



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) "LO DE COY"**

**Cindy Arelis Pineda Fuentes**

Asesorado por Ing. Qco.M.Sc. Zenón Much Santos

Guatemala, marzo 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) "LO DE COY"**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CINDY ARELIS PINEDA FUENTES**  
ASESORADO POR ING. QCO.M.SC. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MARZO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) "LO DE COY"**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en octubre de 2009.

Cindy Arelis Pineda Fuentes



Guatemala, octubre 13 de 2,010

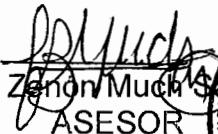
Ingeniero  
Williams Álvarez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente


Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación, de la estudiante Cindy Arelis Pineda Fuentes con carné No. 2004-12702 titulado: **Evaluación de lechos filtrantes a escala piloto, en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (EMPAGUA) "Lo de Coy"**.

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación ya que cumple con los requisitos exigidos tanto por la Escuela de Ingeniería Química como por los preceptos que dicta la Universidad de San Carlos.

Agradeciendo su atención se suscribe de usted, atentamente,

  
Ing. Zenón Muñoz Santos  
ASESOR  
Jefe del Laboratorio Unificado  
Química y Microbiología Sanitaria





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 18 de enero de 2011  
Ref.EIQ.TG.011.2011

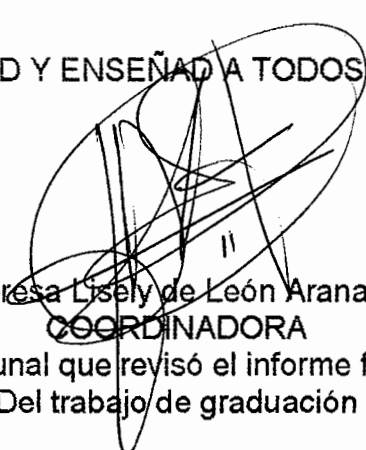
Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-1232010-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **CINDY ARELIS PINEDA FUENTES**, identificada con carné No. 2004-12702, titulado: **EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) "LO DE COY"**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Zenon Much Santos.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **PINEDA FUENTES**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

  
Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.  
COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE  
INGENIERÍA QUÍMICA

C.c.: archivo

**71<sup>ma</sup>** FORMANDO INGENIEROS QUÍMICOS EN GUATEMALA

PROGRAMA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Periodo 2009 - 2012





El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante **CINDY ARELIS PINEDA FUENTES** titulado: **“EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) “LO DE COY”**”. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. Williams ~~Guillermo Alvarez Meida~~, C.Dr.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, marzo de 2011

Cc: Archivo  
WGAM/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LECHOS FILTRANTES A ESCALA PILOTO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (EMPAGUA) "LO DE COY"**, presentado por la estudiante universitaria **Cindy Arelis Pineda Fuentes**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, marzo de 2011

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por todas sus bendiciones recibidas
<b>Mi patria</b>	Guatemala
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi alma mater
<b>Mi esposo e hijas</b>	Axel, Tais y Zoe por su amor, apoyo y paciencia
<b>Mis padres</b>	Consuelo Fuentes y Ovidio Pineda, por su incondicional apoyo, su amor, su conocimiento, sus desvelos y sus alegrías
<b>Mis hermanos</b>	Ludwing y Sayury por su amor fraternal
<b>Mis familiares</b>	Por sus buenos deseos
<b>Mis amigos</b>	Por su amistad incondicional
<b>Mis Docentes de ingeniería</b>	Por compartir su conocimiento

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por su iluminación en el transcurso de mi vida.
<b>Mi patria</b>	Guatemala
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser forjadora de profesionales
<b>Mi esposo e hijas</b>	Por ser esa inspiración para seguir adelante cada día para cumplir con esta meta
<b>Mis padres</b>	Por toda la paciencia y dedicación que tuvieron para bien formarme.
<b>Mis hermanos</b>	Por su apoyo en todo momento.
<b>Planta de tratamiento De agua potable “Lo de Coy”</b>	Por haberme dado la oportunidad de desarrollar y poner en práctica mis conocimientos
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Zenón Much, por su orientación en mi desarrollo académico.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTADO DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1    Proceso utilizado en la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”	1
1.1.1    Pre cloración	1
1.1.2    Coagulación – floculación	1
1.1.3    Sedimentación	2
1.1.4    Filtración	2
1.1.5    Químicos utilizados en el proceso de tratamiento de agua potable	3
1.2.    Justificación	5
1.3.    Determinación del problema	6
1.3.1.    Definición	6
1.3.2.    Delimitación	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1    Teoría de la filtración del agua	7

2.1.1.	Mecanismos responsables de la filtración en filtros de medios múltiples	7
2.1.1.1	Transporte de partículas	9
2.1.1.1.1.	Cernido	9
2.1.1.1.2.	Sedimentación	10
2.1.1.1.3.	Intercepción	10
2.1.1.1.4.	Impacto inercial	11
2.1.1.1.5.	Difusión	11
2.1.1.1.6.	Acción hidrodinámica	12
2.1.1.2.	Fuerzas de adherencia	13
2.1.1.2.1.	Fuerzas de Van der Waals	13
2.1.1.2.2.	Fuerzas electrostáticas	13
2.1.1.2.3.	Puente químico	14
2.1.2.	Mecanismos responsables de la filtración biológica	14
2.2	Filtración rápida	15
2.2.1	Aspectos teóricos	17
2.2.2	Control de filtro	18
2.2.3	Aplicaciones de la filtración rápida	19
2.2.4	Tipos de filtros rápidos	20
2.2.4.1	Filtros de presión	20
2.2.4.2	Filtros de flujo ascendente	21
2.2.4.3	Filtros de medios múltiples	22
2.3.	Antracita	23
2.4.	Carbón activado	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	31
3.1	Variables	31
3.2	Delimitación de campo de estudio	34
3.3	Recursos humanos disponibles	34

3.4	Recursos materiales disponibles	35
3.4.1	Edificio	35
3.4.2	Equipo	35
3.4.3	Material de estudio	35
3.4.4	Filtro piloto	36
3.4.5	Volúmenes utilizados	36
3.4.6	Cristalería y equipo	36
3.5	Técnica cualitativa o cuantitativa	37
3.5.1	Procedimiento para toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico	37
3.5.2	Procedimiento para toma de muestra de agua para análisis microbiológico	38
3.6	Recolección y ordenamiento de la información	38
3.7	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	39
3.8	Análisis estadístico	39
4.	RESULTADOS	43
4.1	Resultados pruebas físicas, químicas y bacteriológicas	43
4.2	Resultados análisis estadístico	53
4.3	Gráficas	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	65
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	73
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXOS	77



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Filtro planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy"	3
2.	Mecanismos de transporte	12
3.	Filtro rápido de gravedad	16
4.	Control de tasa de filtro	19
5.	Filtración rápida: coagulación, floculación y sedimentación	20
6.	Filtro de presión	21
7.	Filtro de flujo ascendente	22
8.	Filtro de medios múltiples	23
9.	Antracita	24
10.	Carbón activado	29
11.	Flujograma	32
12.	Gráfica de acumulado de coliformes totales número más probable/cm <sup>3</sup>	55
13.	Gráfica de acumulado de coliformes fecales número más probable/cm <sup>3</sup>	56
14.	Gráfica de pH	57
15.	Gráfica de acumulado de dureza total mg/L	58
16.	Gráfica de acumulado de nitratos mg/L	59
17.	Gráfica de acumulado de hierro mg/L	60
18.	Gráfica de acumulado de manganeso mg/L	61
19.	Gráfica de acumulado de sulfatos mg/L	62
20.	Gráfica de acumulado de unidades de color	63
21.	Gráficas de acumulado de turbiedad (NTU)	64

## TABLAS

I.	Parámetros a analizar	31
II.	Corrida 1	43
III.	Corrida 2	44
IV.	Corrida 3	45
V.	Corrida 4	46
VI.	Corrida 5	47
VII.	Corrida 6	48
VIII.	Corrida 7	49
IX.	Corrida 8	50
X.	Corrida 9	51
XI.	Corrida 10	52
XII.	Media de porcentajes de remoción	53
XIII.	Varianza de porcentajes de remoción	53
XIV.	Análisis estadístico	54
XV.	Datos para gráfica de acumulado de coliformes totales número más probable /cm <sup>3</sup>	55
XVI.	Datos para gráfica de acumulado de coliformes fecales número más probable /cm <sup>3</sup>	56
XVII.	Datos para gráfica de pH	57
XVIII.	Datos para gráfica de acumulado de dureza total mg/L	58
XIX.	Datos para gráfica de acumulado de nitratos mg/L	59
XX.	Datos para gráfica de acumulado de hierro mg/L	60
XXI.	Datos para gráfica de acumulado de manganeso mg/L	61
XXII.	Datos para gráfica de acumulado de sulfatos mg/L	62
XXIII.	Datos para gráfica de acumulado de unidades de color	63
XXIV.	Datos para gráfica de acumulado de turbiedad (NTU)	64



## LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$X_i$	Dato obtenido
$X_{ij}$	i-ésimo dato de la j-ésima muestra
$\mu_i$	Media de cada muestra
$\mu$	Media de datos
$\mu_{\tau}$	Media de las medias de cada muestra
$N$	Número de datos
$N$	Número de datos de cada muestra
$H$	Número de muestras
$\Sigma$	Sumatoria
$F$	Valor de comparación
$\sigma^2$	Varianza de datos
$\sigma^2_{dentro}$	Varianza dentro de las muestras
$\sigma^2_{entre}$	Varianza entre las muestras



## GLOSARIO

<b>Adhesión</b>	Propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.
<b>Afluente</b>	Curso de agua que ingresa a los filtros piloto a ser utilizados.
<b>Agua potable</b>	Agua que por sus características de calidad especificadas en la norma COGUANOR NGO 29 001:99, es adecuada para el consumo humano.
<b>Antracita</b>	Carbón mineral de más alto rango y el que presenta mayor contenido en carbono, hasta un 95%. Es negro, brillante y muy duro, con iridaciones y sonoro por percusión.
<b>Carbón activado</b>	Producto derivado de materiales carbonosos. Es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta y se caracteriza por una cantidad grande de microporos. El carbón activado se utiliza en la purificación del agua.
<b>Coagulante</b>	Que coagula.

<b>Coágulo</b>	Cualquier grumo de esta masa viscosa y semisólida.
<b>Colmatación</b>	Relleno de una depresión del terreno por limo, arena u otros sedimentos, depositados por el agua o por el viento.
<b>Coloides</b>	Sistema físico-químico formado por dos o más fases, principalmente éstas son: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas.
<b>Efluente</b>	Curso de agua que egresa de los filtros piloto a ser utilizados.
<b>Flóculo</b>	Grumo que aparece en una floculación.
<b>Lecho filtrante</b>	Material poroso utilizado en filtros rápidos o lentos.
<b>Movimiento browniano</b>	Movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas microscópicas que se hallan en un medio fluido.
<b>Partículas coloidales</b>	Partículas que se encuentran en suspensión en un líquido, merced al equilibrio coloidal.
<b>Potenciómetro</b>	Instrumento utilizado para la medición de pH de una muestra.

<b>Protozoarios</b>	Son organismos microscópicos, unicelulares eucarióticos; (parcialmente autótrofos); que viven en ambientes húmedos o directamente en medios acuáticos, ya sean aguas saladas o aguas dulces; la reproducción puede ser asexual por bipartición y también sexual por isogametos o por conjugación intercambiando material genético.
<b>Pruebas bacteriológicas</b>	Análisis microbiológico de una muestra.
<b>Pruebas físicas</b>	Análisis físico de una muestra.
<b>Pruebas químicas</b>	Análisis químico de una muestra.
<b>Rotíferas</b>	Constituyen un filo de animales pseudocelomados microscópicos (entre 0,1 y 0,5 mm) con unas 2.200 especies que habitan en aguas dulces, tierra húmeda, musgos, líquenes, hongos, e incluso agua salada.



## RESUMEN

En el presente trabajo de Graduación se realizó un análisis de comparación del proceso de filtración en la planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy". En dicho tratamiento se utiliza un lecho de medios múltiples de grava de 25mm – 8mm, arena sílice y antracita, y se comparó con otro filtro intercambiando la antracita por carbón activado, para establecer el lecho filtrante que presente una mejor calidad de agua.

Se realizaron pruebas físicas, químicas y bacteriológicas del efluente de los filtros piloto con medidas a escala del 3% del filtro de la planta de tratamiento de agua con los diferentes lechos filtrantes de carbón activado y antracita. Ambos filtros piloto presentaron resultados dentro de los límites permitidos por la Norma COGUANOR NGO 29-001.

Los parámetros considerados para este trabajo fueron: coliformes totales, coliformes fecales, dureza total, hierro, nitratos, sulfatos, manganeso, pH, olor, color y turbiedad.

En conclusión el carbón activado presentó mejores resultados para la mayoría de los parámetros, tales como remoción de dureza total, sulfatos, manganeso, color, turbiedad y neutralización de pH, mientras que la antracita presentó mejores resultados de remoción de coliformes fecales, coliformes totales, hierro y nitratos. Para el parámetro de olor no hay diferencia.





## OBJETIVOS

### General

Evaluar lechos filtrantes a escala piloto para la obtención de agua para consumo humano por medio de antracita (lecho filtrante actual) contra carbón activado (lecho filtrante propuesto) desde el punto de vista de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable (EMPAGUA) “Lo de Coy”.

### Específicos

1. Diseñar de un filtro piloto tomando en cuenta las medidas del filtro de la planta de tratamiento de Agua Potable “Lo de Coy”, utilizando como medio filtrante grava, arena sílice y antracita o carbón activado, según sea el caso, para la determinación del efluente y la comparación de los medios filtrantes.
2. Evaluar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del afluente del proceso de filtración actual y el afluente del filtro piloto.
3. Evaluar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del efluente del proceso de filtración actual utilizando un filtro piloto con el lecho filtrante que utiliza la planta.
4. Evaluar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del efluente del proceso de filtración utilizando carbón activado en un filtro piloto.
5. Comparar resultados obtenidos con el filtro piloto.

## **HIPÓTESIS**

### **Hipótesis nula**

No existe diferencia significativa en la calidad del efluente del filtro usando carbón activado o antracita para los parámetros de coliformes totales y fecales, pH, dureza total, nitratos, sulfatos, hierro, manganeso, olor, color y turbiedad para el proceso de filtración en la planta de tratamiento de agua potable (EMPAGUA) “Lo de Coy”.

### **Hipótesis alterna**

Sí existe diferencia significativa en la calidad del efluente del filtro usando carbón activado o antracita para los parámetros de coliformes totales y fecales, pH; dureza total, nitratos, sulfatos, hierro, manganeso, olor, color y turbiedad para el proceso de filtración en la planta de tratamiento de agua potable (EMPAGUA) “Lo de Coy”.

## INTRODUCCIÓN

En la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy” los filtros tienen como propósito la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso.

Las características del agua que ingresa a los filtros determina la calidad del efluente, principalmente a través de la concentración, naturaleza, tamaño y propiedades de adherencia de las partículas. Las características del medio filtrante desempeñan así mismo un papel importante en la eficiencia del proceso. Por lo que se necesita de un análisis comparativo para que la planta pueda conocer cuál de estos produce agua de mejor calidad.

Al realizar este trabajo se esperó obtener mejores resultados con el filtro piloto con carbón activado que utilizando un filtro con antracita, que es el utilizado por la planta de tratamiento de agua potable.



## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1 Proceso utilizado en la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”**

La planta está diseñada y construida para un tratamiento convencional de sedimentación con floculantes y filtración rápida. En su estado actual cuenta con una capacidad media de 960 L/s y máxima de 1,248 L/s.

#### **1.1.1 Pre cloración**

La pre cloración es un proceso que consiste en la aplicación de cloro al agua antes de cualquier otro tratamiento. Los beneficios son:

- ⚡ Mejoría en el proceso de la coagulación
- ⚡ Reducción de materia en suspensión causante de sabor y olor por oxidación, retardando su descomposición en los sedimentadores

#### **1.1.2 Coagulación – floculación**

La coagulación, es el resultado de la desestabilización de cargas eléctricas de los coloides por la adición de los productos químicos.

Después de ese fenómeno ocurre la floculación, en la cual se forman partículas sedimentables a partir de la unión de partículas sedimentadas.

Las partículas coloidales, después de ser desestabilizadas permiten ser reunidas para formar partículas más densas y mayores. La agitación en esta fase debe ser controlada de tal forma que permita un contacto físico entre las partículas, para provocar un agrupamiento y también para no romper o disgregar aquellos flóculos ya formados en una agitación muy lenta con poca energía. Los flóculos formados tenderán a sedimentarse en las cámaras de floculación y no en el tanque sedimentador.

