

Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña
UNPHU

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Química

“Estudio de Factibilidad de un Sistema de Tratamiento Primario para las Aguas de
Irrigación del Recinto de Santo Domingo de la Universidad Nacional Pedro
Henríquez Ureña: Diseño de una Columna de Adsorción de Carbono”



Trabajo de grado presentado por:

Laura Ximena Rivera Páramo

Josué Peña Guzmán

Para la obtención del grado de

Ingeniero Químico

Santo Domingo, D. N

2015

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Yamilet Páramo, por su amor incondicional, su apoyo hacia mis metas y su completa dedicación a mi formación moral y académica. Infinitas gracias.

A mi abuela, Amanda López, mi primera fuente de aprendizaje, que ha estado ahí para mí desde el día uno, completamente enfocada en mi educación y en mi crecimiento personal y profesional.

A mi compañero de vida, Roberto Sánchez, estuvo durante gran parte de la carrera apoyándome y aportando ideas durante todo este proceso.

A mi compañero Josué Guzmán, compañero no solo de tesis sino también de carrera y de largas noches de estudio.

Al resto del equipo, Ramón S, Ramón P, Emil, Rosa, Winter, sin ellos no hubiera sido lo mismo todo este proceso, ni la mitad de divertido.

A mis profesores, que tanto se esfuerzan cada día porque seamos buenos profesionales: Josefina, Doña Mayra, Nurys, Jeanne y todos aquellos con los que tuve el honor de tomar clases a lo largo de la carrera.

A nuestra directora, Doris Peña, por todas sus lecciones académicas y de vida y que trabaja tan duro para que nuestro departamento sea el mejor.

A nuestro asesor, Carlos Sanlley, que a pesar de las dificultades estuvo siempre a nuestro lado y nos ayudó en todo lo que pudo.

Al Laboratorio de la Dirección General de Aduanas, por brindarnos su apoyo, colaboración e instalaciones y permitir que el desarrollo de este trabajo concluyera exitosamente, muchas gracias.

Laura Ximena Rivera Páramo.

A:

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto, dándome la salud, fuerza e inteligencia necesaria para poder concluir exitosamente esta meta.

A mi madre, Dorca Guzmán Nuez por ese amor incondicional, apoyo y entrega hacia mi formación como ser humano. Y su completa dedicación a mi crecimiento tanto académico como personal.

A mi figura paterna, Miguel Hazim R. por ser mi inspiración a elegir una carrera tan demandante y mostrar siempre completa dedicación hacia mis estudios y formación como ser humano.

A mi compañera Laura Rivera, por el apoyo mutuo en todo el desarrollo de la carrera.

A mis profesores, que con tanta entrega y dedicación nos transmitieron sus conocimientos para llegar a ser los mejores profesionales que podamos ser: Josefina, Mayra Jeanne, Nurys y todos aquellos con los que tuve el privilegio de tomar clases, muchas gracias.

A nuestra Directora, Doris Peña por su arduo trabajo en nuestra formación como profesionales y su entrega e insistencia a mantener el mejor comportamiento ético-profesional en nosotros.

A mis compañeros de carrera, Ramón S., Ramón P., Emil, Rosa, Winter por todo su apoyo y especialmente a Ramón Sánchez y Ramón Pérez, por su colaboración y apoyo al desarrollo satisfactorio de este proyecto.

A nuestro asesor, Carlos Sanlley por su colaboración en todo el desarrollo de este proyecto, sus aportes y voluntad de ayuda, muchas gracias.

Josué Peña Guzmán

DEDICATORIA

DEDICATORIA

A mi madre, Yamilet Páramo, que siempre se ha esforzado para que yo tenga la mejor educación y me ha impulsado para dar lo mejor de mí en todo lo que hago.

A mi abuela, Amanda López, porque siempre se ha preocupado por el bienestar de sus hijas y nos ha brindado un amor único e incondicional.

Laura Ximena Rivera Páramo.

DEDICATORIA

A mi madre, Dorca Guzmán por su apoyo en todo momento, sus consejos y por todo su esfuerzo en brindarme la mejor educación posible.

A mi padre, Miguel Hazim por siempre instarme a dar lo mejor de mí en toda situación.

A mi abuela, Altagracia Nuez de Guzmán por todo su amor y preocupación hacia mi bienestar y por haberme brindado tanto apoyo en el desarrollo de metas.

A mis tías, Belkis de Hazim y Angélica Guzmán por su apoyo constante en mi desarrollo y conclusión como profesional.

A mi hermana Sarah Guzmán, por todo su apoyo en todo el transcurso del proyecto.

A mi mejor amiga Ana Patricia Heredia, por estar presente durante todo este proceso.

A mis tíos Donald Guzmán y Yazmin de Guzmán, por todo su apoyo brindado hacia el cumplimiento de mis metas.

Al Laboratorio de la Dirección General de Aduanas, por su colaboración y voluntad de ayuda en la conclusión satisfactoria del proyecto.

Josué Peña Guzmán

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	7
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	14
Objetivo General	15
Objetivos Específicos	15
JUSTIFICACIÓN	16
PRIMERA PARTE MARCO TEÓRICO	17
CAPÍTULO I AGUAS Y ESCORRENTÍAS	18
I.1 Antecedentes Históricos	18
I.2 Conceptos teóricos	19
I.2.1 Aguas Pluviales y Aguas Negras	19
I.2.2 Escorrentías	20
I.2.3 Tipos de escorrentía	20
I.2.4 Coeficiente de Escorrentía	21
I.2.5 Tormenta de Diseño	23
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS DE LA ADSORCIÓN	24
II.1 Adsorción	24
II.1.1 Factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el agua.	25
II.1.2 Equilibrio de adsorción	25
II.1.3 Propiedades de la Adsorción	26
II.2 Adsorción con carbón activado	26
II.2.1 Características Físicas del Carbón Activado	28
II.3 Cinética de adsorción	29
II.3.1 Mecanismos de Transporte.	29

II.4 Funcionamiento del proceso	30
II.4.1 Etapas en el proceso de adsorción	31
III.1 Reactores de flujo descendente de lecho fijo.	32
III.1.1 Reactores de flujo descendente de lecho fijo en serie	33
III.1.2 Reactores de flujo descendente de lecho fijo en paralelo	33
III.1.3 Reactores de flujo ascendente de lecho fijo en serie	33
III.2 Reactores de flujo ascendente de lecho expandido	34
III.3 Reactores de lecho móvil	34
III.4 Adsorción de lecho fluidizado	35
CAPÍTULO IV ISOTERMA	36
IV.1 Modelos de isotermas para adsorción por carbón activado.	36
IV.1.1 Modelo de Langmuir	37
IV.1.2 Modelo de Freundlich	37
IV.2 Factores que afectan el equilibrio de adsorción	39
CAPITULO V DISEÑO DE UNA TORRE DE CARBÓN ACTIVADO	40
V.1 Zonas de la columna	40
V.2 Tamaño de partículas utilizados en adsorción de lecho fijo.	41
SEGUNDA PARTE ENFOQUES PRÁCTICOS	42
CAPITULO VI EQUIPOS Y MATERIALES	43
VI.1 Equipos	43
VI.1.1 Espectrofotómetro DR3900	43
VI.1.2 Reactor DRB200	43
VI.1.3 Espectrómetro de masa ICP-MS	43
VI.1.4 Bomba de riego sumergible Aquatop NP-80 de 80 GPH	44
VI.1.5 Centrifuga	44
VI.2 Materiales y Reactivos	44
CAPITULO VII DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO	46
VII.1 Recolección del agua pluvial para muestreo	46

VII.2 Análisis Cualitativo de la Muestras	47
VII.3 Análisis de pruebas Batch.	56
VII.4 Experimento de columnas	56
VII.5 Determinación de DQO	57
VII.6 Cálculos para la determinación de capacidad de la cisterna	59
VII.7 Diseño de columna de adsorción.	60
VII.8 Calculo de factibilidad de proyecto a gran escala.	61
RESULTADOS	62
CAPITULO VIII RESULTADOS	63
VIII.1 Marcha Analítica	63
VIII.2 Cálculos de pruebas Batch	64
VIII.3 Experimentos de columnas para determinar DQO	66
VIII.4 Cálculos de capacidad de cisterna	69
VIII.5 Caudal necesario para vaciar la cisterna en 24 horas	73
VIII.6 Cálculos para diseño de Columna	73
VIII.7 Análisis de Costos	76
TERCERA PARTE	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
CAPITULO IX CONCLUSIONES	79
IX.1 Parte Experimental	79
IX.2 Diseño de la columna	79
IX.3 Recomendaciones	81
CUARTA PARTE REFERENCIAS	82
Referencias Bibliográficas	83
Libros especializados	83

Artículos académicos en línea _____	83
Congresos _____	84
Periódico en línea _____	84
Otras fuentes de internet _____	84
QUINTA PARTE ANEXOS _____	86
ANEXO I TABLAS _____	87
ANEXO II FIGURAS _____	94
ANEXOS III DIAGRAMAS _____	100
ANEXOS IV Mapas _____	106
ANEXOS V Análisis _____	110

INTRODUCCIÓN

Introducción

Desde tiempos remotos, el agua ha sido uno de los recursos más valiosos en la tierra, es imprescindible para la vida y la necesitan tanto los animales y las plantas silvestres, como la agricultura, la ganadería, la industria e incluso para la producción de energía.

Del 100% de agua en el planeta, el 97% es salada y se encuentra en los mares y océanos, el 0.5% se encuentra como humedad superficial y vapor de agua atmosférica, y tan solo el 2.5% es agua dulce, de esta el 2.01% está en los polos congelada, el 0.47% está en la humedad del suelo y solo el 0.02% lo encontramos en lagos, ríos y arroyos, esto solamente es utilizado para consumo de los seres vivos, de aquí el interés por controlar su mal empleo en la sociedad.

En la actualidad, después de un gran derroche de este valioso recurso, se ha empezado a generar una mayor consciencia de su importancia y se han comenzado a buscar maneras de conservarlo.

Una buena forma de conservar el agua es el aprovechamiento eficiente del agua de lluvia, tradición que ha sido aplicada desde hace 5000 años. A lo largo de distintas épocas, culturas en todo el mundo desarrollaron métodos para recoger y utilizar el recurso pluvial, sin embargo con el progreso de los sistemas de distribución entubada, estas prácticas se fueron abandonando.

La UNPHU cuenta con un recinto de 250000 m², 10 edificios, 7 zonas de parqueo y se encuentra rodeada por tres amplias zonas verdes que requieren un riego adecuado para mantener la apariencia fresca y natural que tanto caracteriza la universidad. Por esta razón, y siguiendo la filosofía de Pienso En Verde, este proyecto pretende evaluar el tratamiento de las aguas pluviales, que caen dentro del recinto, para su aprovechamiento en la irrigación de las zonas verdes de la universidad, mediante la creación de una columna de carbón activado granulado.

El agua, que es alimentada a la columna, corre a través de ella y mediante la difusión de los compuestos al carbón activado granulado, se logra reducir la cantidad de aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos que pueda contener.

El siguiente trabajo cuenta con cinco partes. La primera parte describirá los antecedentes, fundamentos del proceso y la metodología del trabajo. En la segunda parte, se encontrará la construcción de la columna, además del experimento de prueba realizado con sus respectivos resultados. La tercera parte contará con las conclusiones y recomendaciones. En la cuarta, se encontrarán las referencias, y por último, en la quinta parte, se desglosarán los anexos.

OBJETIVOS

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de tratamiento primario mediante una torre de adsorción por carbón activado, para las aguas de riego recolectadas en el Recinto Santo Domingo de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

Objetivos Específicos

1. Analizar el agua pluvial que cae en el recinto de la UNPHU en busca de metales pesados.
2. Evaluar el carbón activado granulado que debe ser utilizado para el correcto funcionamiento de la columna.
3. Evaluar los parámetros de diseño de la torre de adsorción.
4. Diseñar una columna que funcione con carbón activado a pequeña escala que permita utilizar el agua pluvial para el riego de zonas verdes de la UNPHU.
5. Realizar un análisis, con los resultados obtenidos en la puesta en marcha previamente realizada, para saber si la columna puede ser llevada a gran escala para ser aplicada al sistema de riego de la UNPHU.
6. Realizar un estudio de factibilidad y mostrar si es conveniente o no, el desarrollo de un sistema de tratamiento primario mediante una torre de adsorción de carbón activado utilizando aguas pluviales para las zonas verdes de la UNPHU.

Justificación

Hoy día se buscan nuevas formas de utilizar y aprovechar los recursos naturales a nuestra disposición con el fin de reducir costos y energía para el desarrollo de un proceso, producto, proyecto, entre otros. El agua pluvial es un recurso natural que pocas veces aprovechamos.

