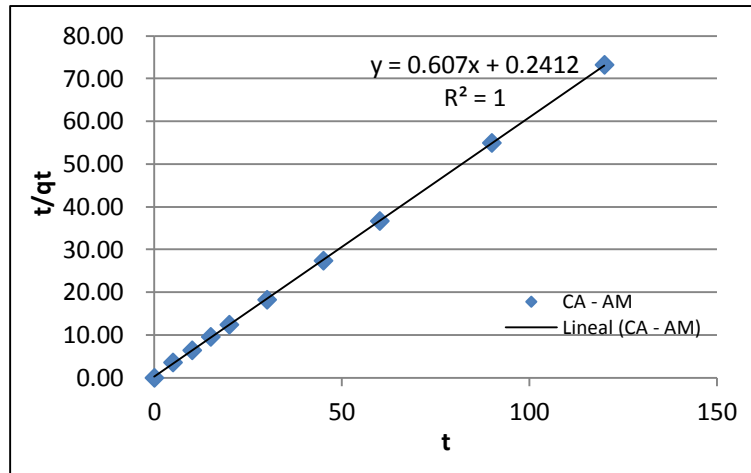
t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.5534	
qe	1.81	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.1972	
k <sub>2</sub>	1.5530	g/mg.min
h	5.07	
R <sup>2</sup>	1	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.74	0	0.00
5	0.12	1.24	4.03
10	0.1	1.28	7.81
15	0.06	1.36	11.03
20	0.03	1.42	14.08
30	0.01	1.46	20.55
45	0.00	1.48	30.41
60	0.00	1.48	40.54
90	0.00	1.48	60.81
120	0.00	1.48	81.08



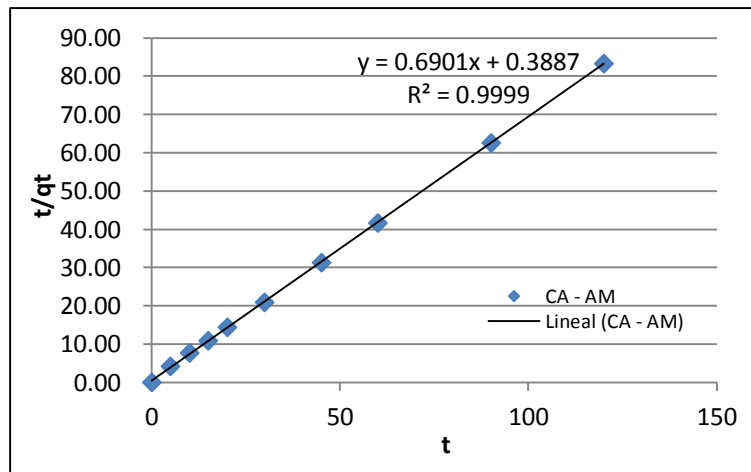
t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.6694	
qe	1.49	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.5944	
k <sub>2</sub>	0.7539	g/mg.min
h	1.68	
R <sup>2</sup>	0.9998	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.82	0	0.00
5	0.12	1.40	3.57
10	0.04	1.56	6.41
15	0.03	1.58	9.49
20	0.01	1.62	12.35
30	0.00	1.64	18.29
45	0.00	1.64	27.44
60	0.00	1.64	36.59
90	0.00	1.64	54.88
120	0.00	1.64	73.17



t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.607	
qe	1.65	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.2412	
k <sub>2</sub>	1.5276	g/mg.min
h	4.15	
R <sup>2</sup>	1	

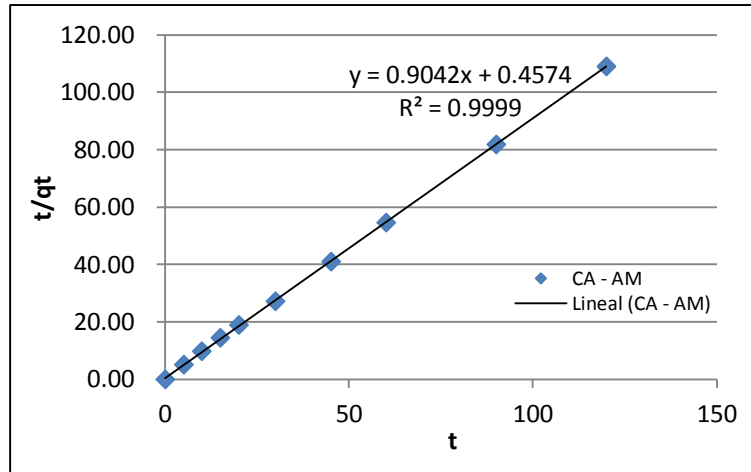
Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.72	0	0.00
5	0.12	1.20	4.17
10	0.06	1.32	7.58
15	0.03	1.38	10.87
20	0.02	1.40	14.29
30	0.00	1.44	20.83
45	0.00	1.44	31.25
60	0.00	1.44	41.67
90	0.00	1.44	62.50
120	0.00	1.44	83.33