### **1.1.3 Sedimentación**

El agua después de la etapa de floculación entra a los sedimentadores, los cuales tienen la función de sedimentar las partículas en suspensión en el agua que fueron aglomeradas en la fase anterior.

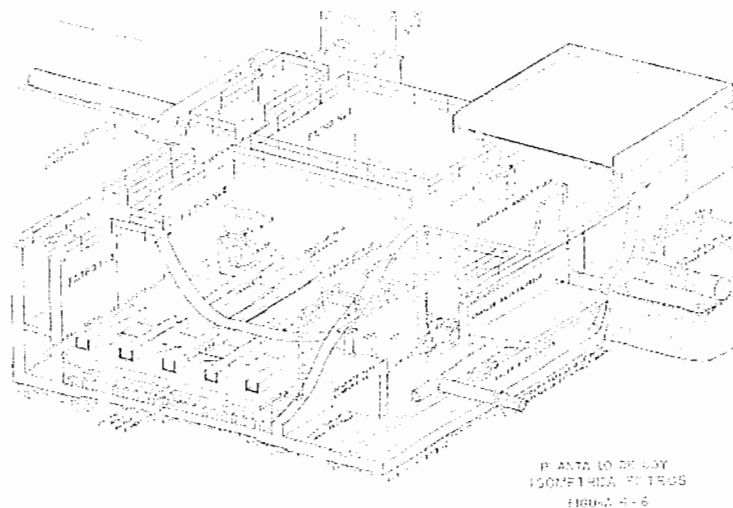
### **1.1.4 Filtración**

La filtración es una de las etapas más importantes en el tratamiento del agua, porque en ésta es retenido el material en suspensión que no fue removido en la sedimentación. Si el agua que llega al filtro posee mucha turbidez, la superficie de la capa filtrante se tapa rápidamente y la producción de agua filtrada se reduce, por lo mismo es esencial un buen pre tratamiento para que el filtro alcance un buen funcionamiento y que el agua producida sea de mejor calidad para que los lavados sean más espaciados.

La planta cuenta con seis filtros de concreto, el área filtrante de cada uno es de 78.08 metros cuadrados (6.10m x 12.80m). El medio filtrante está compuesto de antracita y arena soportada por grava. Para la elección y colocación se siguen las normas de la *American Water Works Assosication* (AWWA) para material filtrante (AWWAB 100-72). El lecho filtrante está

soportado por un falso fondo del tipo *Hydro-Cone* de *Wheeler*, fabricado por BIF. El trabajo de éste es soportar el lecho filtrante y proveer una distribución adecuada.

Figura 1. Filtro planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”



Fuente: **Manual de operación, planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”**

### 1.1.5 Químicos utilizados en el proceso de tratamiento de agua potable

En el proceso de tratamiento se utilizan diversos tipos de materiales químicos para la purificación de agua:

- ⚡ Sulfato de aluminio: es el coagulante primario;

- ↓ Sulfato de cobre: elimina las algas;
  
- ↓ Cal hidratada: es aplicada para obtener un pH óptimo de coagulación y floculación, corregir la acidez del agua para que pueda utilizarse en el consumo humano;
  
- ↓ Cloro gaseoso: elimina la contaminación bacteriológica;
  
- ↓ Hipoclorito: es un derivado de cloro en presentación granular, por consiguiente, tiene la misma función del cloro.



## **1.2. Justificación**

La planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy” ubicada en el municipio de Mixco abastece a las zonas 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 18 y 19 de la ciudad de Guatemala, aproximadamente una cantidad de 20,000 m<sup>3</sup> que es consumida por muchas personas.

Debido a que, el agua es de consumo humano la administración de la planta está interesada en mejorar la calidad producida, para lo cual se requiere de un trabajo de análisis de la misma utilizando un lecho filtrante diferente al que se utiliza actualmente.

El análisis consiste en la sustitución de la antracita por carbón activado comparando las propiedades fisicoquímicas y bacteriológicas del efluente y afluente a escala piloto de los filtros de la planta. Con la finalidad de determinar cuál de estos es el más adecuado para que la planta pueda cumplir con los requerimientos de la Norma COGUANOR NGO 29001 que es la que rige los parámetros para el agua potable.

El presente estudio beneficiará en primer lugar a la planta al producir agua de mejor calidad y en segundo, a la población para que utilice este recurso con mayor confianza.

### **1.3. Determinación del problema**

#### **1.3.1. Definición**

La planta de tratamiento de agua potable “Lo De Coy” suministra agua potable a diferentes zonas de la ciudad capital de Guatemala, para lo cual se utilizan filtros que constan de un lecho con base de antracita. El agua que es tratada en esta planta llega desde los ríos del acueducto Nacional Xayá-Pixcayá, los cuales se han visto afectados por la gran cantidad de desechos descargados en éstos, provocando cambios en la composición química, física y bacteriológica del afluente a la planta de tratamiento. El efluente obtenido por medio de los filtros presenta algunos problemas con la calidad del agua, lo cual representa mayor dificultad para cumplir con las especificaciones de la Norma de COGUANOR para agua potable NGO 29001.

#### **1.3.2. Delimitación**

El desarrollo de este trabajo se limitará a realizar el análisis del desempeño del carbón activado y de la antracita utilizando un filtro piloto, debido a que el costo de utilizar un filtro de la planta requeriría un costo elevado.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Teoría de la filtración del agua**

El trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.

“La filtración puede efectuarse en muchas formas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados), con flujo ascendente de abajo hacia arriba o descendente de arriba hacia abajo y mixto (parte ascendente y parte descendente). Por último, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad, según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante”. (Referencia bibliográfica 2).

Tradicionalmente en las plantas de tratamiento municipales han utilizado filtros de arena con flujo descendente por gravedad.

#### **2.1.1. Mecanismos responsables de la filtración en filtros de medios múltiples**

El agua, ya sea sedimentada o no, que entra a un filtro contiene una variedad muy grande de partículas en suspensión. Su tamaño puede variar desde flóculos relativamente grandes de 1mm de diámetro hasta coloides, bacterias y virus con tamaños inferiores a 1mm. Se pueden encontrar

partículas electropositivas, electronegativas y neutras, o microfloculos con polímeros adsorbidos.

Los mecanismos que transportan la materia en suspensión dentro del lecho filtrante y lo adhieren con mayor o menor eficiencia a él tienen que ser distintos según sea el tamaño de las partículas, su densidad y las características electroquímicas que posea.

El floculo grande, cuyo volumen es mayor que el de los poros del medio granular, queda retenido por simple cernido; en cambio, el material finamente dividido cuyo orden de magnitud es varias veces menor que el de los poros como las bacterias, queda removido debido a una variedad de fenómenos.

El proceso de filtración por tanto se puede considerar que ocurre en dos etapas distintas pero complementarias:

- a) Etapa de transporte de las partículas dentro de los poros
- b) Etapa de adherencia a los granos del medio

El transporte de partículas es debido a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia es debida a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos:

Los mecanismos que pueden realizar el transporte son:

- a. Cernido
- b. Sedimentación

- c. Intercepción
- d. Difusión
- e. Impacto inercial
- f. Acción hidrodinámica

Los que pueden realizar la adherencia son:

- a. Fuerzas de Van der Waals
- b. Fuerzas electroquímicas
- c. Puente químico

### **2.1.1.1 Transporte de partículas**

#### **2.1.1.1.1. Cernido**

Las partículas de mayor tamaño que los intersticios del material filtrante son atrapadas y retenidas en la superficie del medio filtrante.

El tamaño del intersticio suele variar entre 0.1 mm y 0.2 mm para granos de 0.5 mm, y entre 0.3 mm y 0.6 mm para los de 1.2 mm. El cernido en general actúa sólo en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.

El mecanismo de cernido es independiente de las características del flóculo del afluente.

#### **2.1.1.1.2. Sedimentación**

Este mecanismo permite que las partículas sean atraídas por la fuerza de gravedad hacia los granos de arena, lo que provoca su colisión. Este fenómeno se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas.

Puede producirse solamente con material suspendido relativamente grande y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta, y en zonas del lecho donde la capa hidráulica sea baja.

#### **2.1.1.1.3. Intercepción**

Mediante este mecanismo las partículas pueden colisionar con los granos de arena.

El proceso progresa en una serie de pasos:

- a. Inicialmente el flóculo empieza a pegarse a la carga superior del grano, y a medida que mayor cantidad de materia se le adhiere va siendo recubierta con una película, inclusive hasta la cara inferior;
- b. Esta película va creciendo con el tiempo, con lo que la velocidad del flujo intersticial aumenta al disminuir el tamaño de las constricciones, de modo que un menor número de partículas puede adherirse a los granos superiores y tiene que penetrar hasta las capas inferiores;

- c. Al continuar la filtración, aparecen segmentos que cuelgan de los granos, los cuales eventualmente se rompen y son retenidos más abajo por otros granos menos recubiertos;
- d. Este proceso de arrastre de la película se hace cada vez mayor a medida que su espesor crece, con lo que la colmatación del medio filtrante progresa en profundidad;
- e. Existe una marcada diferencia en la capacidad de adhesión de las partículas del flóculo. Las partículas débiles son arrastradas y reemplazadas por otras más fuertes.

#### **2.1.1.1.4. Impacto inercial**

Cuando la velocidad es alta y la partícula es grande, deben tenerse en cuenta los efectos de la inercia, los cuales hacen que aquélla pueda seguir una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo si adquiere suficiente cantidad de movimiento para eso. Las partículas pueden continuar su trayectoria original, impulsadas por las fuerzas de inercia, y chocar con el grano del filtro quedando adheridas a él.

#### **2.1.1.1.5. Difusión**

Se produce cuando la trayectoria de la partícula es modificada por micro variaciones de energía térmica en el agua y los gases disueltos en ella, lo cual puede provocar su colisión con un grano de arena.

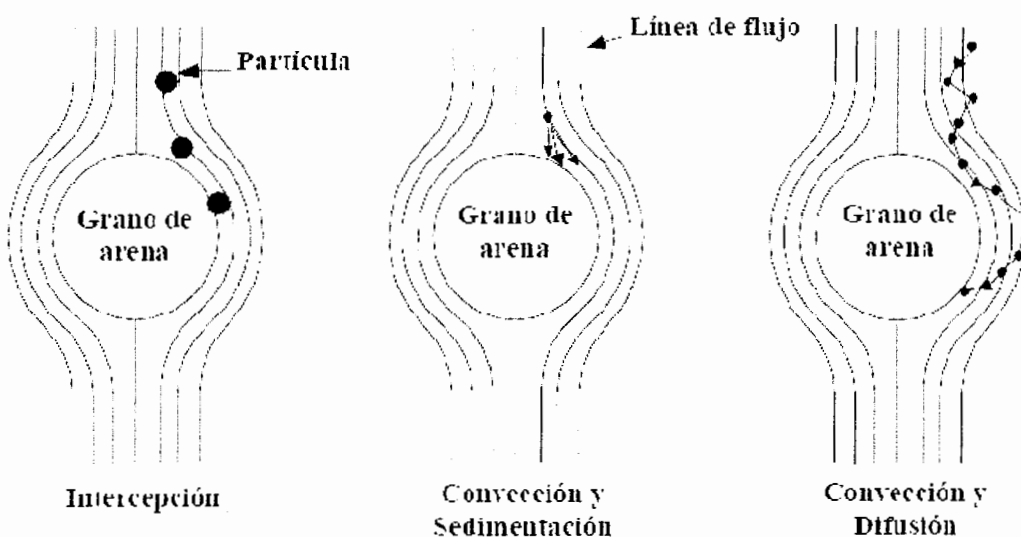
Debido al movimiento browniano, existe una tendencia de las partículas pequeñas a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de

menor concentración. Ésta es la razón por la cual se pueden encontrar sólidos adheridos a los granos del medio, en puntos donde la velocidad del flujo es prácticamente cero.

### 2.1.1.1.6. Acción hidrodinámica

Partículas de tamaño relativamente grande en un medio viscoso en movimiento laminar podrán tener en sus extremos velocidades diferentes, debido al gradiente de velocidades. La diferencia de velocidades hará girar a la partícula produciendo una diferencia de presión perpendicular al escurrimiento, haciendo que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja.

Figura 2. Mecanismos de transporte



### Mecanismos de transporte

Fuente: CEPIS, Filtración rápida,



### **2.1.1.2. Fuerzas de adherencia**

La propiedad adherente de los granos de arena es proporcionada por la acción de fuerzas eléctricas, acciones químicas y atracción de masas así como por película biológica que crece sobre ellos, y en la que se produce la depredación de los microorganismos patógenos por organismos de mayor tamaño tales como los protozoarios y rotíferas.

#### **2.1.1.2.1. Fuerzas de Van der Waals**

La constante de Van der Waals incrementa con la densidad de las partículas, el flóculo más denso se adhiere con más fuerza al medio filtrante. Las fuerzas de Van der Waals son independientes del pH y de las características de la fase acuosa.

#### **2.1.1.2.2. Fuerzas electrostáticas**

Es la combinación de las fuerzas electrostáticas con las de Van der Waals, las que determinan, dentro de ciertas circunstancias, la adsorción entre partículas.

“Considerando el mecanismo de las fuerzas electrostáticas como el responsable de la adhesión del material suspendido al medio filtrante, se consideran tres casos según Kaufman (1969)”: (Referencia bibliográfica 2).

- a. Los granos del medio filtrante son negativos y los coágulos o flóculos son positivos. Existe una fuerza de atracción;

- b. Los granos del medio filtrante son negativos mientras que los coágulos o partículas son neutros. La barrera de energía ha desaparecido y todo contacto se puede esperar que termine en adhesión;
- c. Los granos del medio filtrante son negativos y los coágulos son negativos también. En este caso existe repulsión entre unos y otros, pero las fuerzas hidrodinámicas pueden ocasionalmente vencer la barrera de energía y aproximar lo suficiente los coágulos a los granos como para que las fuerzas atractivas de Van der Waals puedan actuar. La presencia de éste caso es menos probable.

#### **2.1.1.2.3. Puente químico**

La desestabilización de los coloides es efectuada por los productos de la hidrólisis que a determinados pH se polimerizan.

Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, los que pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro.

#### **2.1.2. Mecanismos responsables de la filtración biológica**

En la filtración biológica se produce una serie de reacciones orgánicas que completan el tratamiento, eliminando bacterias patógenas y protozoarios de importancia sanitaria. Ésta se utiliza cuando no se usan sustancias desinfectantes en el agua de lavado.

La carga biológica que trae el agua cruda se introduce entre las partículas del medio filtrante, lo cual permite el crecimiento de una capa biológica en los primeros centímetros del filtro, que crece con el tiempo.

El agua cruda trae comúnmente partículas orgánicas de distinto origen, las cuales sirven de alimento a la vida acuática, que transforma esa materia al usarla como energía para su metabolismo. “Se producen así una serie de reacciones de oxidación – reducción en el interior del lecho, que disgregan esta materia y la convierten en compuestos tales como agua, dióxido de carbono, nitratos, sulfatos y fosfatos que son descargados con el efluente”. (Referencia bibliográfica 2).

Además los fenómenos de adsorción sobre la superficie de los granos revestidos de la capa biológica, inducen la remoción o inactivación de bacterias, incluidas las patógenas, las cuales no encuentran un medio favorable en ella, ya que la temperatura del agua es más baja que la del organismo humano y la cantidad de comida disponible, es limitada.

## **2.2 Filtración rápida**

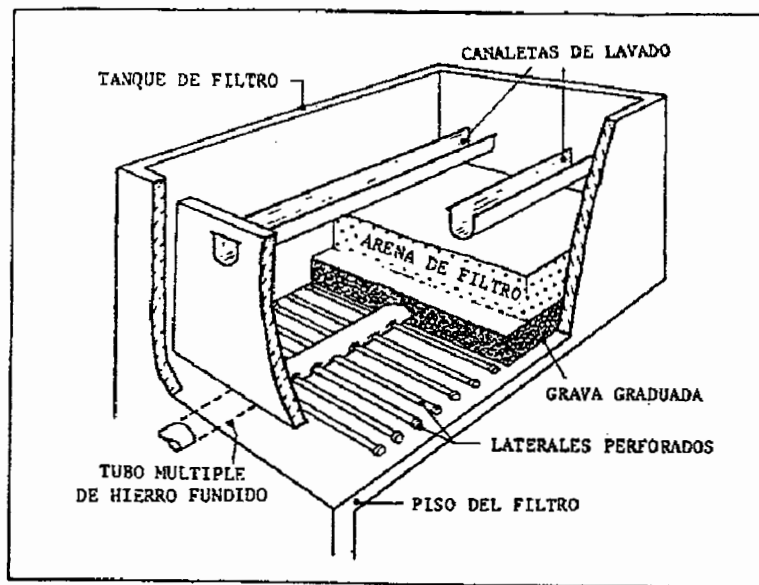
La filtración es el proceso mediante el cual se purifica el agua haciéndola pasar a través de un material poroso. Para la filtración rápida comúnmente se usa la arena como el medio filtrante pero el proceso es bastante diferente a la filtración lenta en arena.