Como egresados de la carrera de ingeniería química, tenemos las herramientas suficientes y la creatividad necesaria para planear, investigar, calcular, diseñar y poner en marcha, sistemas bien integrados; con baja huella ecológica y es por esta razón que creemos necesario un estudio de factibilidad para el empleo de columnas de adsorción de carbón activado para las aguas pluviales de la UNPHU, puesto que este nos acercaría un paso más a la sostenibilidad de la universidad y seguiría con la clara filosofía medioambiental que tiene la UNPHU desde su creación.

PRIMERA PARTE

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I AGUAS Y ESCORRENTÍAS

I.1 Antecedentes Históricos

El aprovechamiento del agua pluvial, es una actividad que se remonta a la época prehistórica, donde la necesidad del agua estaba estrictamente relacionada con la supervivencia de las personas. El ser humano ha utilizado el agua superficial como fuente de consumo, abastecimiento, así como vía de transporte. A medida que se presenta un incremento demográfico en las civilizaciones, se comienza el desarrollo de captación de agua de lluvia, como una alternativa para el uso doméstico, así como para el riego de cultivos.

Los sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, conocidos como SCALL, se han utilizado tradicionalmente a través de la historia, Pero estas tecnologías solo se han implementado y estudiado recientemente.

En el 2010, en la República Dominicana, algunas organizaciones no gubernamentales (ONG) se enfocaron a trabajar en el suministro de agua, ayudando a instalar sistemas de captación de agua de lluvia en más de 500 hogares. Muchos de estos sistemas son utilizados para el riego de plantas en las respectivas viviendas aprovechando así el recurso natural y contribuyendo al desarrollo sostenible.

El aprovechamiento de agua de lluvia es un tópico que representa una posibilidad tecnológica tanto de forma económica, ecológica como confiable. Es por eso que el desarrollo de un proceso que permita la implementación de estas, concede al ingeniero químico la oportunidad de crear un sistema que emplee la utilización de recursos químicos de la forma más eco-amigable como sea posible.

I.2 Conceptos teóricos

I.2.1 Aguas Pluviales y Aguas Negras

Las aguas pluviales son las aguas provenientes de las lluvias que escurren superficialmente por el terreno. Según la Teoría de Horton, las escorrentías se forman cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo. La recolección de agua pluvial es la acumulación y depósito de agua de lluvia para su reutilización *in situ*, en lugar de permitir que se ejecute fuera. Las aguas pluviales pueden ser utilizadas para: el jardín, el ganado, riego, uso doméstico (con el tratamiento adecuado), y la calefacción de interior de casas, entre otros.

En muchos lugares el agua recogida es sólo redirigida a un pozo profundo con percolación. La percolación en física, química y ciencia de los materiales, se refiere al paso lento de fluidos a través de materiales porosos. Ejemplos de este proceso son la filtración y la lixiviación.

El agua pluvial recolectada debidamente tratada se puede utilizar como agua potable, además puede ser almacenada y utilizada como agua de riego.

Las aguas negras, por otra parte, es un término que se utiliza para describir aguas residuales que contienen o han sido contaminadas por heces fecales, orina u otras descargas higiénicas. Las aguas negras contienen patógenos que deben descomponerse antes de que puedan ser liberados de forma segura en el medio ambiente. Las aguas negras son difíciles de procesar debido a su contenido de material orgánico.

I.2.2 Escorrentías

Aguas de escorrentía son las aguas que caen y corren sobre los techos de los edificios, en calles, aceras y en cualquier otra superficie impermeable durante un evento de lluvia. Estas aguas en lugar de introducirse en el suelo, corren sobre las superficies y llegan a los drenajes pluviales.

En hidrología, la escorrentía hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo.

I.2.3 Tipos de escorrentía

Existen distintos tipos de escorrentías dependiendo de su procedencia:

a) Escorrentía superficial o Directa.

La Escorrentía Superficial o Directa es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración. El proceso que describe el agua cuando se inicia un aguacero depende de las características del terreno: la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. Cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comenzará a moverse por la superficie del terreno. Se forma, entonces, una capa delgada de agua. Ésta se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación hasta incorporarse a la red de drenaje, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total.

b) Escorrentía Hipodérmica o Subsuperficial.

Es el agua de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve sub-horizontalmente por los horizontes superiores para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial e incorporarse a microsurcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje.

c) Escorrentía Subterránea.

Es la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático, desde donde circula hasta alcanzar la red de drenaje. La Escorrentía Superficial es la más rápida de todas y la Escorrentía Subterránea la más lenta (del orden del m/h). A parte de las tres formas referidas, la Escorrentía de un curso de agua está además constituida por la precipitación que cae directamente sobre su superficie de nivel, fracción que en la mayor parte de los casos reviste importancia muy escasa en relación con las otras aportaciones.

I.2.4 Coeficiente de Escorrentía

La escorrentía superficial provocada por un evento de lluvia (E_s) puede compararse con la intensidad del evento (P). El cociente entre ambos valores se le denomina coeficiente de escorrentía (C).

$$C = \frac{E_s}{P} \quad (1)$$

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores, como son: del tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), la cantidad e intensidad de la precipitación, la distribución en el tiempo de los eventos; de la humedad inicial del suelo; del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente, micro relieve, rugosidad), del tipo de cobertura

vegetal existente; de la intercepción que provoque; del lapso de tiempo que consideremos (minutos, duración del aguacero, horas, días, meses, un año), entre otros. El coeficiente de escorrentía puede tomar valores comprendidos entre cero y uno.

(Ver Anexos I, tabla 1)

$$0 \leq C \leq 1$$

En el caso de la lluvia, su intensidad resulta fundamental en el proceso de producción de escorrentía superficial.

El tipo de terreno influye sobremanera en el valor de C. Las dos propiedades físicas del suelo que mejor explican la formación de escorrentía superficial durante un evento de lluvia son la capacidad de infiltración y la permeabilidad. Así, se puede definir el coeficiente de escorrentía instantáneo (C(t)) como:

$$C(t) = \frac{i(t) - f(t)}{i(t)} \quad (2)$$

Donde:

$i(t)$ = la intensidad de lluvia en el instante t

$f(t)$ = la tasa de infiltración en dicho instante t.

I.2.5 Tormenta de Diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes. A través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales.

Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un histograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación de una zona o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de histogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas.

Para determinación de la tormenta de diseño sería recomendable contar con información obtenida a través de un pluviógrafo, ya que este equipo provee información instantánea.

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS DE LA ADSORCIÓN

La adsorción en disoluciones, fue un fenómeno que se observó por primera vez en 1785 por Lowitz, y pronto se aprovechó para la decoloración del azúcar en su etapa de refinado. En la segunda mitad del Siglo XIX ya se utilizaban en América filtros de carbón vegetal en las plantas de tratamiento de agua. Durante la Primera Guerra Mundial se fabricaron grandes volúmenes de carbón activo granular (GAC) para emplearse en las máscaras de gas. Al carbón se le solía añadir otras sustancias para hacer que algunos gases tóxicos que no son absorbidos por el carbón sean inocuos para el organismo. Las primeras unidades con GAC usadas para el tratamiento de aguas de abastecimiento público fueron construidas en Hamm (Alemania) en 1929. El carbón activo en polvo (PAC) se utilizó por primera vez para aguas públicas en New Milford (Nueva Jersey, Estados Unidos) en 1930

II.1 Adsorción

La adsorción es un proceso por el cual una o más partículas se acumulan sobre una superficie. Este proceso cuenta con dos elementos, la sustancia que se adsorbe, el adsorbato, y la sustancia sobre la que se produce la acumulación en el adsorbente. El proceso inverso de la adsorción es la desorción.

Algunas de las principales aplicaciones de la adsorción son las que se enumeran a continuación:

- Purificación de aguas residuales
- Descontaminación de gases
- Eliminación de olores, sabores o colores no deseados; por ejemplo en aceites

- Deshumidificación de gasolinas
- Secado de aire
- Ciencia forense (revelado de huellas dactilares)

II.1.1 Factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el agua.

Una adsorción efectiva depende de varios factores asociados a las propiedades de tanto el adsorbato como el adsorbente:

- El tipo de compuesto que desee ser eliminado. Los compuestos con elevado peso molecular y baja solubilidad se adsorben más fácilmente.
- La concentración del compuesto que desea ser eliminado. Cuanta más alta sea la concentración, más carbón se necesitará.
- Presencia de otros compuestos orgánicos que competirán con otros compuestos por los lugares de adsorción disponibles.
- El pH del agua. Por ejemplo, los compuestos ácidos se eliminan más fácilmente a pH bajo.
- Características físicas del adsorbente utilizado para la adsorción.

II.1.2 Equilibrio de adsorción

La adsorción de moléculas puede ser representada como una reacción química:



Donde, A es el adsorbato, B es el adsorbente y A·B es una representación del compuesto adsorbido por B.

Los adsorbatos son sostenidos en la superficie de diversos tipos de fuerzas químicas como enlaces de hidrógeno, interacciones dipolo-dipolo y fuerzas de Van der Waals. Si la reacción es reversible, como lo es para muchos compuestos adsorbidos en el carbón activado, las moléculas siguen acumulándose en la superficie hasta que la velocidad de la reacción de adsorción sea igual a la velocidad de la reacción inversa (desorción). Cuando existe esta condición, se ha alcanzado el equilibrio y no habrá mayor acumulación del adsorbato en el adsorbente.

II.1.3 Propiedades de la Adsorción

Un número de parámetros se utilizan para describir la capacidad de adsorción de carbono activado (Sontheimer , Crittenden, y Summers, 1988). El número de melaza o índice de decoloración se relaciona con la capacidad del carbón activado para adsorber cuerpos coloreados de gran peso molecular a partir de una solución de melaza, y generalmente se correlaciona bien con la capacidad del carbono activado para adsorber otros adsorbatos grandes. El índice de yodo (American Society for Testing Materials, 1988) mide la cantidad de yodo que se adsorberá bajo un conjunto específico de condiciones, y en general se correlaciona bien con la superficie disponible para moléculas pequeñas.

Otros números han sido desarrollados para aplicaciones específicas, tales como la actividad tetracloruro de carbono, el número de azul de metileno, y el valor de adsorción de fenol. Los valores de estos números dan información útil sobre las capacidades de los diversos carbones activados para adsorber diferentes tipos de compuestos orgánicos. Sin embargo, los datos de isothermas para compuestos específicos que han de ser removidos en una aplicación dada, si están disponibles, son mucho mejores indicadores de desempeño.

II.2 Adsorción con carbón activado

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activado es el sólido. El

carbón activado se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande. Esta superficie interna hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activado viene en dos variaciones: Carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granular (GAC). La versión de GAC, la que ha sido utilizada en este proyecto, se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas, puede fijar las siguientes sustancias solubles por adsorción:

Sustancias no polares (no solubles en agua)	Adsorción de sustancias halogenadas	Características físicas del adsorbato
Aceite mineral	I	Olor
BTEX	Br	Sabor
Poli hidrocarburos aromáticos	Cl	Levaduras
(Cloruro) Fenol	F	Productos de fermentación

Tabla. 2. Sustancias adsorbidas por Carbón Activado Granulado

FUENTE: Rivera, L., Guzman, J. Sustancias adsorbidas por el GAC

II.2.1 Características Físicas del Carbón Activado

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, solo que el orden en la estructura del carbón activado es menos perfecto. El carbón activado es capaz de retener en su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas, iones) que se encuentren disueltas en el líquido que entra en contacto con él. Varias características del carbón activado pueden afectar su rendimiento.

La forma de las partículas de carbón activado triturado es irregular, pero extruidos de carbón activado deben tener una forma cilíndrica lisa. La forma de las partículas afecta a las propiedades de filtración y retro lavado de camas GAC. El tamaño de partícula es un parámetro importante debido a su efecto sobre la tasa de adsorción. La distribución de tamaño de partículas se refiere a las cantidades relativas de partículas de diferentes tamaños que forman parte de una muestra dada, o lote, de carbono, y tiene un impacto importante en las propiedades de filtración de GAC en las columnas de GAC que se utilizan tanto como filtros para eliminar partículas y como adsorbentes (es decir, de filtros adsorbentes). Los tamaños de carbón activado comúnmente disponibles son 12 x 40 y 8 x 30 con malla estándar de EE.UU., que varían en diámetro aparente 1.68-0.42 mm y 2.38 a 0.59 mm, respectivamente. El coeficiente de uniformidad a menudo es bastante grande, por lo general del orden de 1.9, para promover la estratificación durante el lavado a contracorriente.

Carbones activados disponibles comercialmente tienen generalmente un pequeño porcentaje de material más pequeño que el tamiz más pequeño y más grande que el tamiz más grande, que afecta significativamente el coeficiente de uniformidad. Las partículas de carbono extruido tienen el mismo diámetro, pero varían en longitud.