t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.6901	
qe	1.45	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.3887	
k <sub>2</sub>	1.2252	g/mg.min
h	2.57	
R <sup>2</sup>	0.9999	

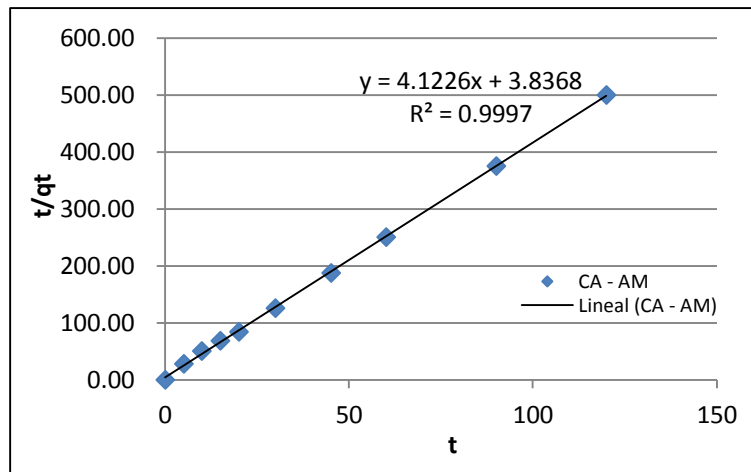


Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.55	0	0.00
5	0.05	1.00	5.00
10	0.04	1.02	9.80
15	0.03	1.04	14.42
20	0.02	1.06	18.87
30	0.00	1.10	27.27
45	0.00	1.10	40.91
60	0.00	1.10	54.55
90	0.00	1.10	81.82
120	0.00	1.10	109.09



t	x	
t/qt	y	
1/qe	0.9042	
qe	1.11	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	0.4574	
k <sub>2</sub>	1.7874	g/mg.min
h	2.19	
R <sup>2</sup>	0.9999	

Time (min)	CC-AC		
	Concentration (mg/l)	qt	t/qt
0	0.12	0	0.00
5	0.03	0.18	27.78
10	0.02	0.20	50.00
15	0.01	0.22	68.18
20	0.00	0.24	83.33
30	0.00	0.24	125.00
45	0.00	0.24	187.50
60	0.00	0.24	250.00
90	0.00	0.24	375.00
120	0.00	0.24	500.00



t	x	
t/qt	y	
1/qe	4.1226	
qe	0.24	mg of Cl/g AC
1/k <sub>2</sub> qe <sup>2</sup>	3.8368	
k <sub>2</sub>	4.4297	g/mg.min
h	0.26	
R <sup>2</sup>	0.9997	

## VIII. GLOSARIO

**ADSORCIÓN:** Proceso por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son atrapados o retenidos en una superficie, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

**ÁREA SUPERFICIAL BET:** área superficial según el método propuesto por Brunauer, Emmett y Teller.

**CA-AM:** Carbón activado producido por el método de activación química de madera de *Acacia macracantha*

**COLORO LIBRE:** Es el cloro que se halla disuelto en agua y que no está asociado con la materia orgánica.

**COPANT 458:** Norma sobre la “Selección y colección de muestras de madera”, emitida por el Comisión Panamericana de Normas Técnicas.

**IUPAC:** Unión Internacional de Química Pura y Aplicada

**MINSA:** Ministerio de Salud del Perú

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**OPS:** Organización Panamericana de la Salud

**PE:** Prueba de equilibrio, es el estudio que sirve para cuantificar la capacidad de adsorción del sólido adsorbente respecto al adsorbato en solución.

**POROSIDAD:** o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total.

**PPM:** Partes por millón

**R<sup>2</sup>:** Coeficiente de correlación

**RPM:** Revoluciones por minuto

**TRIHALOMETANOS (THM):** compuestos orgánicos basados en una molécula de CH<sub>4</sub>, donde los átomos de hidrógeno son reemplazados por tres átomos de elementos halogenados.