Se utiliza arena más gruesa con un tamaño efectivo de grano en la escala de 0.4 mm – 1.2 mm y el ritmo de filtración es más elevado, generalmente entre 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora y 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora (120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día). Debido a la arena gruesa usada, los poros del lecho filtrante serán relativamente grandes y las impurezas

contenidas en el agua cruda penetrarán al fondo de los mismos. La capacidad del lecho filtrante para almacenar impurezas depositadas, es usada en forma mucho más efectiva y se puede tratar hasta agua de río muy turbia con la filtración rápida.

Para realizar la limpieza del lecho filtrante rápido, no es suficiente raspar la capa superior. La limpieza de los filtros rápidos se realiza mediante el lavado por corriente de agua limpia. Eso se hace dirigiendo un flujo elevado de agua a través del lecho filtrante desde donde se expande y se arrastra. Esto cae fuera del filtro los atoros depositados. La limpieza de un filtro rápido se puede realizar en poco tiempo, no es necesaria ni siquiera media hora aproximadamente.

Figura 3. Filtro rápido de gravedad



Fuente: CEPIS, **Filtración rápida**, página 230.

### **2.2.1 Aspectos teóricos**

“La remoción general de impurezas del agua por filtración rápida, se lleva a cabo mediante una combinación de varios procesos diferentes. Los más importantes son: colado, sedimentación, absorción y procesos bacteriológicos y bioquímicos”. (Referencia bibliográfica 3). En la filtración rápida el material del lecho del filtro es mucho más grueso y el ritmo de filtración es mucho más elevado.

El colado de impurezas en un filtro rápido no es importante debido a los poros relativamente grandes en el lecho de filtro. La sedimentación no será muy efectiva debido a las elevadas tasas de filtración usadas. Así, se retendrá muchas menos impurezas mediante el colado y la sedimentación que en el filtro lento de arena. Especialmente las capas superiores del lecho de filtro serán mucho menos efectivas y habrá una profunda penetración de impurezas en todo el lecho del filtro rápido.

El efecto más importante de purificación en la filtración rápida es la absorción de impurezas con carga eléctrica hacia los granos del lecho filtrante con una carga eléctrica opuesta. En un filtro rápido las cargas estáticas naturales del material del lecho de filtro están complementadas por cargas electrocinéticas producidas por el flujo elevado de agua. Las partículas cargadas son arrastradas fuera de los granos del lecho de filtro con el resultado de que los granos quedan con una carga opuesta. El efecto electro cinético refuerza grandemente la acción de absorción.

En un filtro lento de arena el agua permanece varias horas en el lecho de filtro, pero con la filtración rápida el agua pasa sólo en unos cuantos minutos. Frecuentemente se remueve los atoros orgánicos acumulados en un filtro

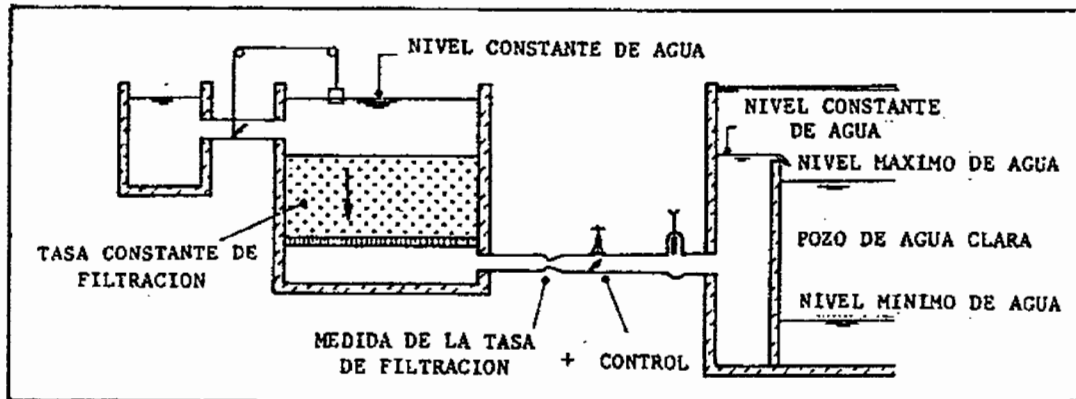
rápido cuando se limpia el filtro mediante el lavado por corriente de agua limpia. Hay muy poco tiempo y oportunidad de que se desarrolle cualquier biodegradación de materia orgánica y de que se produzca la muerte de bacterias patógenas y virus. La degradación limitada de materia orgánica no necesita ser una desventaja seria ya que los atoros acumulados serán lavados del filtro durante el lavado por corriente de agua limpia. Por lo general, la pobre actividad bacteriológica y bioquímica de un filtro rápido será insuficiente para producir agua bacteriológicamente segura.

### **2.2.2 Control de filtro**

“Hay varios tipos de controladores de ritmo de filtración: dispositivo de control del ritmo de ingreso (igual distribución o “división de flujo”) y dispositivos de control de ritmo de salida (válvulas operadoras a nivel, vertederos de derrame y sifones). Básicamente, los arreglos de control de ritmo de filtro se pueden dividir en tres grupos”: (Referencia bibliográfica 3).

- a. Cada filtro tiene un controlador individual de ritmo que mantiene la producción de agua filtrada en la escala constante deseada;
- b. El flujo total de agua a través de la planta del filtro es controlado mediante el ritmo de ingreso de agua cruda o, en forma alternativa, por el ritmo en el cual se extrae el agua filtrada;
- c. Igual que el número 2, pero las unidades del filtro operan en ritmos individuales descendentes.

Figura 4. Control de tasa de filtro



Fuente: CEPIS, **Filtración rápida**, página 236.

### 2.2.3 Aplicaciones de la filtración rápida

Hay varias aplicaciones diferentes de la filtración rápida en el tratamiento de agua para abastecimientos de agua de bebida.

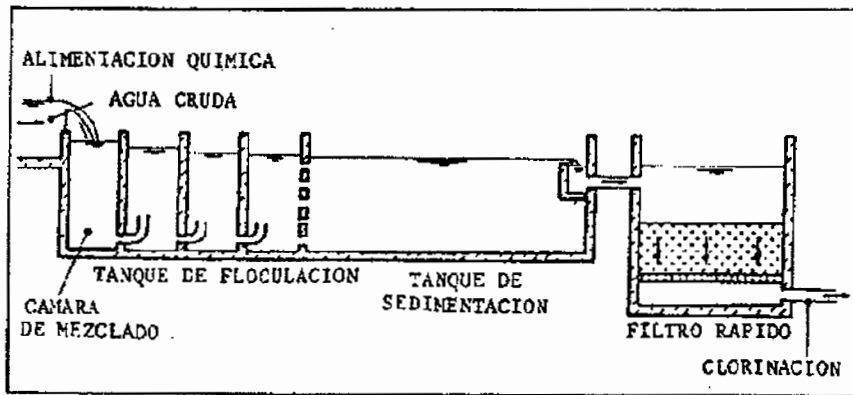
En el tratamiento del agua subterránea, se usa la filtración rápida para remover el hierro y el manganeso. Para ayudar al proceso de filtración, frecuentemente se provee la aeración como pre tratamiento para formar compuestos insolubles de hierro y manganeso.

Para agua de turbiedad baja como la que se halla frecuentemente en lagos y algunas veces en ríos, la filtración rápida debe ser capaz de producir agua clara, la cual, sin embargo, puede contener aún bacterias patógenas y virus. Entonces es necesario un tratamiento final, tal como la cloración, para obtener agua bacteriológicamente segura.

En el tratamiento de agua de río con turbiedad elevada, se puede usar la filtración rápida como pre tratamiento para reducir la carga en los filtros lentos

de arena siguientes o se le puede aplicar para el tratamiento de agua que ha sido clarificada mediante coagulación, floculación y sedimentación. En tales casos se requiere nuevamente una cloración final.

Figura 5. **Filtración rápida después de la coagulación, floculación y sedimentación**



Fuente: CEPIS, *Filtración rápida*, página 231.

## 2.2.4 Tipos de filtros rápidos

Los filtros rápidos se construyen en su mayoría al descubierto pasando el agua al lecho de filtro mediante gravedad.

Los más importantes son: filtros de presión, filtros de flujo ascendente y filtros de medios múltiples.

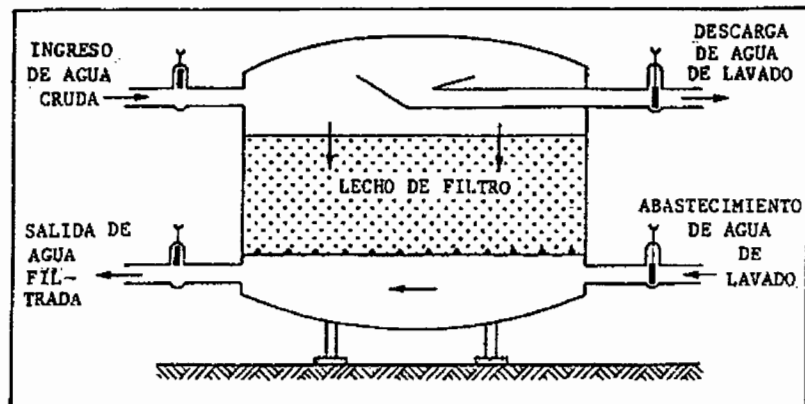
### 2.2.4.1 Filtros de presión

Son de construcción similar a los filtros de tipo gravedad, pero el lecho de filtro y el fondo del filtro están encerrados en un recipiente hermético de presión hecho de acero. La fuerza de conducción para el proceso de filtración es la



presión del agua aplicada en el lecho de filtro, la cual puede ser tan elevada que se puede alcanzar casi cualquier longitud deseada de la carrera del filtro. Los filtros de presión están disponibles comercialmente como unidades completas. No son tan fáciles de instalar, operar y mantener.

Figura 6. Filtro de presión



Fuente: CEPIS, **Filtración rápida**, página 232.

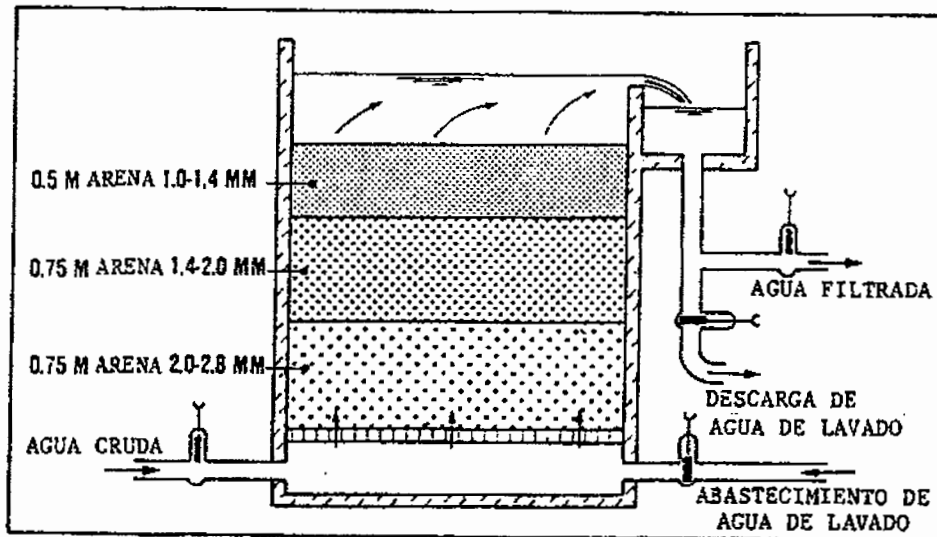
#### 2.2.4.2 Filtros de flujo ascendente

Sirven para un proceso de filtración de grueso a fino. La capa gruesa del fondo del lecho de filtro criba la mayor parte de las impurezas suspendidas, incluso del agua cruda turbia, sin ningún aumento grande de la resistencia del lecho de filtro debido a los poros grandes. Las capas finas sobrepuestas tienen poros más pequeños pero aquí también la resistencia del filtro aumentará sólo lentamente ya que no quedan muchas impurezas que filtrar.

En los filtros de flujo ascendente se usa la arena como el único medio de filtro. Frecuentemente, se les usa para el pre tratamiento de agua que es purificada nuevamente mediante filtros rápidos del tipo de gravedad o mediante filtros lentos de arena.

Una desventaja es que la resistencia permisible en un filtro de flujo ascendente no es mayor que el peso sumergido del lecho filtrante.

Figura 7. Filtro de flujo ascendente

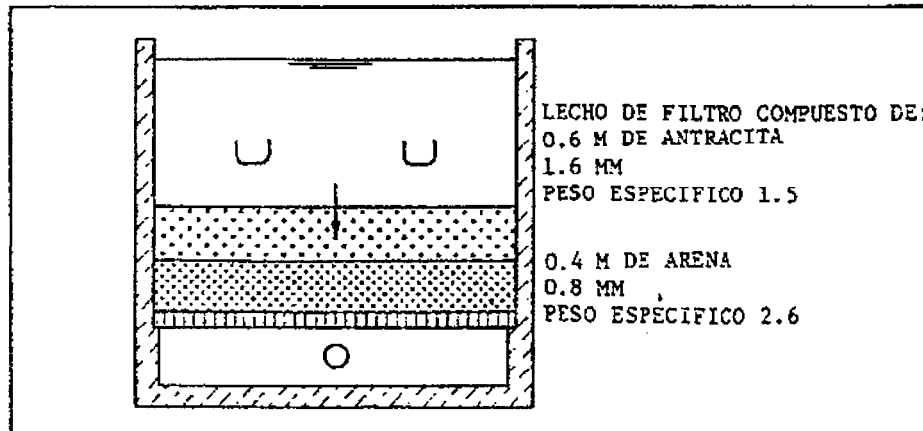


Fuente: CEPIS, Filtración rápida, página 233.

### 2.2.4.3 Filtros de medios múltiples

Son del tipo gravedad, filtros de flujo descendente, cuyo lecho de filtro está compuesto de varios materiales diferentes, los cuales se colocan de grueso a fino en la dirección del flujo. "Para filtros rápidos pequeños, es común usar sólo dos materiales en combinación: 0.3 m – 0.5 m de arena con un tamaño efectivo de 0.4 m – 0.7 mm como capa inferior, cubierta por 0.5 m – 0.7 m de antracita, piedra pómez o cortezas molidas de coco con un tamaño efectivo de 1.0 – 1.6 mm". (Referencia bibliográfica 3). Como tratamiento final, los filtros de capas múltiples pueden proporcionar resultados excelentes y, cuando se dispone localmente de materiales adecuados, bien vale la pena considerar su aplicación en plantas pequeñas de tratamiento.

Figura 8. Filtro de medios múltiples



Fuente: CEPIS, **Filtración rápida**, página 233.

### 2.3. Antracita

Este tipo de carbón es considerado del más elevado rango metamórfico, en el que el contenido de carbono fijo oscila entre 92% y 98%. Contiene un porcentaje bajo de sustancia volátil 2% – 8%. Es duro y negro; tiene lustre semimetálico, y se fractura en forma semiconcoidal, la antracita se inflama con dificultad y arde con una llama corta y azul sin humo. En general tiene un valor calorífico de 12000 – 15000 BTU.

Utilizado en filtros de medio múltiple, debido a su densidad relativamente media, permanecerá sobre medios más pesados tales como arena o granate que proporciona una capa excelente de la pre filtración. Los medios de antracita son un carbón machacado calificado seleccionado específicamente para el tratamiento de aguas.

Es uno de los medios filtrantes más empleados, básicamente es carbón activado triturado y tamizado con gránulos que van desde 0.5  $\mu\text{m}$  hasta 3  $\mu\text{m}$ .

Es un buen complemento para los filtros de medios múltiples, en compañía de arena o arena verde de manganeso.

Los materiales de filtros de antracita se seleccionan específicamente de minas profundas que tienen el porcentaje más alto de carbono. Los materiales de la arena de filtración de agua potable se clasifican hidráulicamente para reducir la presencia de minerales extraños y el contenido de ceniza. Los medios de filtración de agua luego son filtrados y lavados para asegurar su idoneidad para los propósitos de la filtración de agua. La antracita se caracteriza por producir mejoras confiables en la extracción de turbidez, principalmente gracias a su mayor capacidad para retener sólidos. Además, los medios con coeficientes de uniformidad bajos mejoran los índices de flujo.