II.3 Cinética de adsorción

II.3.1 Mecanismos de Transporte.

La eliminación de los compuestos orgánicos por adsorción física sobre adsorbentes porosos implica una serie de pasos, cada uno de los cuales pueden afectar a la velocidad de eliminación:

II.3.1.1 Transporte en Solución.

Los adsorbatos deben ser transportados de la solución a la capa límite de agua que rodea la partícula adsorbente. El transporte se produce a través de difusión, donde se produce el movimiento de la molécula desde una región de alta concentración a otra de menor concentración.

II.3.1.2 Resistencia externa al transporte.

Los adsorbatos deben ser transportados por difusión molecular a través de la capa estacionaria de agua (capa límite hidrodinámica) que rodea las partículas adsorbentes cuando el agua está fluyendo a través de ellas.

La distancia del transporte, es decir, la profundidad a la que llega el adsorbato a través de la partícula adsorbente, y por lo tanto el tiempo para este paso, se determina por la velocidad de flujo a través de la partícula. Cuanto mayor sea el caudal, más corta la distancia.

(Ver Anexos II, Fig. 1)

II.3.1.3 Transporte Interno (poros).

Después de pasar a través de la capa límite hidrodinámica, los adsorbatos deben ser transportados a través de los poros de los adsorbentes a los sitios de adsorción disponibles. El transporte intrapartícula puede producirse por difusión molecular a través de la solución en los poros (difusión de poro), o por difusión a lo largo de la superficie adsorbente (difusión superficial) después de que la adsorción se lleva a cabo.

(Ver Anexos II, Fig. 2)

II.3.1.4 Adsorción.

Después del transporte a un sitio disponible, se forma un enlace de adsorción entre el adsorbato y adsorbente. Este paso es muy rápido para la adsorción física y como resultado uno de los pasos precedentes de difusión controlará la velocidad a la cual las moléculas se retiran de la solución. Si la adsorción se acompaña de una reacción química que cambia la naturaleza de la molécula, la reacción química puede ser más lenta que la etapa de difusión, por lo tanto será ella quien controle la velocidad de eliminación del compuesto.

II.4 Funcionamiento del proceso

El tratamiento con carbón activado suele implicar al menos una columna o reactor lleno de GAC. Se suele bombear agua o un gas por una columna en dirección descendiente o en contracorriente. A medida que el agua o el aire contaminados pasan por la columna, los contaminantes se adhieren a las caras internas y externas de los gránulos de carbón, esto tiene como resultado un efluente con una concentración de contaminantes menor que el caudal de entrada.

El proceso de adsorción con carbón activado ocurre en tres pasos:

1. Macro transporte
 2. Micro transporte
 3. Adsorción
- En el primer paso, se produce el movimiento del material orgánico a través del sistema de macro-poros del carbón (macro-poros > 50nm).
 - Luego, se produce el movimiento del material a través del sistema de micro-poros del carbón activado (micro-poro < 2nm; meso-poro 2-50nm).
 - Por último, se produce el proceso de adsorción, en donde se produce la adhesión a los meso-poros y micro-poros del carbón activado.

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la del contaminante en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar en agua no puede ser eliminada o tiene una adsorción limitada al carbón activado, una sustancia no polar puede ser totalmente eliminada por el carbón activado.

II.4.1 Etapas en el proceso de adsorción

Varias etapas son involucradas en el proceso de adsorción global de una sola molécula de contaminante:

II.4.1.1 Etapa de transferencia de masa. La transferencia de masa de la masa de las aguas de escorrentía pluvial a la superficie del carbono de partículas a través de la capa límite alrededor de la partícula.

II.4.1.2 Etapa de difusión. Difusión interna a través de un poro.

II.4.1.3 Etapa de adsorción. La adsorción sobre la superficie de la partícula

CAPÍTULO III TIPOS DE REACTORES DE ADSORCIÓN

Los procesos que utilizan este tipo de carbono incluyen:

- Lecho fijo de adsorción.
- Lecho expandido de adsorción
- Lecho Móvil de adsorción
- Adsorción de lecho fluidizado

(Ver Anexos II, Fig. 3)

III.1 Reactores de flujo descendente de lecho fijo.

Este tipo de columna es el que utilizamos en este proyecto, sus características son las siguientes:

- Este es el tipo más común de la columna de adsorción para el tratamiento de aguas residuales
- Estas columnas deben estar provistos de un sistema para la eliminación de carbono gastado y la adición de carbono fresco o regenerado.
- Debido a su construcción y operación los reactores de lecho fijo también actúan como filtros de profundidad para partículas que pueden estar contenidos en las aguas residuales
- Por lo tanto esta columna de adsorción debe contar también con instalaciones para el lavado a contracorriente (incluyendo lavado de aire, si es necesario).

Existen dos tipos de reactores lecho fijo, los vemos a continuación:

III.1.1 Reactores de flujo descendente de lecho fijo en serie

En estos reactores el fluido es alimentado por la parte de arriba de la primera columna y sale por la parte de abajo de la misma, para inmediatamente entrar a la segunda columna, a través de tuberías adecuadas, que transportaran el líquido a la zona superior de la columna siguiente. Este proceso se repetirá con el número de columnas que se cuenten para el proceso a realizar.

(Ver Anexos II, Fig. 4)

III.1.2 Reactores de flujo descendente de lecho fijo en paralelo

En este proceso, una porción de la misma corriente del fluido entra simultáneamente a la parte superior de cada una de las columnas, para posteriormente, salir por la parte inferior de cada una, volviéndose a unir al mismo flujo.

(Ver Anexos II, Fig. 5)

Existe también un tipo de reactor de lecho fijo, pero en el cual el flujo será ascendente:

III.1.3 Reactores de flujo ascendente de lecho fijo en serie

Este sistema es similar al de reactores de flujo descendente de lecho fijo, siendo la única diferencia, que la corriente de líquido es alimentada por la parte inferior de la columna.

(Ver Anexos II, Fig. 6)

En la tecnología con lechos fijos se emplean normalmente dos o más columnas en serie o en paralelo, lo que permite lavar bien la primera columna, y también regenerar únicamente la fracción más saturada del carbón (primera

columna). Se organiza así un sistema de contracorriente por permutación cíclica 1,2,3→2,3,1 regenerada, etc.

III.2 Reactores de flujo ascendente de lecho expandido

En general, la mayoría de las columnas de flujo ascendente adsorben y operan en el modo de lecho expandido.

Se utilizan adsorbentes de lecho expandido cuando las aguas residuales alimentadas a la columna contienen una fracción significativa de partículas en suspensión.

Ya que el lecho siempre está expandido, la columna no actúa como un filtro para las partículas suspendidas.

III.3 Reactores de lecho móvil

En estos reactores el fluido entra desde la parte de abajo de la columna y fluye hacia la parte superior de la misma, al mismo tiempo, adsorbente fresco es alimentado por la parte superior y el que ya está gastado es retirado por la parte inferior.

(Ver Anexos II, Fig.7)

III.4 Adsorción de lecho fluidizado

Se le llama adsorción de lecho fluidizado al proceso en el cual el lecho formado por partículas sólidas finamente divididas se levanta y se agita por medio de una corriente ascendente de fluido.

El fluido es alimentado por la parte inferior de la columna, agitando las partículas sólidas a su paso por la misma saliendo por la parte superior.

(Ver Anexos II, Fig.8)

Parámetros	Lecho Fijo de Adsorción	Lecho Expandido de adsorción	Lecho Móvil	Lecho Fluidizado
Uso	Es el más común.	Se utiliza en casos de fluidos con partículas suspendidas.	Especialmente utilizado en birreactores	Muy utilizado en cracking de petróleo
Carbón y Columna	Requieren sistema de regeneración de carbono o desecho de carbono gastado.	No requiere que la columna actúe como filtro.	Carbón activado fresco es alimentado por la parte superior de la columna y el gastado es retirado por la parte inferior. Siempre de manera opuesta a la dirección del flujo.	El lecho de carbón se levanta a la entrada del fluido debido a la velocidad de entrada del mismo y se empieza a realizar en él la adsorción.
Tipo de Flujo	Flujo ascendente o descendente.	Reactores de flujo ascendente.	Flujo ascendente.	Flujo ascendente
Organización de las columnas	Columnas en serie o en paralelo.	Columnas en serie	N/A	N/A

Tabla. 3. Comparación de los diferentes lechos de adsorción.

FUENTE: Rivera, L., Guzman, J. Comparación de los diferentes lechos de adsorción

CAPÍTULO IV ISOTERMA

La isoterma es una curva que une aquellos puntos que presentan las mismas temperaturas en una unidad de tiempo considerada.

Por otro lado, el término se emplea para referir que tal o cual cosa presentan igual temperatura o una temperatura que se caracteriza por mantenerse constante en el tiempo.

Por su lado, el proceso isotérmico o proceso isoterma, resulta ser el cambio de temperatura reversible en un sistema termodinámico, siendo el mencionado cambio constante para todo el sistema. Un ejemplo de la acción de este proceso es la compresión o expansión de un gas ideal que se halla en contacto permanente con un termostato; se coloca el gas para que haga contacto térmico con otro sistema de capacidad calorífica grande y que esté a la misma temperatura que el gas. El calor se transferirá muy lentamente facilitando que el gas se expanda.

IV.1 Modelos de isotermas para adsorción por carbón activado.

Una de las características más importantes de un adsorbente es la cantidad de adsorbato que se puede acumular. La relación de equilibrio a temperatura constante entre la cantidad de adsorbato por unidad de adsorbente q_e y su concentración de equilibrio de la solución C_e se llama isoterma de adsorción.

Varias ecuaciones o modelos están disponibles que describen esta función (Sontheimer, Crittenden, y Summers), pero las ecuaciones más comunes para adsorción de un solo soluto son la de Langmuir y Freundlich, las cuales son presentadas a continuación.

IV.1.1 Modelo de Langmuir

La ecuación de Langmuir se presenta:

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (3)$$

Donde b y q_{\max} son constantes y q_e y C_e son la superficie de equilibrio y las concentraciones de la solución respectivamente.

La constante q_{\max} corresponde a la concentración superficial en cobertura monocapa y representa el valor máximo de q_e que se puede lograr cuando se incrementa C_e . La constante b se relaciona con la energía de adsorción y aumenta a medida que la fuerza de los enlaces de adsorción aumenta. La ecuación de Langmuir a menudo no describe datos de adsorción con tanta precisión como la ecuación de Freundlich. Los valores determinados experimentalmente de q_{\max} y b a menudo no son constantes a lo largo del rango de concentración de interés, posiblemente debido a la naturaleza heterogénea de la superficie adsorbente, las interacciones laterales entre moléculas adsorbidas y otros factores.

IV.1.2 Modelo de Freundlich

La ecuación de Freundlich es una ecuación empírica que es muy útil porque su precisión nos provee muchos datos de adsorción. Esta ecuación tiene la forma siguiente:

$$q_e = K C_e^{1/n} \quad (4)$$

Y puede ser linearizado como sigue:

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

Los parámetros q_e y C_e poseen unidades de masa adsorbato/masa de adsorbente, o moles de adsorbato/masa de adsorbente y unidades de masa/volumen, o moles/volumen respectivamente. Los términos K y $1/n$ son constantes para un sistema dado; $1/n$ es adimensional, y las unidades de K se determinan por las unidades de q_e y C_e . Aunque la ecuación de Freundlich fue desarrollada para ajustar empíricamente los datos de adsorción, una teoría de la adsorción que conduce a la ecuación de Freundlich fue desarrollada más tarde por Halsey y Taylor en 1947.

El parámetro K en la ecuación de Freundlich está relacionado principalmente con la capacidad del adsorbente para el adsorbato, y $1/n$ es una función de la fuerza de adsorción. Para valores fijos de C_e y $1/n$, mientras mayor sea el valor de K , mayor será la capacidad de q_e . Para valores fijos de K y C_e , mientras menor sea el valor de $1/n$, más fuerte es el enlace de adsorción. Como $1/n$ se hace muy pequeña, la capacidad tiende a ser independiente de C_e y la estructura isoterma se acerca al nivel horizontal; el valor de q_e a continuación, es esencialmente constante y la isoterma se denomina irreversible. Si el valor de $1/n$ es grande, el vínculo de adsorción es débil, y el valor de q_e cambia marcadamente con pequeños cambios en la C_e .