Figura 9. **Antracita**



Fuente: fotografía propia.

#### **2.4. Carbón activado**

“El carbón activado puede tener un área superficial mayor de 500 m<sup>2</sup>/g, siendo fácilmente alcanzables valores de 1000 m<sup>2</sup>/g. Algunos carbones activados pueden alcanzar valores superiores a los 2500 m<sup>2</sup>/g”. (Referencia bibliográfica 1)

El carbón es activado por una serie de procesos los cuales incluyen:

1. Remoción de toda el agua (dehidratación)
2. Conversión del material orgánico a carbón elemental, quitando la porción que no contiene carbón (carbonización)
3. Quemando alquitrán y agrandando los poros (activación)

El carbón activado es derivado de gases, líquidos o sólidos de sustancias orgánicas, por medio de uno de los dos siguientes métodos de manufactura, cada uno incluye una descomposición térmica para iniciar el material: a) alta temperatura (799 – 900°C) oxidación de una sustancia que es cargada previamente con carbón tales como coque, carbón mineral, en presencia de vapor de aire o dióxido de carbono, b) Temperatura baja (200 – 650°C) deshidratación química y/o reacción química con celulosa, en ácido sulfúrico, ácido fosfórico o cloruro de zinc.

La estructura básica de carbón activado es cercanamente aproximada a la estructura pura del grafito. El cristal de grafito está compuesto por placas de hexágonos fusionados unido por fuerzas débiles de Van der Waals. Las placas están sostenidos por uniones de carbón – carbón.

El carbón activado es una forma del grafito desorganizado, debido a las impurezas y la preparación (proceso de activación).

El carbón activo saturado se puede regenerar mediante la aplicación de calor. Los aerogeles de carbón, que son más costosos, tienen superficies efectivas muy altas y encuentran uso similar al carbón activado en aplicaciones especiales.

El carbón activo puede adsorber a partir de líquidos y de agua un abanico de sustancias orgánicas, de materiales oxidantes (como el cloro y el ozono) y ciertos metales pesados.

Determinación de propiedades fundamentales que son el volumen específico del poro, área específica, distribución del poro, distribución del área, naturaleza del área y naturaleza del adsorbente. Los rayos X determinan que el carbón activado es constituido por láminas microcristalinas de anillos de seis carbonos parecido al grafito.

Volumen específico del poro: en mL/g se calcula sustrayendo el volumen del esqueleto del volumen específico de la partícula. El volumen específico del esqueleto es el recíproco de la densidad del Carbón activado en helio, el volumen específico de la partícula es el recíproco de la densidad del carbón activado en mercurio. El método es limitado para partículas mayores a 80 mesh por la densidad en mercurio es incierta.

Área específica superficial: en  $m^2/g$  es medida por la adsorción de nitrógeno a temperatura cercana a su punto de ebullición.

Distribución del volumen del poro: para ganar área superficial en la distribución de los poros de varios tamaños, es necesario medir solo la distribución del volumen del poro. Se mide por medio de dos técnicas: con mercurio o con nitrógeno.

Determinación de la capacidad de adsorción: está determinado por el volumen de gas o líquido que puede ser tratado por unidad de peso de carbón. Determina el costo y el tamaño del equipo, para manejarlos filtros con polvo y columnas para el tipo granular.

No hay una prueba específica para determinar la capacidad de adsorción. Según el método de ASTM consiste en determinar la cantidad de pruebas o la cantidad de muestra de carbón requerida para remover un porcentaje de impurezas de la solución y compararla con la cantidad de referencia de carbón requerida para obtener el mismo grado de purificación.

Las aplicaciones típicas para el agua y los líquidos son:

- ⊥ La producción de agua potable: quitar el sabor, el olor y los micropoluentes tales como pesticidas y otros;
- ⊥ El tratamiento de aguas domésticas: en línea y mediante filtros de cartuchos;
- ⊥ El tratamiento de agua de proceso: quitar el cloro y el ozono activos;
- ⊥ El saneamiento de agua subterránea;
- ⊥ El tratamiento terciario de aguas residuales: extracción de micropoluentes y de la DQO, olores, colores;
- ⊥ La purificación de flujos de productos;
- ⊥ Como catalizador en procesos químicos.

Datos importantes de la ficha técnica del carbón activado

Ventajas: (Ver Anexo No.8 Página 89)

- Es un material sobresaliente para las aplicaciones que requieren la remoción de sabor, olor y disolventes orgánicos de agua con material suspendido. Este producto puede ser utilizado en filtros de agua de ancho rango de niveles de pH;
- Gran área superficial resulta excepcional alta capacidad y eficiencia;
- Balanceada estructura de poro da mayor eficiencia del rango de adsorción;

- Es duradero, las pérdidas por uso son mínimas;
- Contiene alto contenido de cenizas de carbón de bajo peso.

#### Propiedades físicas

- Color: Negro
- Tamaño de Mesh: 12 x 40
- Densidad de gran cantidad: 31 lbs./cu. ft.
- Gravedad Especifica: 1.4-1.5 gm/cc
- Tamaño efectivo: 0.55-0.75 mm, 0.65 típico
- Ceniza soluble en agua: menor de 0.5%
- *Iodine #*: 850 min., 900 típica
- *Abrasion #*: 75 min., 81 typical
- *Moisture as packed*: 2% max., 0.7% típica
- *Meets American Water Works Association standard B604-96*

#### Condiciones de operación

- El agua que será filtrada debe preferiblemente ser libre de aceite y material suspendido;
- El agua que será filtrada debe ser relativamente libre de hierro y turbiedad para que llegue a su vida máxima;
- Rango de pH del agua: amplio rango;
- Profundidad de la cama: 26-30 pulgadas utilizándolo solo.



Figura 10. **Carbón activado**



Fuente: fotografía propia.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1 Variables

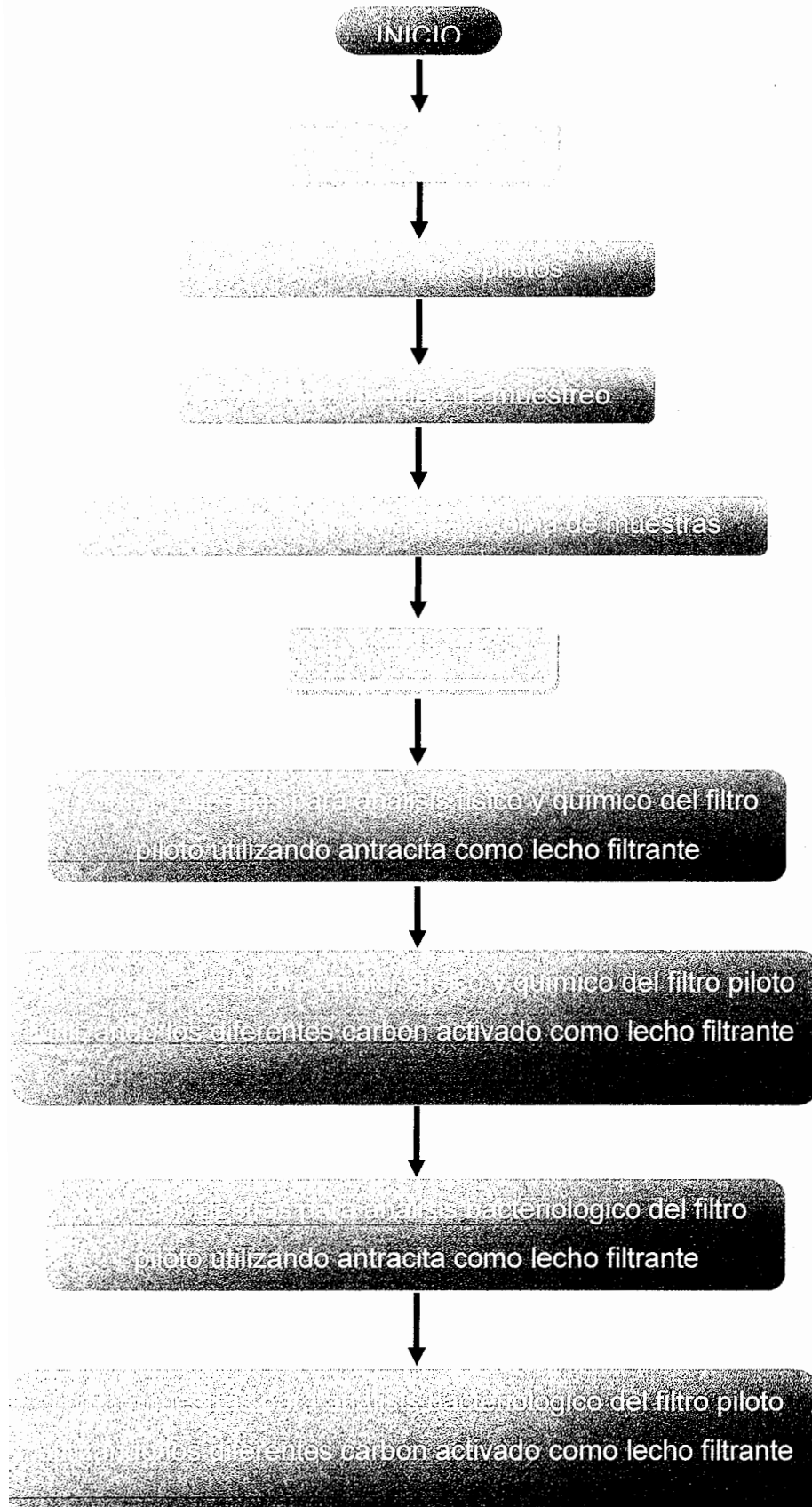
Todos los métodos de análisis y exámenes que se realizaron en las muestras para obtener las características físicas, químicas y bacteriológicas son los recomendados por el *Estándar Methods for the Examination of Water and Wastewater*, que son aprobados por la norma COGUANOR 29001, entre estos análisis se pueden mencionar:

Tabla I. **Parámetros a analizar**

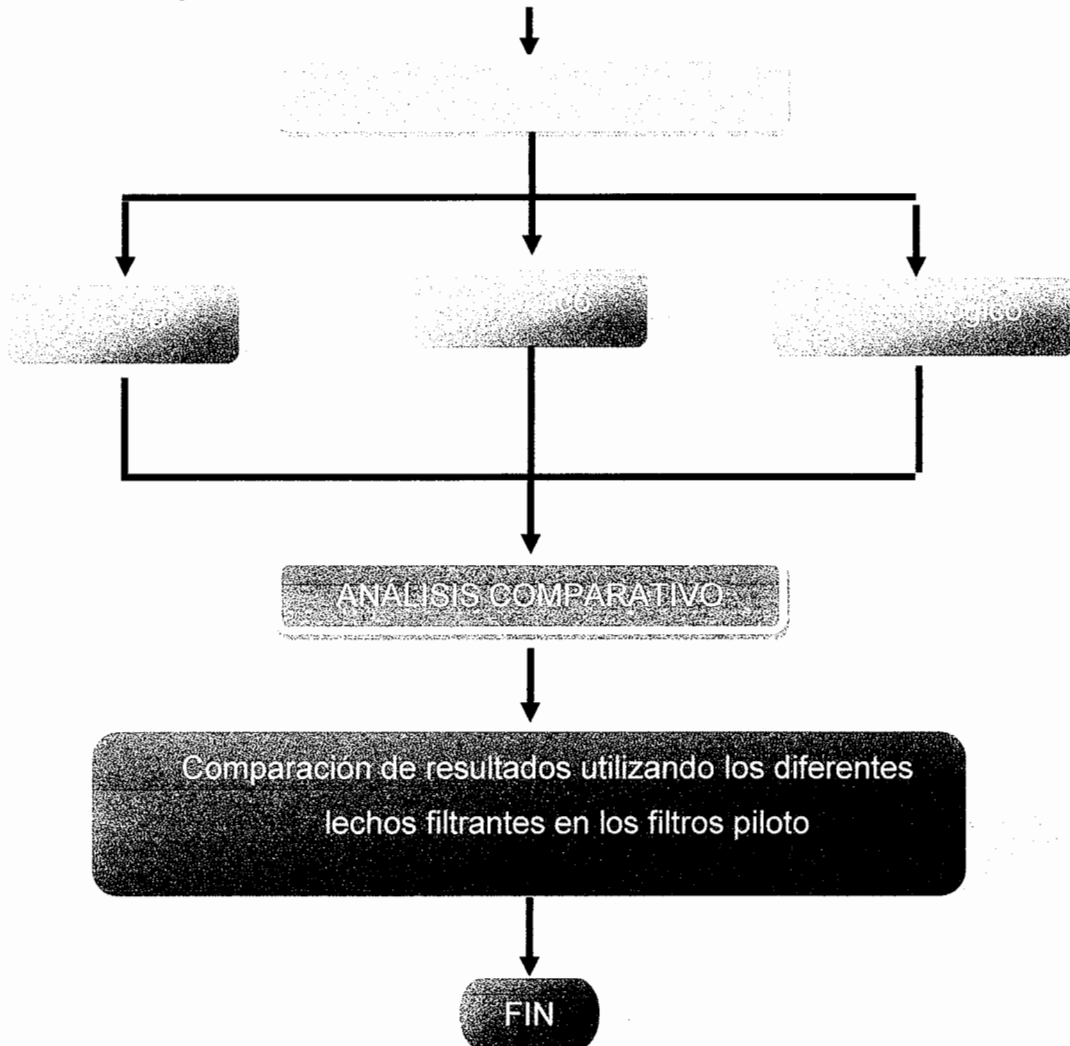
Microbiológico para el agua del sistema de distribución	↓	Coliformes fecales
	↓	Coliformes totales
Análisis químico para agua del sistema de distribución	↓	pH
	↓	Dureza total
	↓	Nitratos
	↓	Sulfatos
	↓	Hierro
Análisis físico para agua del sistema de distribución	↓	Manganeso
	↓	Olor
	↓	Color
	↓	Turbiedad.

Fuente: Norma COGUANOR NGO 29 001.

Figura 11. Flujograma



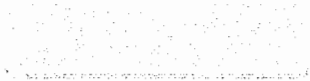
Continuación figura 11.



Fuente: elaboración propia.

Donde:

↓ **Etapas de investigación**



↓ **Etapas de experimentación**



### **3.2 Delimitación de campo de estudio**

El desarrollo de este trabajo se limitará a realizar el análisis del desempeño del carbón activado y de la antracita utilizando un filtro piloto, debido a que al utilizar un filtro de la planta requeriría un costo elevado.

### **3.3 Recursos humanos disponibles**

- Investigadora: Cindy Arelis Pineda Fuentes
- Asesor: Ing. Qco.M.Sc. en Ingeniería Sanitaria Zenon Much Santos

### **3.4 Recursos materiales disponibles**

#### **3.4.1 Edificio**

Laboratorio de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy” de la empresa municipal de agua (EMPAGUA)

#### **3.4.2 Equipo**

Aparatos de laboratorio propiedad de la empresa municipal de agua (EMPAGUA).

- ✓ Color (Pt. de color) en un colorímetro
- ✓ Sulfato, hierro, manganeso residual. (mg/L), por medio de un colorímetro en celdas de 10cm<sup>3</sup>
- ✓ Dureza (mg/L) por medio de titulaciones
- ✓ Potencial de hidrógeno, un potenciómetro
- ✓ Análisis bacteriológico sobre muestras de agua

#### **3.4.3 Material de estudio**

Libros referentes al tema, tesis, trabajos de graduación, Normas de COGUANOR en especial la norma NGO 29001 que establece los parámetros para el agua potable u otro documento que la investigadora considere necesario.

#### **3.4.4 Filtro piloto**

Filtro que fue diseñado por la investigadora y consiste en:

- ✓ Base de vidrio con dos placas de 21.75 cm X 38.4 cm y dos placas de 21.75 cm X 18.3 cm;
- ✓ Lecho filtrante: grava, arena sílice y carbón activado o antracita;
- ✓ Una bomba para generar el caudal deseado.

Véase figuras No.15 a 18 en anexo 7.

#### **3.4.5 Volúmenes utilizados**

Para cada corrida en cada uno de los filtros se utilizó un volumen de 8 litros en un tiempo de 2 minutos para descargarlo. La tubería de entrada es de 3 cm y la de salida es de 2.25 cm que equivalen al tres por ciento de la tubería que tienen los filtros de la planta.

#### **3.4.6 Cristalería y equipo**

Cristalería, reactivos, equipo de laboratorio y de campo los cuales son recomendados y proporcionados por el laboratorio antes mencionado.

Reactivos: Hach. Aprobado por la Agencia de la Protección Ambiental EPA, para Hach.



Pureza de reactivos: según especificaciones de las marcas anteriormente mencionadas.

La metodología empleada consistió, en la selección de los sitios de muestreo. Se estableció un cronograma para la toma de muestras, recolectarlas, transportarlas, conservarlas, realizar los respectivos análisis, tanto para el lecho filtrante actual como para la realización de pruebas utilizando un filtro piloto, a escala de los filtros de la empresa, y presentar los resultados.

- ✓ Selección de los sitios de muestreo;
- ✓ Frecuencia del muestreo: en cada punto de muestreo se tomó una muestra para realizar los análisis físico-químicos y otra para el bacteriológico;
- ✓ Comparación de resultados para los diferentes lechos filtrantes.

### **3.5 Técnica cualitativa o cuantitativa**

#### **3.5.1 Procedimiento para toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico**

- ✓ Utilice un recipiente de vidrio de 1/2 L de capacidad para limpio y seco para captar la muestra;
- ✓ El recipiente se enjuaga primero tres veces consecutivas con la misma agua de la fuente en que se va a tomar la muestra, dependiendo del punto de captación del cual se trate;

- ✓ Llenar y luego se tapa evitando contaminaciones;
- ✓ No llenar el recipiente completamente, se debe dejar el espacio libre requerido para la agitación de la muestra previa al análisis (aproximadamente 10% de volumen del recipiente de polietileno).

### **3.5.2 Procedimiento para toma de muestra de agua para análisis microbiológico**

- Lavarse las manos con abundante agua y jabón
- Las muestras se tomarán en frascos de plástico esterilizados
- Rotular el frasco para diferenciar la muestra a ser analizada
- Transportar inmediatamente al laboratorio

### **3.6 Recolección y ordenamiento de la información**

Tomando en cuenta los parámetros que especifica la norma COGUANOR NGO 29001 se tomaron para el afluente y los efluentes de los filtros piloto para determinar el porcentaje de remoción de cada corrida realizada.

### 3.7 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se realizó un análisis estadístico con los parámetros que permiten realizarlo según son los datos obtenidos excluyendo los parámetros de coliformes totales y fecales, pH y temperatura, obteniendo la media de los datos, la desviación estándar.

### 3.8 Análisis estadístico

- Fórmula para cálculo de la media

$$\mu = \sum_i \frac{X_i}{N} \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Donde:

$\mu$ : es la media de los datos

$X_i$ : dato obtenido

N: número de datos

- Fórmula para cálculo de la varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza de los datos

$\mu$ : es la media de los datos

$X_i$ : dato obtenido

N: número de datos

- Fórmula para estimación de la variación dentro las muestras

$$\sigma_{dentro}^2 = \frac{\sum(X_i - \mu)^2}{N-1} \quad \text{Ecuación No. 3}$$

Donde:

$\sigma_{dentro}^2$  = Varianza dentro de las muestras

$\mu$ : es la media de los datos

$X_i$  : dato obtenido

N: número de datos

Grados de libertad:  $(N - 1) h$

Luego se realiza un promedio con los datos obtenidos.

- Fórmula para estimación de la variación entre las muestras

$$\sigma_{entre}^2 = \frac{n \sum(\mu_i - \mu_T)^2}{(h-1)} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

Donde:

$\sigma_{entre}^2$  = Varianza entre las muestras

$\mu_i$ : es la media de cada muestra

$\mu_T$ : es la media de las medias de cada muestra

h: número de muestras

n: número de datos de cada muestra

Grados de libertad:  $h-1$

- Fórmula para determinar valor F

$$F = \frac{\sigma^2_{entre}}{\sigma^2_{dentro}} \quad \text{Ecuación No. 5}$$

Donde:

F = valor de referencia

$\sigma^2_{entre}$  = Varianza entre las muestras

$\sigma^2_{dentro}$  = Varianza dentro de las muestras

El resultado se busca en la tabla del valor F.

- Fórmula para determinar la diferencia menor significativa:

$$DSM = s \sqrt{\frac{2}{n}} * t_{h(n-1)} \quad \text{Ecuación No. 6}$$

Donde:

DSM = Diferencia significativa menor

S = es la desviación estándar

N = número de muestras

$T_{h(n-1)}$  = Valor de tabla teniendo un 5% de error



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados pruebas físicas, químicas y bacteriológicas

Tabla II. Corrida 1

Fecha 18/05/2010 Hora 11:30

Parámetro	Corrida 1				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	<1		<1	
Coliformes totales	<1	<1		<1	
Ph	7.000	7.000		7.600	
Temperatura (°C)	20.000	20.000		20.000	
Dureza total (mg/L)	44.000	44.000	0.000	40.000	9.091
Nitratos (mg/L)	9.680	8.800	9.091	9.680	0.000
Hierro (mg/L)	0.270	0.270	0.000	0.270	0.000
Manganeso (mg/L)	0.102	0.044	56.863	0.012	88.235
Sulfatos (mg/L)	27.000	27.000	0.000	23.000	14.815
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	9.000	5.000	44.444	6.000	33.333
Turbiedad (NTU)	1.270	0.951	25.118	0.884	30.394

Fuente: datos experimentales.

Tabla III. **Corrida 2**

Fecha

20/05/2010

Hora

11:00

Parámetro	Corrida 2				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	<1		<1	
Coliformes totales	<1	<1		<1	
pH	6.070	6.200		6.260	
Temperatura (°C)	20.200	20.400		20.200	
Dureza total (mg/L)	46.000	46.000	0.000	42.000	8.696
Nitratos (mg/L)	3.080	3.080	0.000	3.080	0.000
Hierro (mg/L)	0.140	0.140	0.000	0.130	7.143
Manganeso (mg/L)	0.046	0.046	0.000	0.024	47.826
Sulfatos (mg/L)	72.000	72.000	0.000	67.000	6.944
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	81.000	57.000	29.630	20.000	75.309
Turbiedad (NTU)	15.800	9.950	37.025	6.020	61.899

Fuente: datos experimentales.



Tabla IV. **Corrida 3**

Fecha 08/06/2010 Hora 10:00

Parámetro	Corrida 3				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	<1		30.9	
Coliformes totales	1	<1		456.9	
pH	6.440	6.450		6.790	
Temperatura (°C)	22.600	22.500		22.300	
Dureza total (mg/L)	50.000	80.000	-60.000	54.000	-8.000
Nitratos (mg/L)	7.480	4.840	35.294	5.720	23.529
Hierro (mg/L)	0.200	0.040	80.000	0.040	80.000
Manganeso (mg/L)	0.024	0.013	45.833	0.024	0.000
Sulfatos (mg/L)	51.000	51.000	0.000	51.000	0.000
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	13.000	6.000	53.846	4.000	69.231
Turbiedad (NTU)	3.690	2.890	21.680	2.580	30.081

Fuente: datos experimentales.

Tabla V. **Corrida 4**

Fecha

10/06/2010

Hora

10:00

Parámetro	Corrida 4				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	1.000		3.000	
Coliformes totales	<1	1732.900		18.300	
pH	5.790	5.860		8.780	
Temperatura (°C)	20.700	20.900		20.800	
Dureza total (mg/L)	66.000	68.000	-3.030	54.000	18.182
Nitratos (mg/L)	8.800	5.720	35.000	6.160	30.000
Hierro (mg/L)	0.170	0.110	35.294	0.060	64.706
Manganeso (mg/L)	0.061	0.043	29.508	0.026	57.377
Sulfatos (mg/L)	80.000	80.000	0.000	80.000	0.000
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	43.000	17.000	60.465	7.000	83.721
Turbiedad (NTU)	10.500	5.080	51.619	3.020	71.238

Fuente: datos experimentales.

Tabla VI. **Corrida 5**

Fecha 15/06/2010 Hora 10:00

Parámetro	Corrida 5				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	<1		7.400	
Coliformes totales	3.100	116.000		721.500	
pH	6.550	6.580		6.730	
Temperatura (°C)	21.200	21.300		21.100	
Dureza total (mg/L)	60.000	58.000	3.333	52.000	13.333
Nitratos (mg/L)	3.960	3.960	0.000	3.960	0.000
Hierro (mg/L)	0.350	0.170	51.429	0.190	45.714
Manganeso (mg/L)	0.064	0.020	68.750	0.019	70.313
Sulfatos (mg/L)	49.000	49.000	0.000	48.000	2.041
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	60.000	17.000	71.667	16.000	73.333
Turbiedad (NTU)	11.500	5.350	53.478	4.030	64.957

Fuente: datos experimentales.

Tabla VII. **Corrida 6**

Fecha

17/06/2010

Hora

10:00

Parámetro	Corrida 6				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	629.400	<1		2.000	
Coliformes totales	<1	<1		122.300	
pH	6.100	6.090		6.540	
Temperatura (°C)	21.100	21.300		21.200	
Dureza total (mg/L)	48.000	54.000	-12.500	46.000	4.167
Nitratos (mg/L)	8.360	2.200	73.684	7.480	10.526
Hierro (mg/L)	0.070	0.000	100.000	0.060	14.286
Manganeso (mg/L)	0.037	0.037	0.000	0.013	64.865
Sulfatos (mg/L)	76.000	76.000	0.000	73.000	3.947
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Turbiedad (NTU)	2.400	2.050	14.583	1.790	25.417

Fuente: datos experimentales.

Tabla VIII. **Corrida 7**

Fecha

22/06/2010

Hora

10:00

Parámetro	Corrida 7				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	2.000	3.000		12.100	
Coliformes totales	344.800	119.800		410.600	
pH	8.780	6.080		6.620	
Temperatura (°C)	20.000	19.900		20.100	
Dureza total (mg/L)	50.000	48.000	4.000	46.000	8.000
Nitratos (mg/L)	2.200	2.200	0.000	2.200	0.000
Hierro (mg/L)	0.130	0.110	15.385	0.130	0.000
Manganeso (mg/L)	0.097	0.065	32.990	0.041	57.732
Sulfatos (mg/L)	57.000	57.000	0.000	50.000	12.281
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	146.000	32.000	78.082	37.000	74.658
Turbiedad (NTU)	30.400	8.460	72.171	8.630	71.612

Fuente: datos experimentales.

Tabla IX. **Corrida 8**

Fecha

24/06/2010

Hora

10:00

Parámetro	Corrida 8				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	35.000	37.400		25.000	
Coliformes totales	125.000	193.500		461.100	
pH	5.300	5.350		5.910	
Temperatura (°C)	20.200	20.200		20.400	
Dureza total (mg/L)	50.000	50.000	0.000	50.000	0.000
Nitratos (mg/L)	4.400	3.080	30.000	4.400	0.000
Hierro (mg/L)	0.160	0.020	87.500	0.040	75.000
Manganeso (mg/L)	0.020	0.020	0.000	0.020	0.000
Sulfatos (mg/L)	80.000	80.000	0.000	80.000	0.000
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	145.000	28.000	80.690	7.000	95.172
Turbiedad (NTU)	29.300	6.410	78.123	4.870	83.379

Fuente: datos experimentales.

**Tabla X. Corrida 9**

Fecha 29/06/2010 Hora 10:00

Parámetro	Corrida 9				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	5.200		5.200	
Coliformes totales	2.000	290.900		488.400	
pH	6.130	6.060		6.470	
Temperatura (°C)	20.900	21.000		21.100	
Dureza total (mg/L)	50.000	50.000	0.000	50.000	0.000
Nitratos (mg/L)	4.400	1.760	60.000	4.400	0.000
Hierro (mg/L)	0.020	0.000	100.000	0.020	0.000
Manganeso (mg/L)	0.015	0.006	60.000	0.015	0.000
Sulfatos (mg/L)	80.000	80.000	0.000	80.000	0.000
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	15.000	7.000	53.333	2.000	86.667
Turbiedad (NTU)	1.460	1.460	0.000	1.460	0.000

Fuente: datos experimentales.

Tabla XI. **Corrida 10**

Fecha

01/07/2010

Hora

10:00

Parámetro	Corrida 10				
	Afluente	Efluente antracita	% Remoción	Efluente carbón activado	% Remoción
Coliformes fecales	<1	4.100		<1	
Coliformes totales	<1	52.800		261.300	
pH	6.050	6.000		6.220	
Temperatura (°C)	20.600	20.800		20.800	
Dureza total (mg/L)	50.000	50.000	0.000	50.000	0.000
Nitratos (mg/L)	5.720	2.640	53.846	5.720	0.000
Hierro (mg/L)	0.030	0.000	100.000	0.030	0.000
Manganeso (mg/L)	0.041	0.041	0.000	0.022	46.341
Sulfatos (mg/L)	80.000	80.000	0.000	80.000	0.000
Olor	No rechazable	No rechazable		No rechazable	
Color (unidades)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Turbiedad (NTU)	0.901	0.901	0.000	0.775	13.984

Fuente: datos experimentales.



## 4.2 Resultados análisis estadístico

Tabla XII. **Media de porcentajes de remoción**

Parámetro	Media		
	Efluente antracita	Efluente carbón activado	Media de las medias
Dureza total (mg/L)	-6.820	5.347	-0.736
Nitratos (mg/L)	29.692	6.406	18.049
Hierro (mg/L)	56.961	28.685	42.823
Manganeso (mg/L)	29.394	43.269	36.332
Sulfatos (mg/L)	0.000	4.003	2.001
Color (unidades)	47.216	59.142	53.179
Turbiedad (NTU)	35.380	45.296	40.338

Fuente: datos calculados.

Tabla XIII. **Varianza de los porcentajes de remoción**

Parámetro	Varianza	
	Efluente antracita	Efluente carbón activado
Dureza total (mg/L)	369.718	58.454
Nitratos (mg/L)	729.580	128.236
Hierro (mg/L)	1748.696	1147.614
Manganeso (mg/L)	775.486	1030.527
Sulfatos (mg/L)	0.000	30.893
Color (unidades)	855.958	1236.315
Turbiedad (NTU)	778.164	817.655

Fuente: datos calculados.

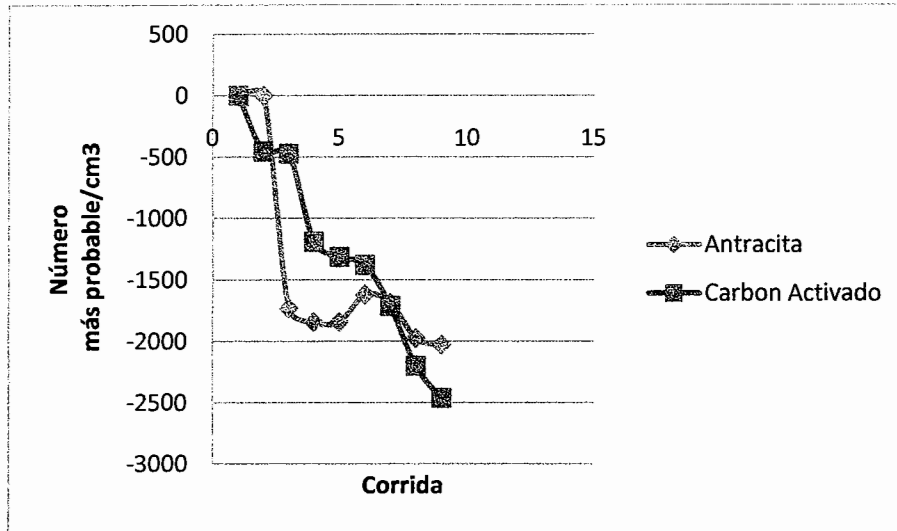
Tabla XIV. **Análisis estadístico**

Parámetro	Variación dentro de las muestras	Variación entre las muestras	Valor F	Valor F crítico	Diferencia significativa menor
Dureza total (mg/L)	740.123	0	0	4.414	88.721
Nitratos (mg/L)	2711.181	1.776E-14	6.551E-18	4.414	169.806
Hierro (mg/L)	3997.620	-7.105E-14	-1.777E-17	4.414	206.194
Manganeso (mg/L)	962.512	3.552E-14	3.691E-17	4.414	101.176
Sulfatos (mg/L)	80.113	0	0	4.414	29.189
Color (unidades)	711.224	0	0	4.414	86.972
Turbiedad (NTU)	491.655	7.10543E-14	1.445E-16	4.414	72.311

Fuente: datos calculados.

### 4.3 Gráficas

Figura 12. Gráfica de acumulado de coliformes totales número más probable/cm<sup>3</sup>



Fuente: tabla XV.