La ecuación de Freundlich no puede aplicarse a todos los valores de C_e , sin embargo, a medida que aumenta C_e , aumenta q_e (de acuerdo con la ecuación 3 sólo hasta que el adsorbente se acerca a la saturación. En saturación, q_e es una constante, independiente de nuevos aumentos de C_e , y la ecuación de Freundlich ya no se aplica. Además, no existe ninguna garantía de que los datos de adsorción se ajustarán a la ecuación de Freundlich sobre todas las concentraciones de menos de saturación, por lo que se debe tener cuidado en la ampliación de la ecuación a los rangos de concentración que no han sido probadas.

IV.2 Factores que afectan el equilibrio de adsorción

Las características adsorbentes más importantes que afectan las isothermas son la superficie, distribución de tamaño de poro, y química de superficie. La cantidad máxima de adsorción es proporcional a la cantidad de área de superficie dentro de los poros que es accesible para el adsorbato. El área de superficie varía desde unos cientos a más de 1,500 m²/g, pero no toda el área es accesible para adsorbatos acuosos. Un volumen relativamente grande de micro-poros (poros de menos de 2 nm de diámetro) generalmente corresponde a un área de gran superficie y una gran capacidad de adsorción de moléculas pequeñas, mientras que un gran volumen de meso-poros (2 < d < 50 nm) y macro-poros (d > 50 nm) es usualmente correlacionada directamente a la capacidad para moléculas grandes.

CAPITULO V DISEÑO DE UNA TORRE DE CARBÓN ACTIVADO

Uno de los propósitos principales de este proyecto, es la eliminación máxima de contaminantes primarios presentes en el agua de escorrentía de la UNPHU, con eficiencia, rapidez y economía, todo esto se logra a través del diseño óptimo de la torre y la correcta elección del absorbente, que en este caso es el Carbón Activado Granulado.

V.1 Zonas de la columna

En la adsorción en lecho fijo, en cualquier momento dado, el lecho se puede dividir en tres zonas aproximadamente, la zona saturada (que contiene carbono prácticamente saturado con los contaminantes), seguido por la zona de adsorción (donde la adsorción tiene realmente lugar), y luego por una zona en la que el carbono contiene poco o ningún contaminante adsorbido.

La adsorción de contaminantes se produce casi exclusivamente sobre una parte del lecho llamado zona de adsorción, aguas abajo de la zona saturada.

La concentración de contaminante en el carbono varía desde cerca de la saturación (en el comienzo de la zona de adsorción) a cerca de cero (hacia el final de la zona de adsorción). Por el contrario, la concentración de contaminantes en las aguas de escorrentía, cambia con el carbono de carga casi llena (al comienzo de la zona de adsorción) a casi cero (en el extremo de la columna)

En cualquier momento, la porción del lecho descendente de la zona de adsorción contiene muy poco contaminante adsorbido ya que el agua residual que está en contacto con él, ya no tiene casi contaminantes.

Conforme pasa el tiempo una mayor porción del lecho se satura con el contaminante y la zona de adsorción se desplaza descendentemente formando una onda de adsorción.

Finalmente, la parte delantera de la onda de adsorción alcanza el extremo del lecho de carbón. Cuando esto sucede el lecho comienza a liberar el agua de

escorrentía que tiene una concentración de contaminante más alto que el valor deseado (normalmente, un 5-10% de la concentración de influente). Este punto se llama Punto de Interrupción (Breakpoint).

La curva correspondiente a la concentración de contaminantes en el efluente en función del tiempo se llama Curva de Ruptura (Breakthrough Curve).

(Ver Anexos II, Fig. 9 y Fig.10)

V.2 Tamaño de partículas de carbón activado utilizados en adsorción de lecho fijo.

Típicamente tamaños de partículas de carbono entre 0,4 y 2,5 mm se utilizan en aplicaciones de absorción lecho fijo.

Este rango de tamaño resulta, por un lado, de una relación práctica entre el límite de la presión que cae y la superficie adecuada, y por otro lado, promover la transferencia de masa para la adsorción de contaminantes.

Tamaños más grandes también minimizan las pérdidas durante el manejo del carbono y el funcionamiento de lecho compacto.

SEGUNDA PARTE
ENFOQUES PRÁCTICOS

CAPITULO VI EQUIPOS Y MATERIALES

VI.1 Equipos

VI.1.1 Espectrofotómetro DR3900

Un espectrofotómetro es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra. Es utilizado en los laboratorios de química para la cuantificación de sustancias y microorganismos. Este espectrofotómetro tiene un rango de longitud de onda de 320-1100 nm.

VI.1.2 Reactor DRB200

El reactor es un aparato, por donde entran las materias a tratar, convenientemente humedecidas. Dentro no hay oxígeno y las bacterias anaerobias se multiplican y procesan la materia orgánica, produciendo gas metano. Este digestor tiene un rango de calentamiento de 20-150°C el cual se logra en un tiempo de aproximadamente 10 minutos.

VI.1.3 Espectrómetro de masa ICP-MS

El ICP-MS puede analizar metales y no metales con concentraciones bajas en unidades de parte por trillón (ppt). El plasma de acoplamiento inductivo (ICP)

es una fuente de ionización a presión atmosférica que junto a un espectrómetro de masas (MS) a vacío, constituye el equipo de ICP-MS.

VI.1.4 Bomba de riego sumergible Aquatop NP-80 de 80 GPH

Una bomba sumergible es una bomba que tiene un impulsor sellado al exterior. El conjunto se sumerge en el líquido a bombear. La ventaja de este tipo de bomba es que puede proporcionar una fuerza de elevación significativa pues no depende de la presión de aire externa para hacer ascender el líquido. La bomba de 80 GPH tiene la capacidad de mover 80 galones por hora.

VI.1.5 Centrifuga

Es un equipo de laboratorio que genera movimientos de rotación. Tiene el objetivo de separar los componentes que constituyen una sustancia

VI.2 Materiales y Reactivos

Estos son los materiales y reactivos utilizados en los procesos realizados:

- Viales de DQO reactivos de digestión.
- Tubos de ensayo.
- Vasos de precipitados de 50, 100 ml y 3 litros.
- Probeta de 1L.
- Micro pipeta.
- Columna de cromatografía de vidrio de 53 ml con 1.5 ID.
- Papel pH.

- Gradilla para el tubo de ensayo.
- Ácido clorhídrico 5N.
- Hidróxido de amonio.
- Hipoclorito de sodio al 10%.
- Cloruro de estaño.
- Fenolftaleína.
- Ácido nítrico.
- Acetato de amonio.
- Cromato de potasio.
- Ácido sulfhídrico.
- Hidróxido de sodio.
- Ácido acético.
- Ferrocianuro de potasio.
- Cianuro de potasio.
- Acido oxálico.
- Cloruro de mercurio.
- Hierro estándar.
- Carbonato de amonio.
- Azul de bromotimol.
- Peróxido de hidrogeno.
- Aluminon.
- Acetato de plomo.
- Tiocianato de sodio.
- Tiocianato de potasio.
- Dimetilglioxina.
- Alcohol isoamilico.
- Papel absorbente.
- Agua destilada.

CAPITULO VII DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

El desarrollo genérico del proceso realizado fue el siguiente:

- 1) Recolección de agua pluvial para muestreo
- 2) Análisis cualitativo de muestras.
- 3) Analisis de pruebas Batch.
- 4) Experimento de Columnas de Adsorción.
- 5) Determinación de DQO y metales.
- 6) Calculo de capacidad de cisterna.
- 7) Diseño de columna de Adsorcion
- 8) Calculo de Factibilidad de proyecto a gran escala.

VII.1 Recolección del agua pluvial para muestreo

El primer paso a realizar previo al análisis del agua, es su recolección. Éste se realiza con el agua pluvial que cae en las distintas cunetas de la zona a analizar. Una cuneta es una zanja o canal que se abre a los lados de las vías terrestres de comunicación y que, debido a su menor nivel, recibe las aguas pluviales y las conduce hacia un lugar que no provoquen daños o inundaciones. Estos canales arrastran los contaminantes que se puedan encontrar en la zona y los converge en un mismo punto.

El agua recolectada de las distintas cunetas de la UNPHU, fueron tomadas de los siguientes puntos:

- 1) Cuneta – Odontología / Veterinaria
- 2) Cuneta – Edificio 2 / Arquitectura / Play
- 3) Cuneta – Edificio 4 (lado Este)
- 4) Cuneta – Edificio 4 / Parqueo Biblioteca / Edificio 5

5) Cuneta – Edificio 8 / parqueo / zona verde

6) Caño Edificio 5

(Véase Anexo IV,)

VII.2 Análisis Cualitativo de la Muestras

El análisis cualitativo se realiza paRa determinar los iones presentes en el agua pluvial. De mayor interés son los metales pesados que podrían estar contaminando las muestras; entre estos se pueden encontrar: cadmio, cobre, mercurio, plomo y arsénico. Se determinó la presencia de metales y algunos iones mediante una marcha analítica la cual es un proceso técnico y sistemático de identificación de iones inorgánicos en una disolución mediante reacciones químicas en las cuales se produce la formación de complejos o sales de color único y característico.

Los elementos de interés a analizar son aquellos encontrados en los siguientes grupos:

1A	2A	2B	3A	3B
Plomo	Plomo	Arsénico	Hierro	Níquel
Mercurio	Mercurio	Antimonio	Aluminio	Cobalto
Plata	Bismuto	Estaño	Cromo	Zinc
	Cadmio			Manganeso
	Cromo			

Grupo 1A

El análisis realizado para este grupo se basó en lo siguiente:

Paso 1:

Se tomó una alícuota de 10 ml de la solución problema en un tubo de ensayo y se le agregó ácido clorhídrico (HCL) diluido en exceso a concentración 5N (normal), se centrifugó y se separó la solución filtrada del precipitado. Se desechó el filtrado, y el precipitado se lavó con agua destilada calentándolo por 5 minutos a baño maría.

Paso 2:

La solución calentada se centrifugó nuevamente para separar el residuo y el filtrado. El residuo puede contener cloruro de mercurio (HgCl_2) y cloruro de plata (AgCl), mientras que el filtrado puede contener cloruro de plomo (PbCl_2).

Paso 3:

El residuo obtenido se lavó con agua destilada para poder eliminar cualquier rastro de plomo que puede contener y se calentó por unos minutos a baño maría. Luego se vertió una solución de hidróxido de amonio (NH_4OH) sobre el precipitado en el filtro y se volvió a calentar. Posteriormente, esta muestra se centrifugó y se separó. El residuo que se obtuvo puede contener mercurio mientras que el filtrado plata.

A este residuo se le agregó 15 gotas de hipoclorito de sodio (NaClO) más 5 gotas de ácido clorhídrico (HCl). Se calentó por unos minutos y un precipitado de color negro indica la presencia de mercurio (Hg). Se puede confirmar agregándole cloruro de estaño (SnCl_2) y un precipitado blanco grisáceo indicará la presencia de mercurio (Hg).

Al filtrado obtenido con la solución que pueda contener plata (Ag), se le agrego 1 gota de fenolftaleína mas ácido nítrico (HNO_3), y un precipitado blanco indicará la presencia de plata (Ag).

Paso 4:

Se procede a trabajar con el filtrado resultante que pueda contener plomo (Pb). A esta solución se le agrego acetato de amonio ($\text{NH}_3\text{CH}_3\text{COO}$) para ajustar $\text{pH} = 5$. Se utilizó una cinta de pH para observar el valor y cuando se obtuvo el pH deseado se le agrego a la solución cromato de potasio (K_2CrO_4). Un precipitado amarillo indicará la presencia de plomo.

(Ver Anexos III, Marcha Analítica IA)

Grupo 2A

El análisis de este grupo se centró en lo siguiente:

Paso 1:

Se tomó una alícuota de 10 ml de la solución problema en un tubo de ensayo y se le añadió ácido sulfhídrico (H_2S) en presencia de HCl diluido para obtener el precipitado correspondiente al grupo 2A. Este precipitado puede contener: sulfuro de hidrogeno (HgS), sulfuro de plomo (PbS), sulfuro de bismuto (BiS), sulfuro de cobre (CuS) y sulfuro de cadmio (CdS).

El precipitado se lavó con agua destilada, se calentó y se centrifugo. Se desechó el filtrado y a continuación se agregó al precipitado 10 ml de ácido nítrico (HNO_3) diluido, se hirvió suavemente durante unos minutos, se filtró y se lavó el residuo.

Paso 2:

El residuo puede contener sulfuro de mercurio (HgS). Éste se disolvió en una mezcla de 2.5 ml de solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 10% y 0.5 ml

de ácido clorhídrico (HCl) diluido. Se agregó 1 ml de ácido clorhídrico (HCl) diluido, se eliminó el excedente de Cloro (Cl_2) por ebullición y se enfrió. Se agregó solución de cloruro de estaño (SnCl_2), el cual da un precipitado blanco que se transforma en gris o negro en presencia de mercurio.