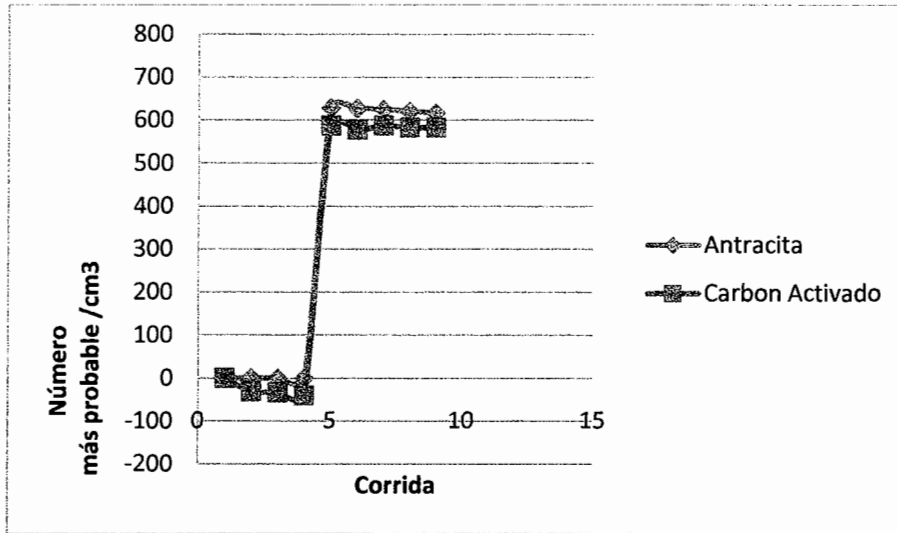
Tabla XV. Datos para gráfica de acumulado de coliformes totales número más probable/cm<sup>3</sup>

Antracita	0	0.5	-1731.9	-1844.8	-1844.8	-1619.8	-1688.3	-1977.2	-2029.5
Carbón activado	0	-455.9	-473.7	-1192.1	-1313.9	-1379.7	-1715.8	-2202.2	-2463

Fuente: resultados.

Nota: para efectos de cálculos se utilizó un valor de 0.5 para los datos en los cuales el número más probable era de <1.

Figura 13. Gráfica de acumulado de coliformes fecales número más probable/cm<sup>3</sup>



Fuente: tabla XVI.

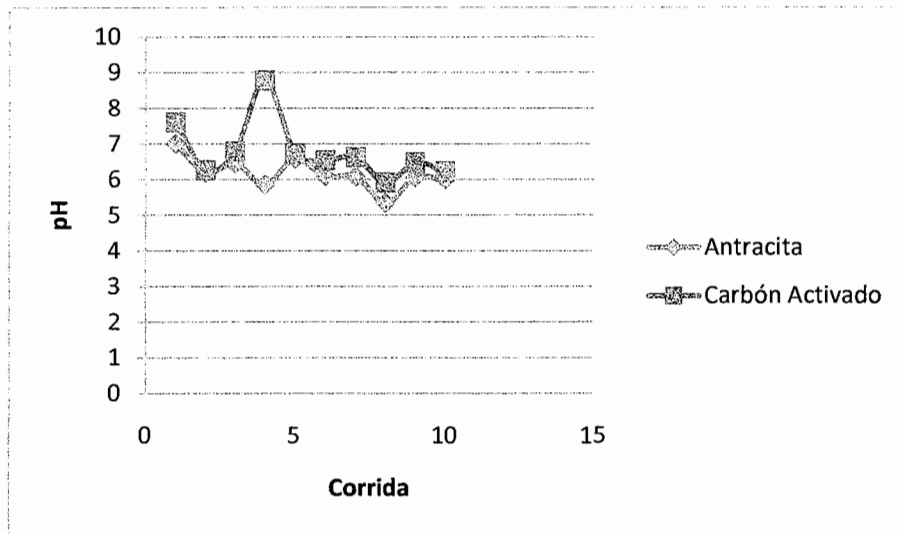
Tabla XVI. Datos para gráfica de acumulado de coliformes fecales número más probable/cm<sup>3</sup>

Antracita	0	0	-0.5	-0.5	628.4	627.4	625	620.3	616.7
Carbón activado	0	-30.4	-32.9	-39.8	587.6	577.5	587.5	582.8	582.8

Fuente: resultados.

Nota: para efectos de cálculos se utilizó un valor de 0.5 para los datos en los cuales el número más probable era de <1.

Figura 14. Gráfica de pH



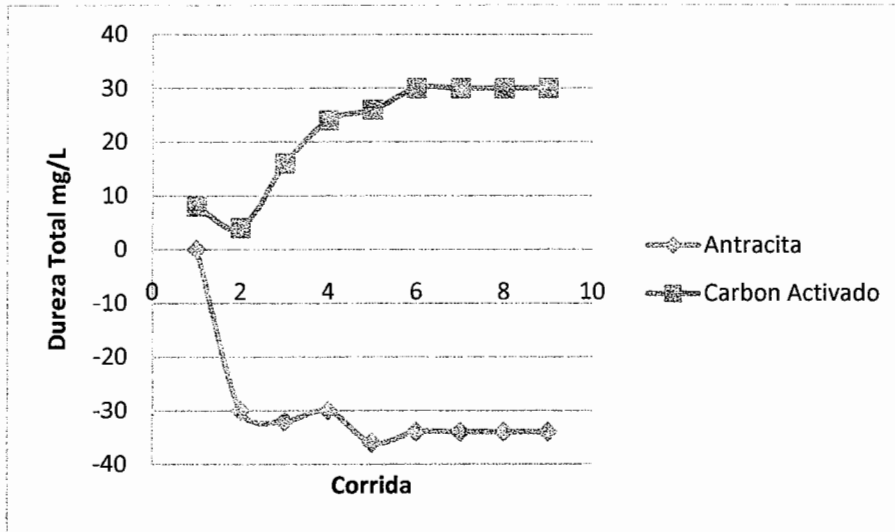
Fuente: tabla XVII.

Tabla XVII. Datos para gráfica de pH

pH	Corrida									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Antracita	7	6.2	6.45	5.86	6.58	6.09	6.08	5.35	6.06	6
Carbón activado	7.6	6.26	6.79	8.78	6.73	6.54	6.62	5.91	6.47	6.22

Fuente: resultados.

Figura 15. Acumulado de dureza total mg/L



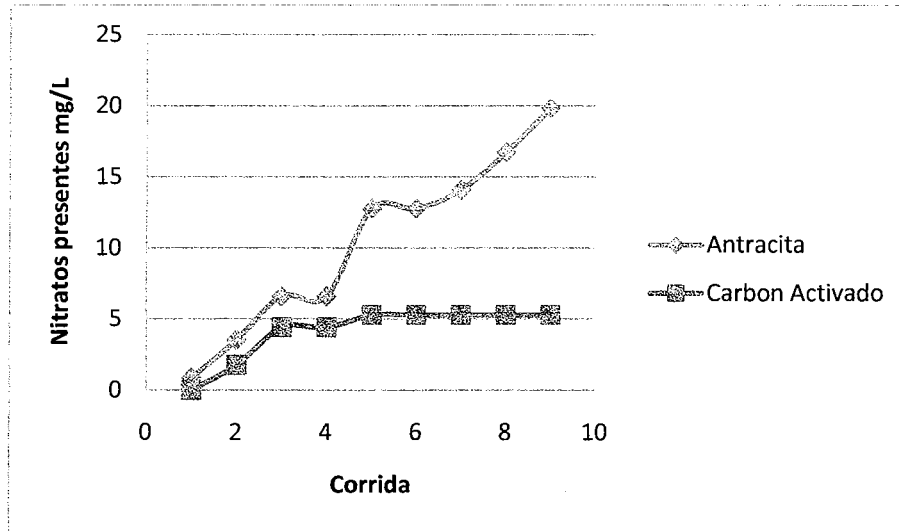
Fuente: tabla XVIII.

Tabla XVIII. Datos para acumulado de dureza total mg/L

Antracita	0	-30	-32	-30	-36	-34	-34	-34	-34
Carbon activado	8	4	16	24	26	30	30	30	30

Fuente: resultados.

Figura 16. Gráfica de acumulado de nitratos mg/L



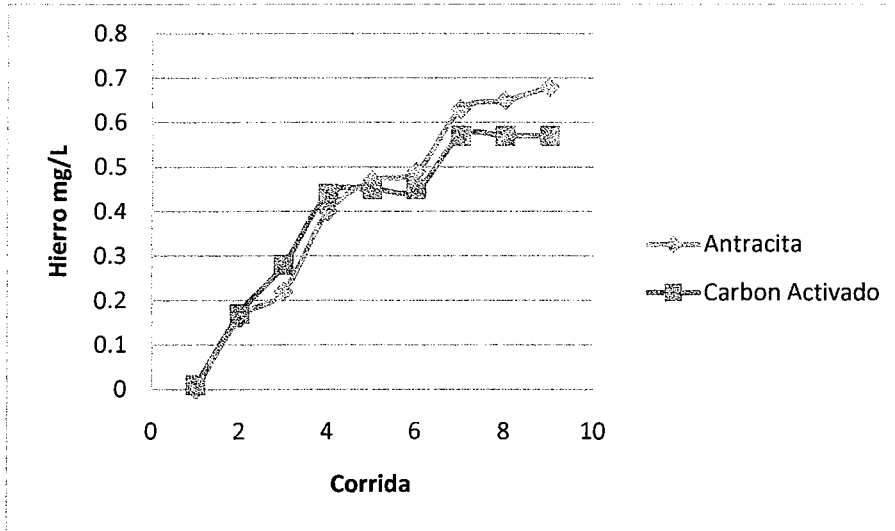
Fuente: tabla XIX.

Tabla XIX. Datos para gráfica de acumulado de nitratos mg/L

Antracita	0.88	3.52	6.6	6.6	12.76	12.76	14.08	16.72	19.8
Carbón activado	0	1.76	4.4	4.4	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28

Fuente: resultados.

Figura 17. Gráfica de acumulado de hierro mg/L



Fuente: tabla XX.

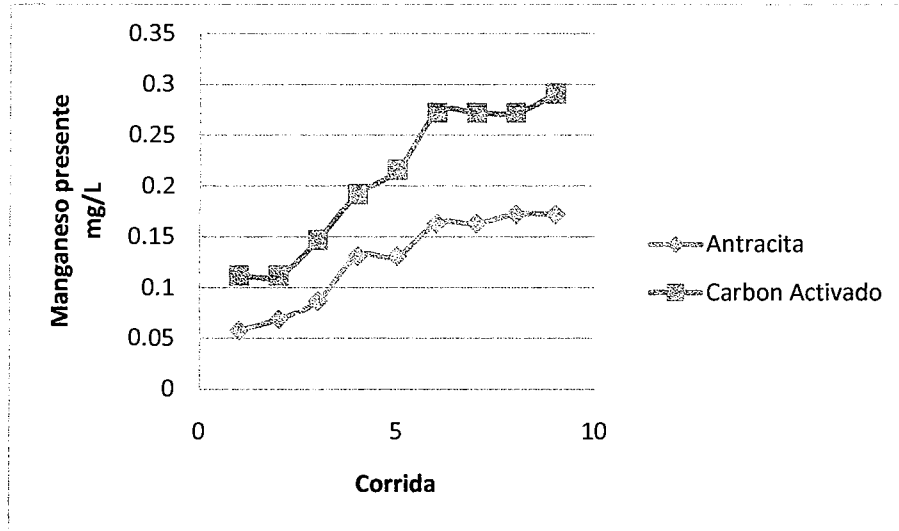
Tabla XX. Datos para gráfica de acumulado de hierro mg/L

Antracita	0	0.16	0.22	0.4	0.47	0.49	0.63	0.65	0.68
Carbón activado	0.01	0.17	0.28	0.44	0.45	0.45	0.57	0.57	0.57

Fuente: resultados.



Figura 18. Acumulado de manganeso mg/L



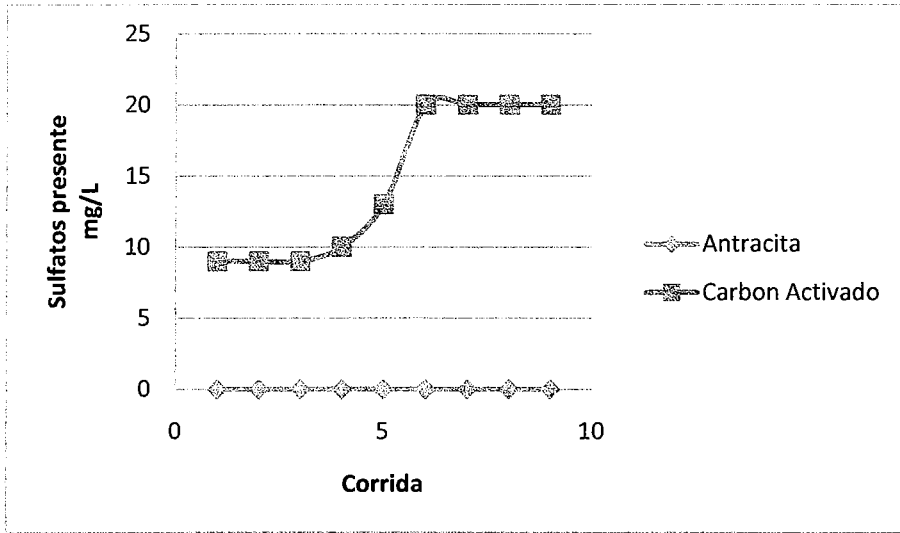
Fuente: tabla XXI.

Tabla XXI. Datos para gráfica de acumulado de manganeso mg/L

Antracita	0.058	0.069	0.087	0.131	0.131	0.163	0.163	0.172	0.172
Carbón activado	0.112	0.112	0.147	0.192	0.216	0.272	0.272	0.272	0.291

Fuente: resultados.

Figura 19. Acumulado de Sulfatos mg/L



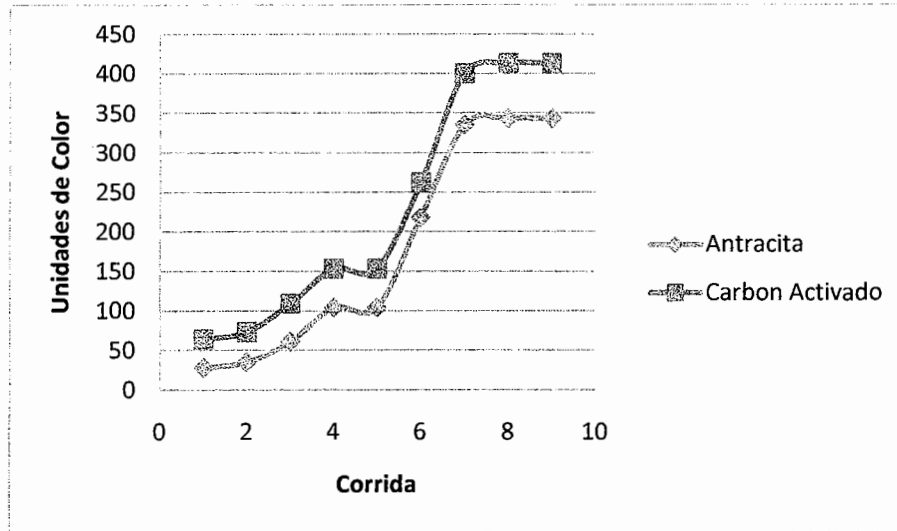
Fuente: tabla XXII.

Tabla XXII. Datos para gráfica de acumulado de sulfatos mg/L

Antracita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón activado	9	9	9	10	13	20	20	20	20

Fuente: resultados.

Figura 20. **Gráfica de acumulado de unidades de color**



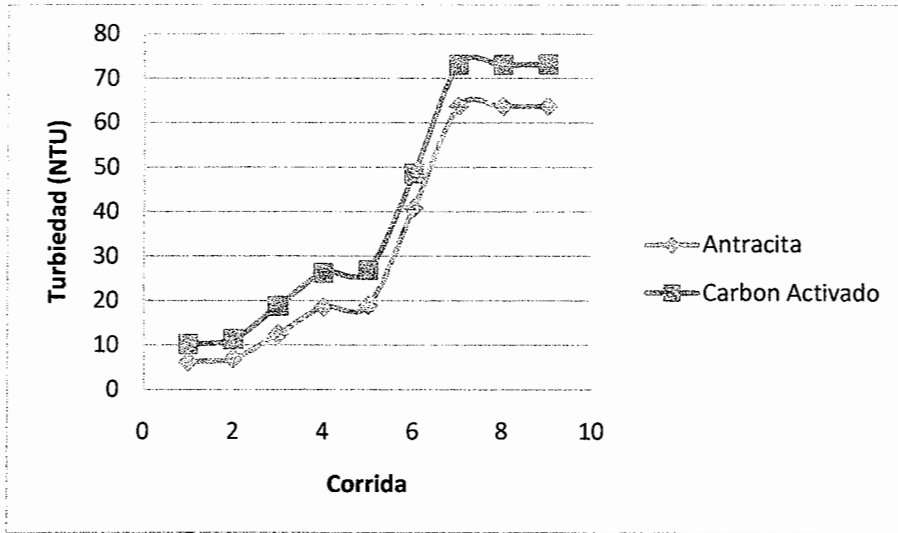
Fuente: tabla XXIII.