Paso 3:

El filtrado obtenido con el ácido nítrico (HNO_3) diluido puede contener nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), nitrato de bismuto ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$), nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), y nitrato de cadmio ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$). Se agregó un exceso de solución concentrada de hidróxido de amonio (NH_4OH) hasta que no se formó más precipitado. Se filtró.

Paso 4:

El residuo resultante puede contener hidróxido de bismuto ($\text{Bi}(\text{OH})_3$), e hidróxido de plomo ($\text{Pb}(\text{OH})_2$), se calentó con 5 ml de solución de hidróxido de sodio (NaOH) y se filtró.

Este segundo residuo puede ser hidróxido de bismuto ($\text{Bi}(\text{OH})_3$). Se lavó el precipitado y se disolvió en ácido nítrico (HNO_3). Un ennegrecimiento del precipitado indica la presencia de bismuto (Bi). Por otra parte, el filtrado resultante con el NaOH puede contener plumbito de sodio (NaPbO_2). Se acidificó con Ácido Acético diluido y se agregó una solución de cromato de potasio (K_2CrO_4). Un precipitado amarillo de cromato de plomo (PbCrO_4) indica presencia de plomo.

Paso 5:

Se trabajó con el filtrado obtenido de la dilución de hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado el cual puede contener complejos de nitrato cobre amoniacal $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{NO}_3)_2$ y nitrato de cadmio amoniacal $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4](\text{NO}_3)_2$. Si es incoloro no hay cobre (Cu), entonces se investiga directamente cadmio (Cd) haciendo pasar sulfuro de hidrógeno (H_2S) durante 10-20 segundos por la solución amoniacal; precipitado amarillo indicará sulfuro de cadmio (CdS). Si el filtrado es azul indica la presencia de cobre.

Paso 6:

Se dividió la solución en dos porciones desiguales. La porción menor, se acidificó con ácido acético y se le agregó solución de ferrocianuro de potasio $K_4[Fe(CN)_6]$; precipitado pardo rojizo confirma cobre.

A la proporción mayor, se le agregó, gota a gota, solución de cianuro de potasio (KCN) hasta que se decolorase. Se hizo pasar sulfuro de hidrogeno (H_2S) por 30 segundos. Un precipitado inmediato amarillo indica presencia de cadmio.

(Ver Anexos III, Marcha Analítica IIA)

Grupo 2B

Se realizó de la siguiente manera:

Paso 1:

Se tomó una alícuota de 10 ml de la solución problema en un tubo de ensayo y se le agregó ácido clorhídrico (HCL) diluido de concentración 3-5 molar, más sulfuro de hidrogeno (H_2S) y se calentó por unos minutos. luego, se centrifugo y se desechó el filtrado. este residuo puede contener sulfuro de arsénico (As_2S_3), sulfuro de antimonio (Sb_2S_3) y sulfuro de estaño (SnS).

Paso 2:

Al residuo se le añadió ácido clorhídrico (HCL) concentrado para que quede en precipitado el sulfuro de arsénico (As_2S_3) y poder diluir el sulfuro de antimonio (Sb_2S_3) y sulfuro de estaño (SnS). Se centrifugo y se filtró.

Paso 3:

Se procedió a trabajar con el residuo y se le añadió carbonato de amonio (NH_4CO_3), luego se calentó por 2 o 3 minutos. A continuación, a ésta solución se le agregó ácido clorhídrico (HCl) concentrado y un precipitado amarillo indicará la presencia de arsénico.

Paso 4:

Posteriormente, el filtrado obtenido con el ácido clorhídrico (HCl) concentrado puede contener cloruro de antimonio y cloruro de estaño (SbCl_3 y SnCl_4). Ésta solución se calentó para poder eliminar cualquier rastro de azufre que pueda quedar.

Se procede a separar la solución en dos tubos de ensayo. Al primer tubo se le realizaron las pruebas correspondientes para observar si hay presencia de estaño agregándole hierro estándar (Fe°) y calentándolo por unos minutos. El hierro sirve como agente reductor y lleva el Sn de Sn^{+4} a Sn^{+2} . Luego, se le añadió cloruro de mercurio (HgCl_2) y un precipitado blanco o gris indica la presencia de Estaño.

Al segundo tubo, se le añadió hidróxido de amonio concentrado para llevar a $\text{pH} = 8$. Luego que se obtuvo el pH deseado, se le agrego ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$). Por último, se añadió sulfuro de hidrógeno (H_2S) a la solución y un precipitado anaranjado indica la presencia de antimonio.

(Ver Anexos III, Marcha Analítica IIB)

Grupo 3A

El análisis realizado para este grupo se basó en lo siguiente:

Paso 1:

Se tomó una alícuota de 10 ml de la solución problema en un tubo de ensayo y se le añadió 10 gotas de azul de bromotimol, 10 gotas de cloruro de amonio (NH_4Cl) al 20% y lentamente se vertió un poco de hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH) hasta que empezara la efervescencia. Se hirvió de 1 a 3 minutos a baño maría.

Paso 2:

La solución calentada se centrifugo para separar el residuo y el filtrado. El residuo puede contener hidróxido de cromo III ($\text{Cr}(\text{OH})_3$), hidróxido de hierro III ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). El filtrado se desecha.

Paso 3:

El residuo obtenido se lavó con agua destilada y se le agregó un exceso de solución de hidróxido de sodio (NaOH) y 5 ml de peróxido de hidrogeno (H_2O_2). Se hirvió hasta que la efervescencia cesara. Se filtró y se lavó.

Paso 4:

Se procedió a trabajar con el filtrado resultante que puede contener aluminato de sodio (NaAlO_2) y cromato de sodio (Na_2CrO_4)

Esta solución se dividió en dos porciones, a la primera, se le agregó ácido acético hasta alcanzar un $\text{pH}=5$ (HCH_3COO) y luego una solución de acetato de plomo ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$). Un precipitado amarillo indica la presencia de cromo.

A la segunda porción, se le agregó poco a poco una solución de ácido acético hasta alcanzar un $\text{pH}=6$ (HCH_3COO) y se adicionó luego un poco de cloruro de amonio (NH_4Cl), de esta manera obtendremos un precipitado de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). A continuación, este precipitado es lavado y acidificado con ácido clorhídrico diluido 5 N (HCl), se le agregó una solución de acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$), carbonato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) y aluminon. La formación de un precipitado rojo brillante indica la presencia de aluminio.

Paso 5:

El residuo obtenido del paso 3 puede contener hidróxido de hierro III ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Este se dividió en dos porciones, a la primera se le agregó una solución de tiocianato de sodio (NaSCN), la presencia de un precipitado rojo sangre me indica presencia de hierro.

A la segunda porción se le adicionó una solución de ferrocianuro de potasio ($K_2[Fe(CN)_6]$), la presencia de un precipitado azul, indica presencia de hierro.

(Ver Anexos III, Marcha Analítica IIIA)

Grupo 3B

El análisis realizado para este grupo se basó en lo siguiente:

Paso 1:

Se tomó una alícuota de 10 ml de la solución problema en un tubo de ensayo y se le añadió 10 gotas de cloruro de amonio (NH_4Cl) al 20%, 1 gota de azul de bromotimol, 5 gotas de hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH) y 12 gotas de S^{2-} , se centrifugo y se separó la solución filtrada del precipitado. Se desechó el filtrado, y el precipitado se lavó con agua destilada y se calentó por 5 minutos a baño maría.

Paso 2:

La solución calentada se centrifugó nuevamente para separar el residuo y el filtrado. El residuo puede contener sulfuro de níquel (NiS), sulfuro de zinc (ZnS), sulfuro de manganeso (MnS) o sulfuro de cobalto (CoS).

A este residuo se le añadió ácido clorhídrico (HCl) diluido 5N, se centrifugo y se separó nuevamente.

Paso 3:

El residuo obtenido puede ser sulfuro de níquel (NiS), sulfuro de cobalto (CoS), o azufre (S^{+2}), se lavó con agua destilada y se vertió una solución de hipoclorito de sodio ($NaClO$) y ácido clorhídrico (HCl). Posteriormente, esta muestra se centrifugo y se separó en dos porciones. A la primera se le adicionó cloruro de amonio (NH_4Cl), hidróxido de amonio (NH_4OH) y un exceso del reactivo Dimetilglioxina. La formación de un precipitado rojo indica la presencia de Níquel.

A la segunda porción se le agregó alcohol isoamílico y 1 gota tiocianato de potasio ($K(CNS)$). Se sabrá que hay presencia de cobalto si la capa de alcohol tiene una coloración azul.

Paso 4:

Se procedió a trabajar con el filtrado resultante del paso 2. Esta solución puede contener cloruro de manganeso ($MnCl_2$), cloruro de zinc ($ZnCl_2$) y sulfuro de hidrogeno (H_2S), se le aplicó calor hasta que el sulfuro de hidrogeno (H_2S) se evaporara. A continuación, se le agregó hidróxido de hidrogeno ($NaOH$) y se calentó nuevamente, se centrifugo y se separó.

Paso 5:

El residuo de esta solución puede contener hidróxido de manganeso ($Mn(OH)_2$), a este se le agregó ácido nítrico (HNO_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y se colocó a calentar durante 2 o 3 minutos. La solución obtenida puede ser nitrato de manganeso ($Mn(NO_3)_2$) a la que se le adicionó ácido nítrico concentrado (HNO_3) y bismutato de sodio ($NaBiO_3$). Un precipitado verde puede indicar presencia de manganeso.

Paso 6:

El filtrado de la solución del paso 4 puede contener zincato de sodio (Na_2ZnO_2), este se dividió en dos porciones. A la primera se le agregó cloruro de amonio (NH_4Cl) y ferrocianuro de potasio $K_4[Fe(CN)_6]$. Un precipitado blanco indica la presencia de zinc.

A la segunda porción se le añadió 10 gotas de ácido acético (HCH_3COO) y azufre (S^{+2}), la formación de un precipitado blanco confirmara la presencia la presencia de zinc.

(Ver Anexos III, Marcha Analítica IIIB)

VII.3 Análisis de pruebas Batch.

El tercer paso desarrollado en el análisis fue el de realizar pruebas batch. Las pruebas batch son aquellas pruebas que nos permiten saber la cantidad de carbono que se necesita para eliminar una determinada cantidad de sustancia. El modelo utilizado para el desarrollo de los cálculos fue el modelo de Freundlich. Junto a las pruebas experimentales de columna se pudo conocer la concentración de DQO a diferentes volúmenes en un tiempo de 24 horas. Los cálculos realizados fueron representados en los resultados.

VII.4 Experimento de columnas

El cuarto paso para el desarrollo del análisis fue el realizar experimentos de columnas y así determinar el caudal necesario y la cantidad de DQO retenido en la columna a diferentes volúmenes.

En primer lugar, se realizó un lavado del carbón activado con agua de osmosis, por un tiempo de 10 horas. Se llenó la columna completa con carbón activado y se hizo pasar el agua desde arriba. Luego de pasada el agua, se sacó el carbón de la columna, se guardó en papeles de aluminio, y posteriormente fue secado en un horno a 200°C por 5 horas para eliminar cualquier rastro de DQO que pudiera contener el carbón.

En segundo lugar, fueron tomados 50 ml de cada una de las muestras recolectadas por separado antes de pasarlas por la columna. Luego se tomaron 500 ml de cada una de las muestras recolectadas, y se vertió en un galón. Posteriormente, el agua se vertió en un vaso de precipitado de 3L.

A continuación se determinaron los datos de DQO para cada una de las muestras recolectadas por individual, se pudo calcular el DQO inicial de toda la muestra junta antes de ser pasada por la columna y consecutivamente se pudo determinar el caudal experimental para las pruebas de columnas.

El caudal experimental (Q_{exp}) fue calculado tomando en cuenta el volumen de la columna, el cual es de 50 ml y multiplicándolo por el caudal de bombeo (Q_b), el cual fue tomado del libro de Water and wastewater engineering: Design principles and practice. Después de obtener el caudal experimental, se determinó la cantidad de carbón adsorbido por minuto, de acuerdo a las especificaciones del carbón.

(Ver anexos 5; Análisis 1).

Por último, se pasó el caudal experimental por un tiempo de 6 horas a través de la columna y se obtuvo la concentración de DQO a diferentes volúmenes, pudiendo así determinar cuánto carbono se consume por día. Con este dato se pudo obtener el volumen de agua tratado por unidad de adsorbente, dividiendo el volumen obtenido en donde se empieza a consumir carbono entre la cantidad de carbón activado utilizado en las pruebas que fueron 15 gramos.

VII.5 Determinación de DQO

La Demanda Química de Oxígeno, es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en $mg\ O_2/L$. el valor obtenido siempre es superior a la demanda biológica de oxígeno (aproximadamente el doble).