Tabla XXIII. **Datos para gráfica de acumulado de unidades de color**

Antracita	28	35	61	104	104	218	335	343	343
Carbón activado	64	73	109	153	153	262	400	413	413

Fuente: resultados.

Figura 21. Gráfica de acumulado de turbiedad (NTU)



Fuente: tabla XXIV.

Tabla XXIV. Datos para gráfica de acumulado de turbiedad (NTU)

Antracita	6.169	6.969	12.389	18.539	18.889	40.829	63.719	63.719	63.719
Carbón activado	10.166	11.276	18.756	26.226	26.836	48.606	73.036	73.036	73.162

Fuente: resultados.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la comparación de eficiencia de remoción de componentes químicos, bacteriológicos y sustancias suspendidas en el agua entre el carbón activado y la antracita se utilizaron dos filtros pilotos, que se construyeron a un 3% de la escala real del filtro utilizado en la planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy".

En los filtros se utilizaron las capas de medios múltiples en el orden en que se encuentran en la planta, en uno utilizando antracita y en el otro se sustituyó por carbón activado, utilizando el agua proveniente de los sedimentadores para realizar la prueba de filtrado. Del agua filtrada se tomaron muestras para realizar las pruebas fisicoquímicas y las pruebas bacteriológicas, para las cuales se utilizó el método "collilert" para una mayor precisión en los datos.

A los datos obtenidos se les realizó un análisis estadístico utilizando un análisis de varianza para determinar la diferencia mínima significativa y determinar si la variación de los datos obtenidos con los diferentes lechos filtrantes es significativa como para sugerir un cambio en el proceso utilizado en la planta.

Al realizar el análisis bacteriológico se obtuvo mejor calidad de agua utilizando el lecho filtrante de antracita para los coliformes fecales esto se puede observar en las tablas No. 5 a la No. 14, mientras que para los coliformes totales presentó mayor remoción el carbón activado. De la gráfica uno no presentan acumulado pero se puede observar que ambos filtros aumentan la

cantidad de coliformes debido a la contaminación de los filtros por el tiempo que se dejó entre cada corrida. De la gráfica dos se puede observar que hay un acumulado para el carbón activado en 582.8 como número más probable por centímetro cúbico.

Al observar los datos obtenidos en las tablas números dos a la once se puede determinar que el carbón activado es la mejor opción para la obtención de agua con un pH más neutro que la antracita. En la gráfica tres se puede observar que los valores de pH para el filtro con carbón activado son más neutros mientras que los de la antracita presentan un comportamiento ligeramente ácido.

En base a la tabla número catorce la diferencia significativa menor es de 169.81 y dado que la varianza dentro de las muestras es de 2711.18 para la prueba de nitratos se puede determinar que la diferencia entre los datos obtenidos sí es significativa. De la tabla número doce se puede observar que la media del porcentaje de remoción utilizando antracita es mayor que la de carbón activado, por lo que el lecho filtrante de antracita es mejor para la remoción de nitratos. De la gráfica cinco se puede observar que el carbón activado presenta un acumulado en 5.28mg /L, mientras que la antracita no presenta acumulado.

En base a la tabla número catorce la diferencia significativa menor es de 206.19 y la varianza dentro de las muestras es de 3997.62 para la prueba de hierro se puede determinar que la diferencia entre los datos obtenidos sí es significativa. De los datos de la tabla número doce se obtuvo mayor valor en la media del porcentaje de remoción utilizando la antracita que la de carbón activado, por lo que el lecho filtrante de antracita es mejor para la remoción de

hierro. De la gráfica número seis se observa que el carbón activado presentó un acumulado en 0.57mg/L, mientras que la antracita no presento acumulado.

En base a la tabla número catorce la diferencia significativa menor es de 73.14 y la varianza dentro de las muestras es de 503.02 para la prueba de dureza total del agua por lo que sí existe una diferencia significativa en los datos. Y observando los datos de la tabla número doce se tienen una media del porcentaje de remoción de dureza total mayor para el filtro con el carbón activado. De la gráfica cuatro se puede observar que el carbón activado presenta acumulado en 30 mg/L, mientras que la antracita aumenta la cantidad de dureza en el agua.

Se puede observar en la tabla número catorce que la diferencia significativa menor es de 101.18 y dado que la varianza dentro de las muestras es de 962.51 para la prueba de manganeso, la diferencia en los datos de las pruebas sí es significativa. Y observando los datos de la tabla número doce se tiene una media del porcentaje de remoción de manganeso mayor para el filtro con carbón activado. De la gráfica siete se puede observar que la antracita presentó acumulado en 0.172mg/L, mientras que el carbón activado no.

También en la tabla número catorce se puede observar que la diferencia significativa menor es de 29.19 y dado que la varianza dentro de las muestras es de 80.11 para la prueba de sulfatos, la diferencia de los datos sí es significativa. En los datos de la tabla número doce se observa un valor mayor para la media del porcentaje de remoción de sulfatos para el filtro con carbón activado. De la gráfica número ocho se puede observar que el carbón activado presentó acumulado en 20 mg/L mientras que la antracita no presento remoción.

Al observar en la tabla número catorce la diferencia significativa menor es de 86.97 y la varianza dentro de las muestras es de 711.22 para la prueba de color, lo que indica que sí existe una diferencia significativa. En los datos de la tabla número doce se observa un valor mayor para la media del porcentaje de remoción de color para el filtro con carbón activado. De la gráfica nueve se puede observar que la antracita se acumula en 343 mg/L, mientras que el carbón activado en 413 mg/L.

En la tabla número catorce se observa que la diferencia significativa menor es de 72.31 y la varianza dentro de las muestras es de 491.65 para la prueba de turbiedad, lo cual indica que sí existe una diferencia significativa en los datos obtenidos. En los datos de la tabla número doce se observa un valor mayor para la media del porcentaje de remoción de turbiedad para el filtro con carbón activado. De la gráfica diez se puede observar que la antracita se acumulo en 63.719 mg/L, mientras que el carbón activado inicia a acumularse en 73.036 mg/L.

Al realizar la prueba de olor en el agua y según los datos obtenidos en las tablas No. 5 a la No. 14 se puede determinar que no hay diferencia entre el carbón activado y la antracita.



## CONCLUSIONES

1. Según los resultados obtenidos, la hipótesis nula no es válida, ya que estadísticamente se comprobó que si hay diferencia significativa en los datos, y la hipótesis alterna es válida, aunque ambos lechos filtrantes cumplen con la norma COGUANOR NGO 29001.
2. El lecho filtrante de antracita presentó mejores resultados para la remoción de coliformes fecales, al igual que para la obtención de agua con menor cantidad de nitratos y hierro.
3. El lecho filtrante de carbón activado presentó mejores resultados para obtener agua con menor cantidad de coliformes totales, dureza total, manganeso, sulfatos, color, turbiedad y una neutralización de pH.
4. Para la remoción de olor no hay diferencia en la utilización de cualquiera de los lechos filtrantes.



## RECOMENDACIONES

1. En base a la conclusión número dos la antracita se recomienda utilizar lecho filtrante de antracita para obtener agua con menor cantidad de nitratos, hierro, coliformes fecales.
2. En base a la conclusión número tres se recomienda utilizar lecho filtrante de carbón activado para la obtención de agua con menor cantidad de coliformes totales, dureza total, manganeso, sulfatos, color, turbiedad y un pH más neutro.
3. Se recomienda para trabajos futuros a realizarse de este tipo considerar el análisis de hierro como férrico y ferroso.
4. Se recomienda para trabajos futuros a realizarse un estudio para establecer la combinación en porcentajes de ambos lechos filtrantes para determinar cuál es el óptimo debido a que el carbón activado presentó mejores resultados en algunos parámetros y la antracita para otros, debido a la diferencia en la forma de adsorber los diferentes componentes disueltos en el agua.
5. Repetir el experimento para coliformes fecales y totales, debido a la forma en que se produjo el experimento en lugar de disminuir presentó un aumento.



## BIBLIOGRAFÍA

1. A.P.H.A.-A.W.W.A.-W.E.F. *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*. 19th. Edition. U.S.A.: American Public Health Association. 2005. Página 385
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y Práctica de la purificación del agua*. México. Mc. Graw Hill. Páginas 363 – 378.
3. CEPIS. *Filtración Rápida* (2009, Octubre). Disponible en:  
<http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/020867/020867-17.pdf>
4. CONSIDINE, D. M. *Tecnología del carbón*. 1986. Sección 1 Página 15.
5. HUNT, V. D. *Diccionario de Energía*. Publicaciones Marcombo, S. A. México. 1984. Sección 7 Página 41.
6. *Manual de Operación, Planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy"*.
7. MILLER, J. C. *Estadística para química analítica*. Segunda edición. Páginas 52 – 54, 200.
8. Norma COGUANOR NGO 29001, Especificaciones de agua potable. Sección No. 4.

9. RIVERA JUÁREZ, Alfredo Jehovany. *Evaluación del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy"*. Guatemala [Guatemala] Noviembre 1996. Páginas 12, 18 – 25.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

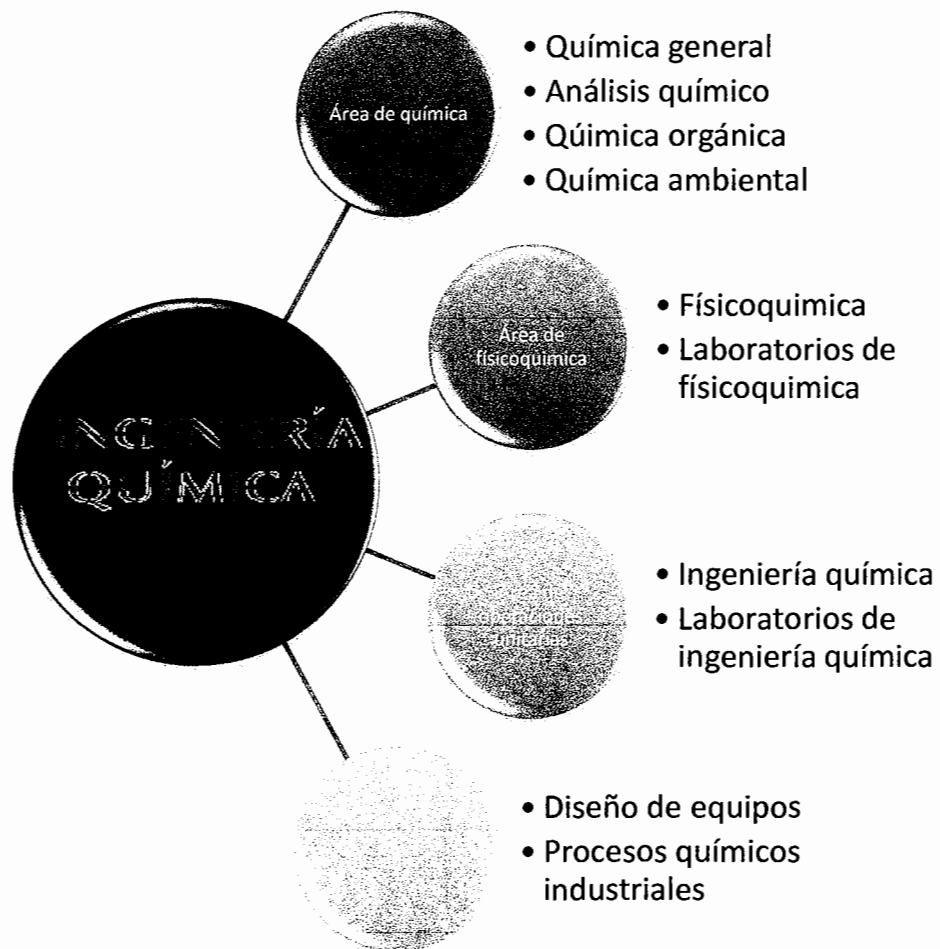
1. A.P.H.A.-A.W.W.A.-W.E.F. *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*. 19th. Edition. U.S.A.: American Public Health Association. 2005. Página 385
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y Práctica de la purificación del agua*. México. Mc. Graw Hill. Páginas 363 – 378.
3. CEPIS. *Filtración Rápida* (2009, Octubre). Disponible en:  
<http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/020867/020867-17.pdf>





## ANEXOS

### ANEXO 1: Tabla de requisitos académicos

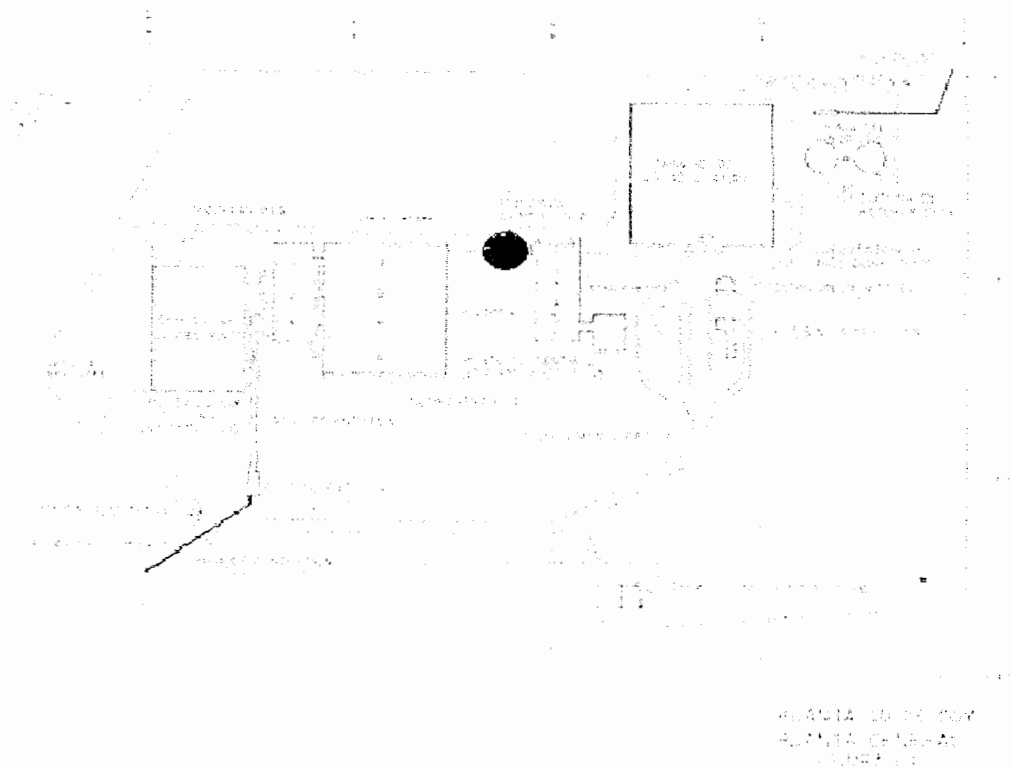


Fuente: elaboración propia.



### ANEXO 3: Lugar de muestreo

Figura 22. Lugar de muestreo



Fuente: **Manual de operación, planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy".**

- Toma de muestra del efluente de sedimentadores en la planta de agua potable "Lo de Coy".

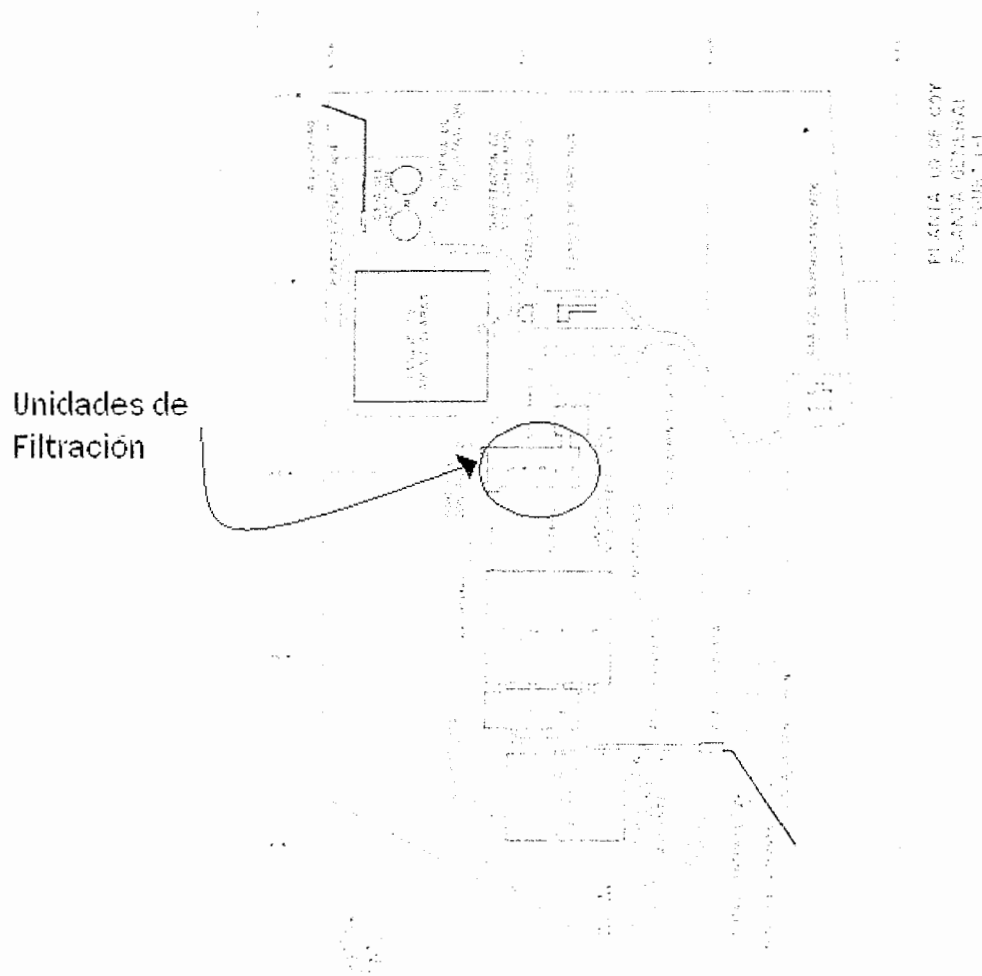
Figura 23. **Salida de sedimentadores**



Fuente: fotografía propia.