Principio:

Los resultados mg/L de DQO se definen como los mg de O_2 consumido por litro de muestra bajo las condiciones de este procedimiento. En este procedimiento, la muestra se calienta durante dos horas con un fuerte agente oxidante, dicromato de potasio. Los compuestos orgánicos oxidables reaccionan reduciendo el ion de dicromato ($Cr_2\ O_7^{2-}$) a un ion crómico de color verde (Cr_3^+). 0.7 a 40.0 cuando se utiliza el método colorimétrico o título de 3-150 mg/L se determinara la cantidad de Cr_6 remanente. Los resultados de las pruebas para el

0.7-40 mg/L, se mide a 350 nm. Los resultados de las pruebas para el 3 a 150 mg/L cuando se utiliza el método colorimétrico de 20 a 1500 mg/L o 2000 a 15000 mg/L se determina la cantidad de Cr_3^+ producido. Los resultados de la prueba de los 20 a 1500 y de 2000 a 15000 mg/L DQO se miden a 620 nm. El residuo de DQO también contiene iones de plata y los iones de mercurio. La plata es un catalizador, y el mercurio se utiliza para formar complejos de las interferencias de cloruro.

Procedimiento realizado:

- 1) Se encendió el reactor DRB200 (digestor), seleccionando en la pantalla del reactor el método y la temperatura, la cual es de 150 °C.
- 2) Se homogenizó cada una de las muestras por agitación, se tomó dos ml de cada una de las muestras con una micro pipeta y se agregó cada tomo de muestra a diferentes viales de reactivo DQO.
- 3) Se tomó 2 ml de agua destilada con una micro pipeta y se agregó a un vial reactivo DQO como blanco.
- 4) Se introdujo cada uno de los viales en el DR200 y se cerró la tapa protectora del equipo, se calentaron los tubos por dos horas a una temperatura de 150°C.
- 5) Una vez que finalizado el tiempo de calentamiento de los viales, se apagó el equipo y se esperó por 20 minutos hasta que se enfrió a 120 grados centígrados o menos.
- 6) Se tomó los tubos y se invirtieron varias veces suavemente, se colocaron en la gradilla y se esperó hasta que se enfriaran a temperatura ambiente.
- 7) En el espectrofotómetro se seleccionó el número del método en la pantalla del equipo, se limpió la parte externa de los tubos con papel absorbente y rotación hasta secar.
- 8) Se insertó el blanco en la celda de 16-mm, se presionó 0 en la pantalla hasta que se mostró 0.00mg/l DQO.

- 9) Se insertaron cada una de las muestras en la misma celda del paso anterior y se leyó la muestra en mg/L DQO.

Determinación de metales

La determinación cuantitativa de metales se realizó en colaboración con el Laboratorio de la Dirección General de Aduanas (DGA). El método utilizado fue el de espectrometría de masas (MS). Este método utiliza el movimiento de iones en campos eléctricos y magnéticos para clasificarlos de acuerdo a su relación masa-carga. De esta manera, la espectrometría de masas es una técnica analítica, por medio de la cual las sustancias químicas se identifican separando los iones gaseosos en campos eléctricos y magnéticos. Los instrumentos usados en estos estudios se llaman espectrómetros de masas, bajo el principio de que los iones pueden ser desviados a campos eléctricos y magnéticos. Aquí, la muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Argón (Ar). Los iones una vez tomados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados.

Los resultados obtenidos de los metales encontrados en las muestras fueron tan pequeños que no se tomaron en cuenta en el desarrollo del estudio.

(Ver Anexos V, análisis 2)

VII.6 Cálculos para la determinación de capacidad de la cisterna

Para la correcta determinación de la capacidad de la cisterna que alimentará la columna de adsorción a utilizar en este modelo, se deben calcular los caudales de las diferentes áreas de interés y posteriormente el volumen de escorrentía.

La fórmula que se utilizó para calcular el caudal en este tipo de sistemas fue el siguiente:

$$Q = C * I * A$$

Donde:

Q= Caudal

C= Coeficiente de escorrentía

I= Intensidad de la precipitación

A= Superficie de la zona afectada

Posteriormente, se hizo una sumatoria de los caudales obtenidos en cada zona y luego con el caudal total se pudo calcular el volumen de escorrentías.

A continuación, se calculó el caudal necesario para vaciar la cisterna en un tiempo de 24 horas para un modelo a gran escala. Con el caudal experimental, de acuerdo al volumen de la columna y el caudal de bombeo, se determinó el caudal necesario de 1 día para llenar la cisterna, teniendo un tanque con una capacidad de 55 galones. Por ultimo de acuerdo al caudal obtenido, se determinó el tiempo de uso en el que la cisterna va a almacenar agua.

VII.7 Diseño de columna de adsorción.

Para poder realizar el diseño de la columna a gran escala se realizó el siguiente procedimiento:

- 1) Se calculó el volumen del lecho dividiendo el caudal de diseño entre el caudal de bombeo y luego por 24 h.
- 2) Se calculó el tiempo de contacto que duraría el carbón activado mezclándose con el agua. Esto se realizó dividiendo el volumen del lecho entre el caudal de diseño.
- 3) Se determinó la cantidad de masa necesaria para llenar la columna. Esto se hizo dividiendo el volumen de lecho por la densidad del carbón.
- 4) Se calculó el volumen de agua tratado por unidad de adsorbente. Este valor fue obtenido de acuerdo a las pruebas de las columnas.

- 5) Se determinó la cantidad de carbono utilizado o adsorbido por día, dividiendo el caudal de diseño entre el volumen de agua tratado por unidad de adsorbente.
- 6) Se estimó la cantidad de tanques que se necesitan para contener la cantidad de carbón que se requiere para la adsorción.
- 7) Se calculó el tiempo en el que el carbón necesita ser lavado dividiendo la masa de carbón para la columna entre la cantidad de carbón utilizado por día.
- 8) Se estableció el volumen de agua tratada multiplicando el caudal de diseño obtenido por el tiempo en que el carbón necesita ser lavado.
- 9) Se buscó el agua de lavado utilizando el valor de lecho móvil (ver anexos 1; tabla 6), y multiplicándolo por el área del tanque.
- 10) Se calculó la cantidad de agua de lavado requerida a un tiempo de 1 hora.

VII.8 Calculo de factibilidad de proyecto a gran escala.

El último paso en el desarrollo de este estudio fue el análisis de costos que representa el montaje de este sistema en la universidad. Este análisis fue realizado con el diseño de la columna de adsorción. Según estos cálculos, se requiere de dos tanques con carbón activado para la óptima adsorción, por lo que se diseñó un modelo de lecho fijo en paralelo.

De acuerdo a los materiales necesarios para la puesta en marcha del diseño de las columnas, se elaboró un presupuesto en el que se observó el costo total de montaje del sistema.

RESULTADOS

CAPITULO VIII RESULTADOS

VIII.1 Marcha Analítica

Luego de realizada la marcha analítica en el agua tomada de cada una de las cunetas de la UNPHU, se encontraron los siguientes resultados:

Edificio de Odontología / Veterinaria

- Grupo 2A: Mercurio y Cadmio.
- Grupo 3A: Hierro y Cromo.
- Grupo 3B: Zinc.

Edificio 2 / Arquitectura / Play de Baseball

- Grupo 1A; Mercurio.
- Grupo 2A: Mercurio.
- Grupo 3A: Hierro y Cromo.
- Grupo 3B: Zinc.

Edificio 4 (lado Este)

- Grupo 1A: Mercurio.
- Grupo 2A: Mercurio y Cadmio.
- Grupo 3A: Hierro.

Parqueo Biblioteca / Edificio 5

- Grupo 1A: Mercurio.
- Grupo 2A: Mercurio, Cobre y Plomo.
- Grupo 3A: Hierro.

Edificio 8 / Parqueo / Zona verde

- Grupo 2A: Plomo.
- Grupo 3A: Hierro.
- Grupo 3B: Zinc.

Caño de Agua. Edificio 5

- Grupo 2A: Mercurio.
- Grupo 3A: Hierro.
- Grupo 3B: Zinc.

(Ver Anexo IV, Mapa 2)

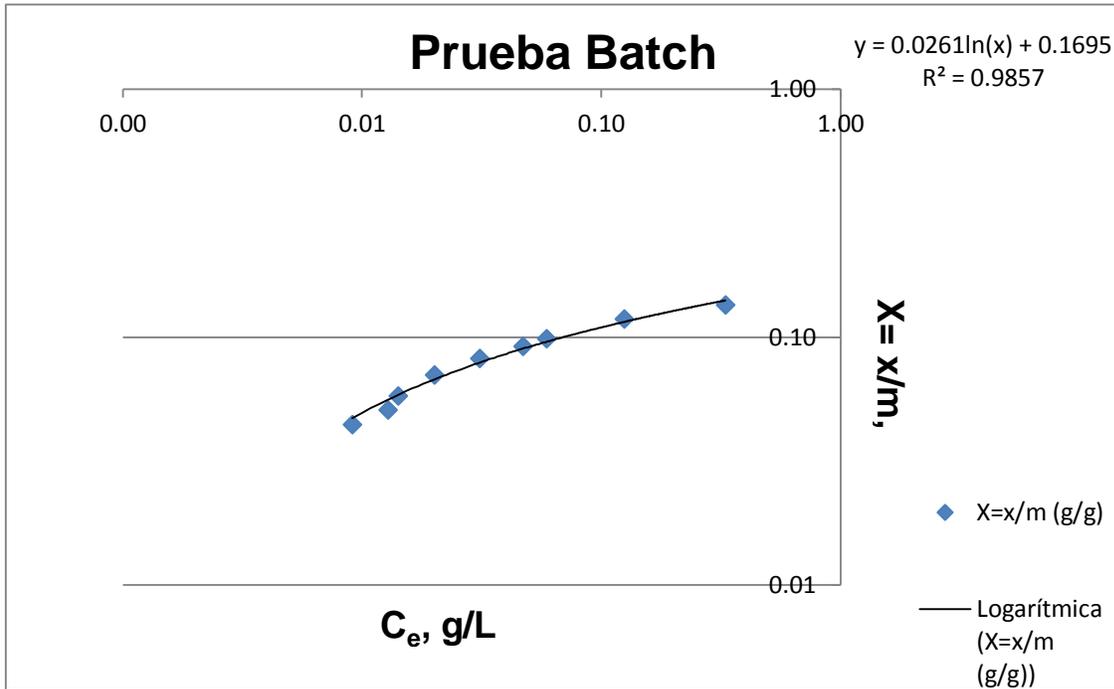
VIII.2 Cálculos de pruebas Batch

Los cálculos desarrollados fueron los siguientes:

Datos de Prueba Batch				
m (g/L)	C _o (g/L)	C _e (g/L)	▲ C, x (g/L)	X=x/m (g/g)
0.52	0.40	0.33	0.07	0.13
2.32	0.40	0.13	0.28	0.12
3.46	0.40	0.06	0.34	0.10
3.84	0.40	0.05	0.35	0.09
4.50	0.40	0.03	0.37	0.08
5.40	0.40	0.02	0.38	0.07
6.67	0.40	0.01	0.39	0.06
7.60	0.40	0.01	0.39	0.05
8.82	0.40	0.01	0.39	0.04

Fuente: Rivera, L., Guzmán, J. Valores obtenidos de pruebas Batch.

Se pueden observar los datos de las pruebas Batch en la tabla anterior. Según esta tabla fue realizada la gráfica de la concentración de la solución después de la adsorción contra el DQO adsorbido por masa de carbón.



La pendiente encontrada es de 0.25, por lo tanto $n = 1/\text{pendiente} = 1/0.25 = 4.02$.

Tomando los logaritmos en ambos lados de la ecuación de Freundlich obtenemos:

$$\log X = \log K + 1/n \log C_e$$

Cuando:

$$C_e = 1.0, X = K$$

$$X = 1.06 C_e^{1/4.02}$$

Por lo tanto, y según la constante de la ecuación de la recta,

$$K = 1.06$$

$$X = 1.06C_e^{1/4.02}$$

VIII.3 Experimentos de columnas para determinar Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los resultados encontrados de dco para cada uno de los puntos donde se recolecto agua antes de ser pasada por la columna fueron los siguientes:

Zonas	DQO (mg/l)
Odontología/Veterinaria	479
Edificio 2/Arquitectura/Play	73
Edificio 4 (lado este)	120
Edificio 4/Biblioteca/Edificio5	411
Edificio 8-Parqueo y Zona Verde	75
Caño de Edificio 5	89

FUENTE: Rivera, L., Guzmán, J. Demanda Química de Oxígeno encontrada en diferentes zonas de la UNPHU

Con los datos obtenidos de las concentraciones de cada una de las zonas por individual, pudimos determinar el DQO inicial de toda el agua junta antes de ser pasada por la columna. Al tomar 500 ml de cada una de las muestras recolectadas y verterlas en un vaso de precipitado de 3 L, los cálculos se realizaron de la siguiente manera:

1) $479 \text{ ppm} \times (500/1000) = 240 \text{ ppm}$

2) $73 \text{ ppm} \times (500/1000) = 36.5 \text{ ppm}$

3) $120 \text{ ppm} \times (500/1000) = 60.0 \text{ ppm}$

4) $411 \text{ ppm} \times (500/1000) = 206 \text{ ppm}$

$$5) 75 \text{ ppm} \times (500/1000) = 37.5 \text{ ppm}$$

$$6) 89 \text{ ppm} \times (500/1000) = 44.5 \text{ ppm}$$

$$240 \text{ ppm} + 36.5 \text{ ppm} + 60.0 \text{ ppm} + 206 \text{ ppm} + 37.5 \text{ ppm} + 44.5 \text{ ppm} = 625 \text{ ppm}$$

$$625 \text{ ppm} / 3 \text{ litros} =$$

$$208 \text{ ppm}$$

Esta fue la concentración inicial de toda la muestra junta antes de ser pasada por la columna. Posteriormente, se determinó el caudal experimental de la siguiente manera:

Datos:

Volumen de columna = 50 ml

$Q_b = 2 \text{ BV/h}$ (volumen de bombeo; valor asumido de libro Unit operations and processes in environmental engineering)

$$Q_{\text{exp}} = (2) (50) / 60 \text{ min}$$

$$Q_{\text{exp}} = 1.7 \text{ ml/min}$$

Entonces:

A un caudal de 1.7 ml;

$$\begin{array}{l} 208 \text{ mg} \text{-----} 1000 \text{ ml} \\ x \text{-----} 1.7 \text{ ml/min} \end{array}$$

$$X = 0.35 \text{ mg/min}$$

De acuerdo al índice de yodo que posee el carbón activado

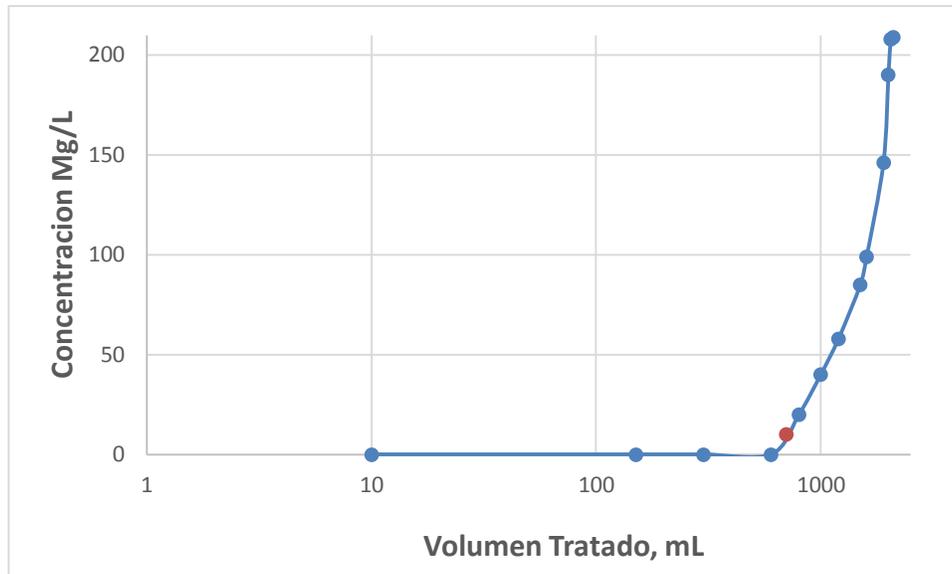
$$1046 \text{ mg} \text{-----} 100 \text{ g de carbón}$$

0.35 mg/min ----- x

$$X = 0.03 \text{ g de carbón absorbidos/min}$$

Luego, se determinó a diferentes volúmenes la cantidad de DQO que poseía el agua al ser pasada por la columna, con el caudal establecido:

Volumen en ml	Concentración DQO
10	0
150	0
300	0
600	0
800	20
1000	40
1200	58
1500	85
1600	99
1900	146
2000	190
2050	208
2100	209



FUENTE: Rivera, L., Guzmán, J. Demanda Química de Oxígeno a diferentes volúmenes de agua tratada.

Tal como se observa en el punto rojo, se puede observar que a un volumen de 700 ml empieza el consumo de carbono el cual es de 10 ppm.

Por último, con este dato se pudo calcular la cantidad de agua tratada por unidad de Adsorbente, diciendo:

$$V_b = (700)/(15) = 47 \text{ ml/g}$$

VIII.4 Cálculos de capacidad de cisterna

A continuación se desarrollan los cálculos y resultados obtenidos para la capacidad de cisterna.

Caudales

Punto 1

Edificio 11

Datos:

$$A = 5041\text{m}^2$$

$$C = 0.5$$

$$I: 3.1 \text{ pulg/h}\times\text{m}^2 (0.0787 \text{ m/h})$$

$$Q_1 = (0.5)(0.0787)(5041)$$

$$Q_1 = 198 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 2

Edificios 1 y 2

Datos:

$$A=6749\text{m}^2$$

$$C=0.5$$

$$I: 3.1 \text{ pulg/h}\times\text{m}^2 (0.0787 \text{ m/h})$$

$$Q_2 = (0.5)(0.0787)(6749)$$

$$Q_2 = 266 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 3

Edificio 4

Datos:

$$A=5377\text{m}^2$$

C=0.55

I: 3.1 pulg/hxm2 (0.0787 m/h)

$$Q_3 = (0.55)(0.0787)(5377)$$

$$Q_3 = 233 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 4

Edificios 3 y 5

Datos:

A=3436m²

C=0.55

I: 3.1 pulg/hxm2 (0.0787 m/h)

$$Q_4 = (0.55)(0.0787)(3436)$$

$$Q_4 = 149 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 5

Edificio 8

Datos:

A=1787m²

C=0.5

I: 3.1 pulg/hxm2 (0.0787 m/h)

$$Q_5 = (0.5)(0.0787)(1787)$$

$$Q_5 = 70.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 6

Edificio 5

Datos:

A=1182m²

C=0.85

I: 3.1 pulg/h×m² (0.0787 m/h)

$$Q_6 = (0.85)(0.0787)(1182)$$

$$Q_6 = 79.1 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$Q_T = 198 + 266 + 233 + 149 + 70.3 + 79.1 =$$

$$Q_T = 995 \text{ m}^3/\text{h}$$

Volumen de escorrentías

$$V = Q \times T$$

$$V = (995)(0.5)$$

$$V = 498 \text{ m}^3$$

Sabiendo que:

Volumen de escorrentías = Volumen de cisterna

Tendremos:

$$V_{\text{cisterna}}: 498 \text{ m}^3$$

VIII.5 Caudal necesario para vaciar la cisterna en 24 horas

Teniendo en cuenta lo siguientes datos se pudo determinar el caudal de diseño a gran escala:

Datos:

Diámetro exterior de tanque = 560 mm = 0.56 m

Carga a columna = 60 m³/ d * m² (ver anexo 1; tabla 6)

$Q_b = 2 \text{ Bv/h}$

Para el caudal de Diseño;

Area de tanque = $\text{PI} * (0.56)^2 / 4 = 0.25 \text{ m}^2$

$$Q = (0.25) (60) = 15 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Este es el caudal necesario para vaciar la cisterna en un tiempo de 24 horas.

De acuerdo a estos datos el tiempo de uso de la cisterna es de:

$$T = V_{\text{cisterna}} / Q =$$

$$T = 498 / 15 =$$

$$33.7 \text{ d}$$

VIII.6 Cálculos para diseño de Columna

El desarrollo fue el siguiente:

Volumen de lecho = $15/2/24 = 0.32 \text{ m}^3$.

Tiempo de contacto = $(0.32)/(15) = 0.02 \text{ d} = 30 \text{ min}$.

De acuerdo con la densidad del carbón = $25 \text{ lbs/ft}^3 = 400 \text{ kg/m}^3$, tenemos que la masa de carbón es igual a:

$$M = (0.32)(400) =$$

$$M = 120 \text{ kg}$$

Carbón se necesita para la columna.

Ahora bien, el volumen de agua tratado por unidad de adsorbente es de 47 ml/g. Este valor se obtuvo de las pruebas con la columna, que convirtiéndolo es de $0.047 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Posteriormente, calculando la cantidad de carbón adsorbido por día tenemos:

$$\text{Carbono/día} = (15)/(0.047) = 319 \text{ kg/día}$$

Una vez se tiene la cantidad de carbono que se adsorbe al día, se ha de conocer la cantidad de tanques necesarios para contener el carbón, esto se hace dividiendo el volumen del lecho entre el volumen del tanque

Volumen de lecho: 0.32

Volumen de tanque: $(\text{Área de tanque})(\text{Altura de tanque})$

$$V_{\text{tanque}}: (0.25)(0.94) =$$

$$V_{\text{tanque}} = 0.23 \text{ m}^3$$

Por lo que:

Cantidad de tanques necesarios:

$$0.32/0.23 = 1.39 \approx 2 \text{ Tanques}$$

Luego, se calculó cada cuanto tiempo el carbón necesita ser lavado, redondeado a su máxima expresión se estimó que:

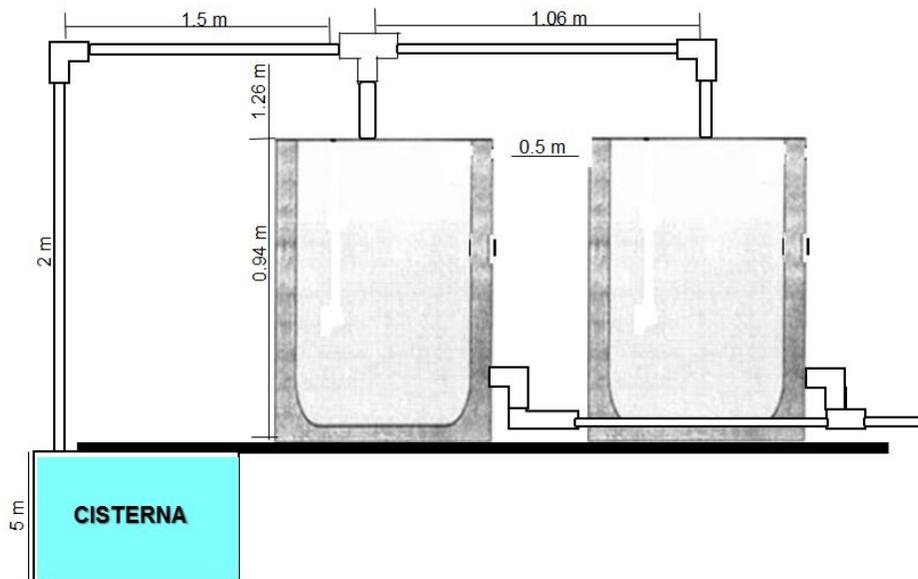
$$\text{Tiempo de ruptura} = (120)/(319) = 1 \text{ d.}$$

$$\text{El volumen de agua tratada} = (1)(15) = 15 \text{ m}^3.$$

$$\text{El agua de lavado} = (0.25)(600) = 150 \text{ m}^3/\text{d.}$$

Por último, se calculó de acuerdo a un tiempo de lavado 60 min la cantidad de lavado requerida, esta fue $= (150)(60) / 24 / 60 = 6.25 \text{ m}^3$

El diseño de la columna pensado y elaborado en este trabajo pretende tener la siguiente forma:



VIII.7 Análisis de Costos

MATERIALES	PRECIOS POR UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
TUBERIAS PVC			
Tuberías PVC para entrada al sistema (3.05m)	195.00 Pesos	7.00 m	447.54 Pesos
		2.56 m	163.67 Pesos
		1.34 m	195.00 Pesos
		2.12 m	135.54 Pesos
Tuberías PVC para salida del sistema (3.05m)	195.00 Pesos	2.12 m	413.40 Pesos
UNIONES			
Codos	39.75 Pesos	1.00 codos	39.75 Pesos
T	44.72 Pesos	2.00 codos	89.44 Pesos
Codo Bajante	52.00 Pesos	4.00 codos	208.00 Pesos
Carbón activado (12.5 Kg)	2389.50 Pesos	120.00 Kg	22939.2 Pesos
Tanques (55 Gal)	900.00 Pesos	2.00 Tanques	1800.00 Pesos
Bomba (1/2 HP)	12785 Pesos	1.00 Bomba	12785.00 Pesos
Consumo eléctrico de la bomba	92.46 Pesos	7.50 KWH/mes	Pesos 693.45 /mes
			39909.99 Pesos

En la tabla anterior, se puede observar que el monto total de la instalación de las torres de adsorción de carbón activado es de 56158.56 pesos. Fueron tomados en cuenta cada una de las partes que componen el diseño del sistema y el consumo eléctrico mensual que puede generar el mismo.