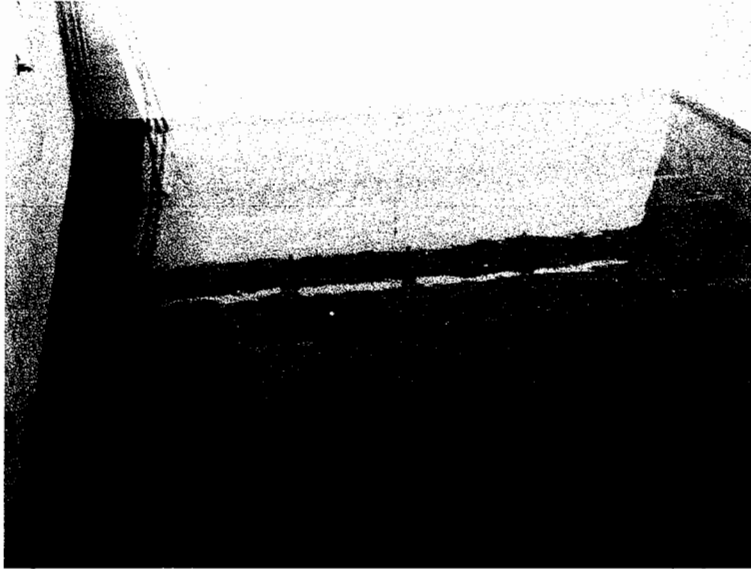
**ANEXO 4: Vista de planta general de planta de tratamiento de agua potable  
“Lo de Coy”**

**Figura 24. Planta general**



Fuente: **Manual de operación, planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”.**

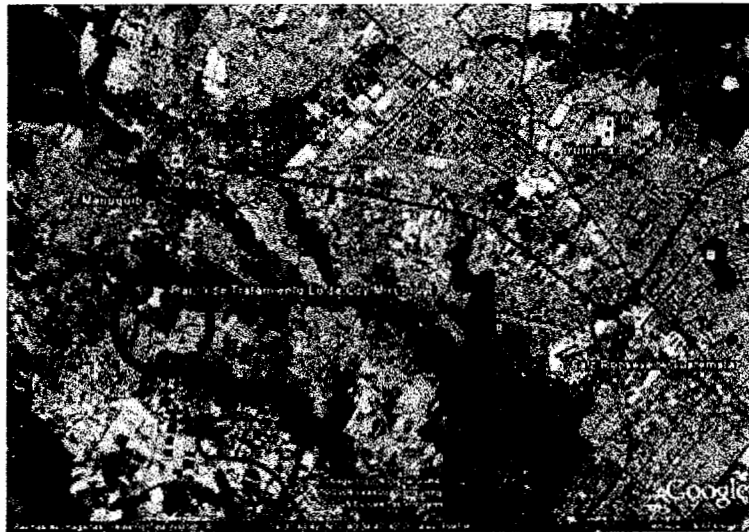
**Figura 25. Unidad de filtro de la planta**



Fuente: fotografía propia.

**ANEXO 5: Vista aérea de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”**

**Figura 26. Vista aérea de la planta**



Fuente: Google earth

**Figura 27. Entrada a la planta**

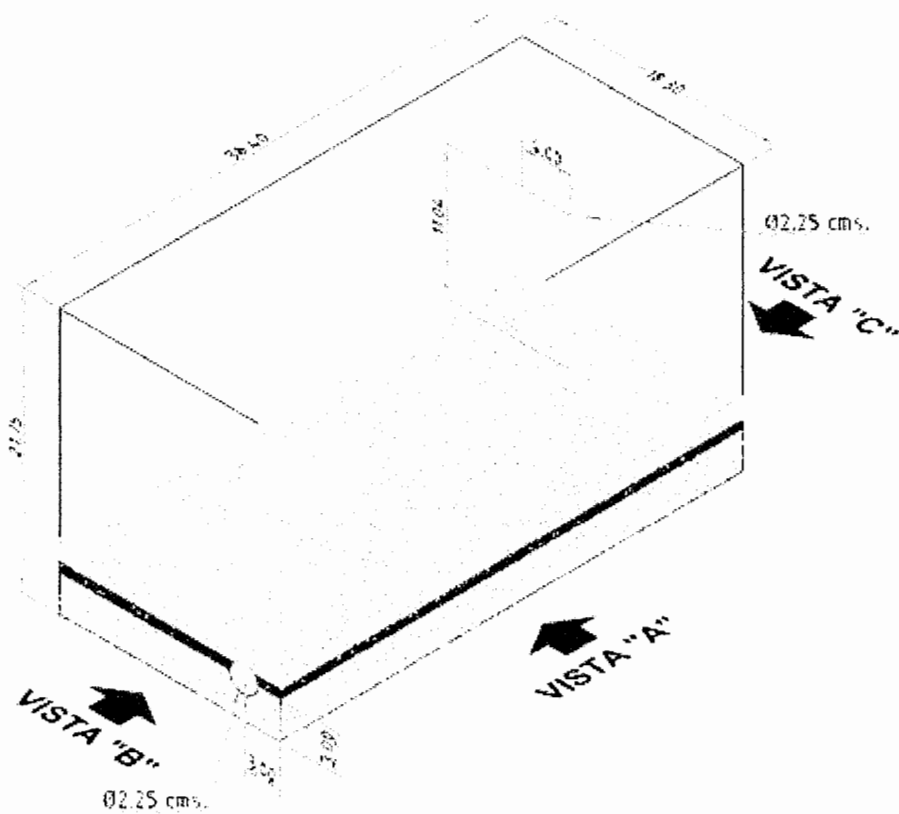


Fuente: fotografía propia.



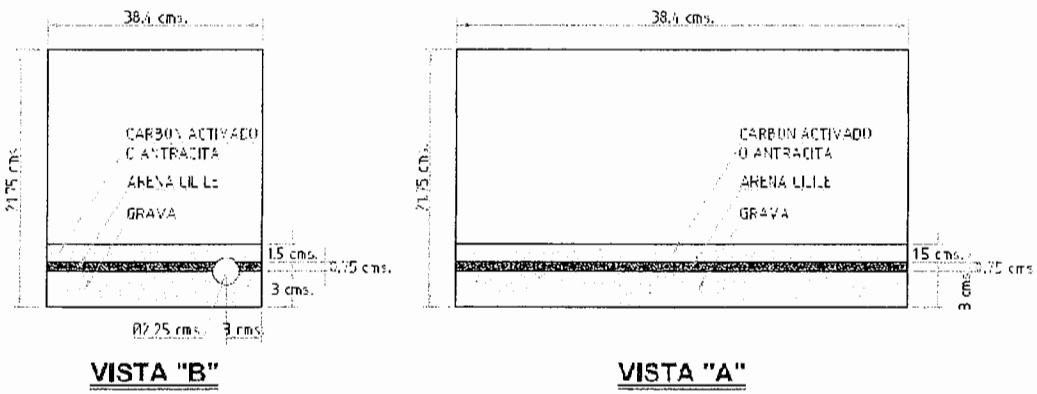
## ANEXO 6: Filtro piloto

Figura 28. Diseño de filtro piloto  
Vista isométrica

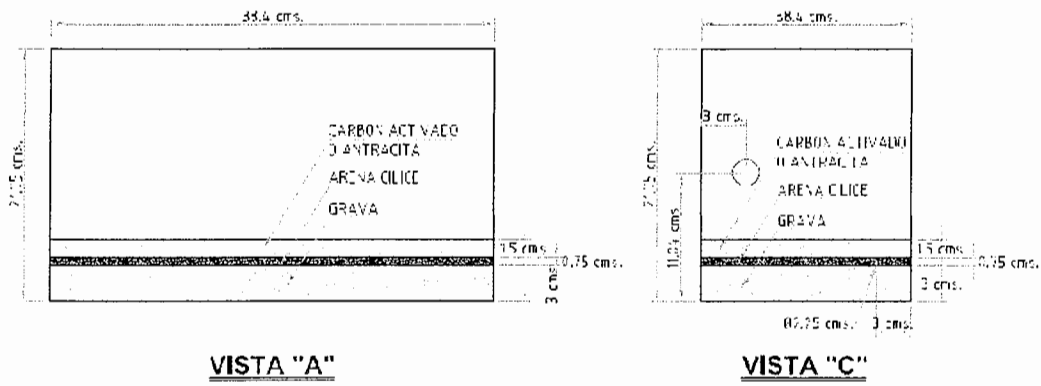


Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Diseño de filtro piloto**  
**Vistas laterales**

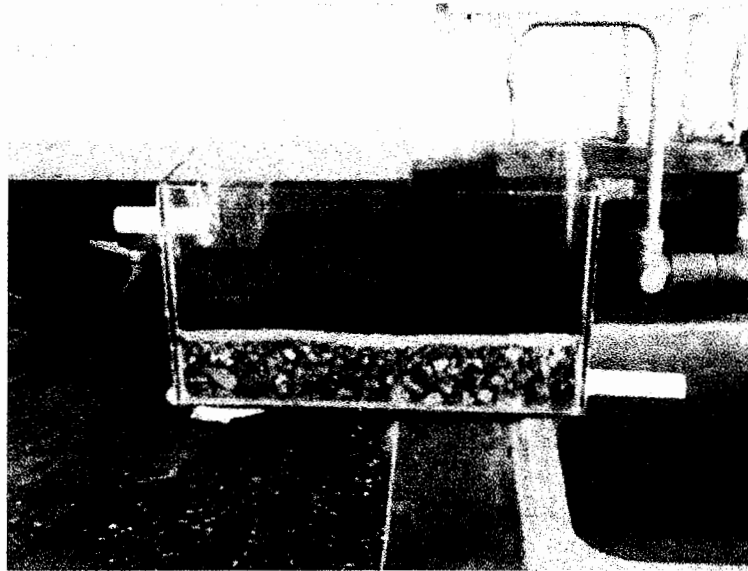


Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Filtro piloto



Fuente: fotografía propia.

Figura 31. Capas del filtro piloto



Fuente: fotografía propia.

## ANEXO 7: Tabla para factor f

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43
3	14.13	9.552	9.277	9.117	9.011	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786	8.765	8.750
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.932	5.854
5	6.508	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.678	4.619
6	5.987	5.143	4.751	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.000	3.938
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.575	3.511
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.284	3.218
9	5.137	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.073	3.006
10	4.965	4.105	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.913	2.845
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.788	2.719
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.755	2.687	2.617
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.672	2.604	2.533
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.534	2.463
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.475	2.403
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.425	2.352
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.381	2.308
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.342	2.269
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.308	2.234
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.278	2.204

$n$  = número de grados de libertad del numerador y  $cs$  = número de grados de libertad del denominador.

Fuente: Miller, J. C., **Estadística para química analítica**, página 200.

## ANEXO 8: Hoja técnica carbón activado

High Activity Carbon (HAC) may be used for a variety of water treatment applications requiring the reduction of chlorine, tastes, and odors.

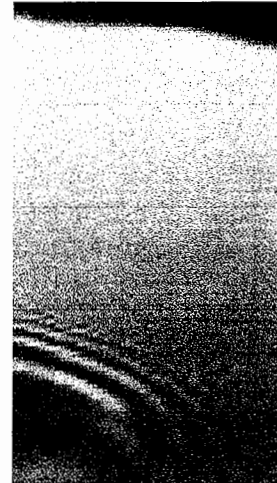
# Activated Carbon

Clark granular activated carbon is designed for reduction of taste, odors and dissolved organic chemicals from municipal and industrial water supplies. Manufactured in the United States from select grades of bituminous coal to produce a high density, durable granular product capable of withstanding the abrasion and dynamics associated with repeated hydraulic transport, backwashing and mechanical handling. Activation is carefully controlled to produce exceptionally high internal surface area with optimum pore size for the adsorption of a broad range of high and low molecular weight organic contaminants.

One of the most common applications for Clark High Activity Carbon (HAC) is the reduction of the undesirable taste and odors present in many chlorinated water supplies. HAC has been successful for many years in the reduction of free chlorine from water supplies. The end product is clean, fresh water with no objectionable taste or odor characteristics.

To obtain maximum efficiency of the activated carbon in the adsorption process, it is desirable to have the greatest possible surface area in the smallest practical volume. This is necessary because the rate of adsorption is proportional to the amount of surface area of the adsorbing medium media. HAC has a surface area of 0.80 square meters per gram. This results in high efficiency and greater system economy. Clark has for many years provided activated carbon to the OEM and replacement market as a pre-treatment for other water purification systems as well as for use in individual treatment equipment for the removal of specific impurities.

HAC requires periodic backwashing to eliminate accumulated suspended matter and to re-grade the filter bed. HAC has an extremely high capacity but must be replaced when the filter bed loses the capacity for reduction of taste and odor. HAC may be used in either domestic or industrial applications using gravity flow or pressurized filter vessels.



### ADVANTAGES

- HAC is an outstanding material for applications requiring taste, odor and dissolved organic chemical removal from water with suspended matter present. This product can be used for filtering waters having a wide range of pH levels.
- Large surface area results in an exceptionally high capacity and efficiency.
- Balanced pore structure gives a more efficient adsorption range.
- HAC is very durable so losses due to attrition are kept to a minimum.
- HAC has a very high carbon-low ash content.
- Service rates of 5 gpm/sq. ft. are practical for ordinary taste, odor and chlorine loads.
- HAC will impart a high "polish" to the filtered water.

### PHYSICAL PROPERTIES

- Color: Black
- Mesh Size: 12 x 40
- Bulk Density: 31 lbs./cu. ft.
- Specific Gravity: 1.4-1.5 gmv/cc
- Effective Size: 0.55-0.75 mm, 0.65 typical
- Water Soluble Ash: less than 0.3%
- Iodine #: 880 min., 900 typical
- Abrasion #: 7.5 min., 81 typical
- Moisture as packed: 2% max., 0.7% typical
- Meets American Water Works Association standard B604-96

### CONDITIONS FOR OPERATION

- Water to be filtered should preferably be free of oil and suspended matter.
- The water to be filtered should be relatively free of iron and turbidity for maximum service life.
- Water pH range: wide range
- Bed depth: 25-30 in.
- Freeboard: 50% of bed depth (min.)
- Service flow rate: 5 gpm/sq. ft.
- Backwash flow rate: 10-12 gpm/sq. ft.
- Backwash bed expansion: 30-40% of bed depth
- Upon installation, backwash to remove carbon fines before placing unit into service.

Fuente: proveedor de carbón activado



## ANEXO 9: Límites de los parámetros de la norma COGUANOR NGO 29001

Tabla XXV. Límites establecidos por la norma COGUANOR  
NGO 29001

Parámetro	Límite máximo aceptable (LMA)	Límite máximo permitido (LMP)
pH	7.0 - 7.5	6.5 - 8.5
Temperatura (°C)	15 - 25	34
Dureza total (mg/L)	100.000	500.000
Nitratos (mg/L)	---	10.000
Hierro (mg/L)	0.100	1.000
Manganeso (mg/L)	0.050	0.500
Sulfatos (mg/L)	100.000	250.000
Olor	No rechazable	No rechazable
Color (unidades)	5.000	35.000
Turbiedad (NTU)	5.000	15.000

Fuente: Norma COGUANOR NGO 29001