TERCERA PARTE

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO IX CONCLUSIONES

IX.1 Parte Experimental

El diseño de una columna de adsorción de carbón activado como filtro para las aguas de escorrentía de la UNPHU y su posterior utilización en el riego de las zonas verdes de la universidad, llevó al desarrollo de diversos experimentos, análisis y cálculos en los que se pudo observar la factibilidad de su aplicación en el centro estudiantil.

La concentración de entrada de DQO a la columna fue de 208 ppm, y la concentración de los metales fue tan baja que no es considerada relevante para los fines de este estudio. Una vez se obtuvo la concentración inicial, se realizaron diversos experimentos para conocer el caudal necesario para una óptima adsorción, este caudal fue de 1.7 ml/min, con el cual se pudo apreciar que la columna en los primeros 10 ml de solución nos arroja una concentración de 0 ppm, concentración que continua constante hasta un volumen de 600 ml, a partir de este volumen, la concentración empieza a aumentar paulatinamente hasta llegar a los 208 ppm, concentración inicial, en un volumen alrededor de 2050 ml.

IX.2 Diseño de la columna

A partir de los datos obtenidos en la parte experimental, se pudo realizar el diseño de la columna a gran escala para su aplicación en la universidad. Durante el proceso de diseño se observó que el volumen de la recámara a utilizar es de 0.3m^3 pero el volumen del tanque es de 0.23m^3 , por lo que se estimó la necesidad de un segundo tanque con carbón activado para una completa adsorción. El diseño realizado consta de dos columnas conectadas en paralelo, el carbón

activado necesario para la adsorción, una bomba sumergible y las diferentes tuberías de entrada y salida del agua.

Se calculó que el volumen de agua tratada por unidad de adsorbente es de $0.047 \text{ m}^3/\text{kg}$ por lo que se necesitará un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{d}$ para tratar 15 m^3 de agua con una masa de carbón de 123 kg divididos entre las dos columnas. El tiempo de ruptura de la columna es de un día, por lo que se deberá lavar el carbón activado para asegurar su óptimo funcionamiento. Este lavado ha de realizarse a contracorriente y por expansión.

Según lo dicho anteriormente y de acuerdo a la evaluación de costos de montaje del sistema, se puede decir que el sistema es rentable y factible, ya que se aprovecharía el agua de lluvia, el consumo energético sería solo el provocado por el uso de la bomba sumergible, que sería mínimo, y solo se necesitaría de una persona que pusiera a funcionar el sistema. El total de costos necesarios para el montaje del sistema será de 56158.59 pesos.

Se cumplieron los siguientes objetivos:

- Se analizó el agua de escorrentía de la UNPHU en busca de metales pesados y demás contaminantes.
- Se realizaron diversos experimentos a pequeña escala para poder obtener los parámetros de diseño del sistema.
- Se diseñó una columna de adsorción de lecho fijo en paralelo que sirve como filtro de aguas de escorrentías para su uso en el riego de las zonas verdes de la UNPHU.
- Se realizó un estudio de factibilidad donde se demuestra la rentabilidad del proceso.
- Se mantuvo la filosofía de 'Pienso en Verde' propia de la UNPHU, en todo el proceso.

IX.3 Recomendaciones

1. Limpieza del carbón activado por retro lavado con 6 m³ de agua destilada o de osmosis durante 60 minutos. Esto debe realizarse de manera que se expanda el lecho.
2. Cambio del carbón activado después de 6 a 12 meses de haber sido utilizado, dependiendo del uso que se le dé y la cantidad de agua pasada por él.
3. Adición una columna de arena que sirva como un filtro más dentro del sistema, asegurando así una más amplia sanitación.
4. Adición de un ablandador, en caso de que se observe la presencia de agua muy dura.

CUARTA PARTE
REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas

Libros especializados

American Water Works Association.(1999). *Water Quality And Treatment. A Handbook of Community Water Supplies.*(Fifth Edition);Denver,Colorado: McGraw-Hill

Mackenzie,L.D.(2010).*Water and Wastewater Engineering.*(Professional Edition);New York, USA: McGraw-Hill.

Mc Cabe, W.L., Julian C., Smith y Harriot, P. (2003).*Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* México: McGraw Hill.

Reynolds, T.D., Richards, P.A.(1995).*Unit Operations And Processes In Enviromental Engineering.*(Second Edition);Texas, USA: Cengage Learning.

Vogel, A. (1952) *Química Analítica Cualitativa* (Segunda Edición); Londres, Inglaterra: Longmans.

Artículos académicos en línea

Aguas Negras (s.f.).Consultado el Junio 15, 2015. Recuperado de:
<http://www.definicionabc.com/medio-ambiente/aguas-negras.php>

Aguas Pluviales (s.f.).Consultado el Junio 15, 2015. Recuperado de:
http://www.cbs.grundfos.com/BGE_Spain/lexica/WW_Stormwater.html#-

Armenante, P.M.(2008).*Adsorption with Granular Activated Carbon. New Jersey Institute of Technology.* Recuperado de:
<http://cpe.njit.edu/dlnotes/CHE685/CIs12-1.pdf>

Azagra, A.M. (2006). *Método de los coeficientes de escorrentías*. Recuperado de:
<http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>

San Román, Sánchez, J.F.(2012). *Hidrología Superficial: Relación Precipitación-Escorrentía*; Universidad de Salamanca, Departamento de Geología, España. Recuperado de: http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_3.pdf

Congresos

Ballen, J.A., Galarza, M.A., Ortiz, R.O. (2006) *Historia De Los Sistemas De Aprovechamiento De Aguas*. [Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa,Brasil, 5-7 de Junio]
Recuperado de:
<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>

Periódico en línea

Matos, S.(17 de Octubre 2010). Aprovechando el agua de lluvia. *Listin Diario*.
Recuperado de: <http://www.listindiario.com/la-republica/2010/10/16/162852/Aprovechando-el-agua-lluvia>

Otras fuentes de internet

Escorrentia (2013) Recuperado de:
http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%205.pdf

Garduño, M.A. (coordinador)(Septiembre 2009). *Antecedentes de la captación del agua de lluvia*. Recuperado de:

<http://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/investigacion-y-tecnologia-en-salud/inventarios/inventario-tecn-de-agua-de-consumo-humano/captacion-de-agua-para-consumo-humano/captando-agua-de-la-lluvia/presentacion-power-point/1852-antecedentes-de-la-captacion-del-agua-de-lluvia/file>

Programa de manejo de aguas de escorrentía. Universidad de Puerto Rico.
Recuperado de: <http://www.uprm.edu/manejodeaguas/>

QUINTA PARTE
ANEXOS

ANEXO I

TABLAS

TABLA. 1. Valores del coeficiente C de la escorrentía.

C	Superficie colectora
0.85	Tejado duro inclinado
0.60	Tejado plano con gravilla
0.80	Tejado plano sin gravilla
0.65	Superficie empedrada
0.85	Revestimiento asfáltico
0.70	Concreto
0.55	Pavimento
0.40	Tejado verde
0.85	Geomembrana de PVC
0.85	Azulejos, teja de barro
0.80	Tejas acanaladas (metálicas)
0.65	Techos de paja o guano
0.15	Suelo con pendientes menores al 10%
0.35	Superficies naturales rocosas

FUENTE: La tabla presentada fue extraída de un estudio de Aprovechamiento de la lluvia para el riego (<http://galeon.com/elregante2/lluvia.html>)

Tabla. 2. Sustancias adsorbidas por Carbón Activado Granulado

Sustancias no polares (no solubles en agua)	Adsorción de sustancias halogenadas	Características físicas del adsorbato
Aceite mineral	I	Olor
BTEX	BR	Sabor
Poli hidrocarburos aromáticos	Cl	Levaduras
(Cloruro) Fenol	F	Productos de fermentación

FUENTE: Rivera, L., Guzman, J. Sustancias adsorbidas por el GAC

Tabla. 3. Comparación de los diferentes lechos de adsorción.

Parámetros	Lecho Fijo de Adsorción	Lecho Expandido de adsorción	Lecho Móvil	Lecho Fluidizado
Uso	Es el más común.	Se utiliza en casos de fluidos con partículas suspendidas.	Especialmente utilizado en birreactores	Muy utilizado en cracking de petróleo
Carbón y Columna	Requieren sistema de regeneración de carbono o desecho de carbono gastado.	No requiere que la columna actúe como filtro.	Carbón activado fresco es alimentado por la parte superior de la columna y el gastado es retirado por la parte inferior. Siempre de manera opuesta a la dirección del flujo.	El lecho de carbón se levanta a la entrada del fluido debido a la velocidad de entrada del mismo y se empieza a realizar en él la adsorción.
Tipo de Flujo	Flujo ascendente o descendente.	Reactores de flujo ascendente.	Flujo ascendente.	Flujo ascendente
Organización de las columnas	Columnas en serie o en paralelo.	Columnas en serie	N/A	N/A

FUENTE: Rivera, L., Guzman, J. Comparación de los diferentes lechos de adsorción

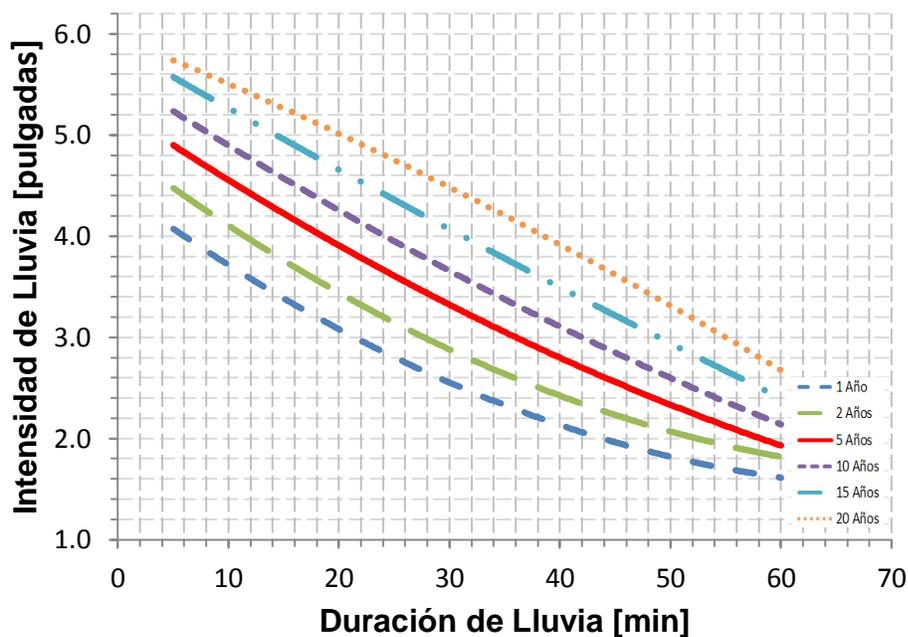
Tabla. 4. Medidas de interés de los diferentes puntos de muestreo

	Edificio	Área (Metros cuadrados)	Perímetro- Longitud (Metros)	Centro/Punto Medio (Grados)
1	Edificio 11	5,041	367	18.4831447°,- 069.9489960°
2	Edificios 1 y 2	6,749	343	18.4843460°,- 069.9480757°
3	Edificio 4 (Bambúes)	5,377	315	18.4863224°,- 069.9477638°
4	Edificios 3 y 5	,436	254	18.4860946°,- 069.9487744°
5	Edificio 8	1,787	172	18.4869963°,- 069.9487843°
6	Edificio 5 (Techo)	1,182	138	18.4865727°,- 069.9483295°

FUENTE: Rivera, L., Guzman, J. Medidas de interés de los diferentes puntos de muestreo

Tabla. 5. Curva de Intensidad-Frecuencia-Duración de Lluvias

Duración [min]	Intensidad [inch/h m ²]					
	Año 1	Año 2	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20
5	4.1	4.5	5.0	5.4	5.8	6.0
10	3.7	4.1	4.5	4.9	5.2	5.4
15	3.3	3.7	4.1	4.4	4.8	5.0
20	3.1	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6
30	2.6	2.9	4	4.4	5.0	5.6
35			2.8	3.1	3.5	3.9
40	2.2	2.4	2.7	3.0	3.4	3.8
45			2.5	2.8	3.1	3.5
50	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2
55			2.1	2.3	2.6	2.9
60	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8



FUENTE: Plan Maestro de Alcantarillado Sanitario y Pluvial, Hydrotechnic Corporation (1969)

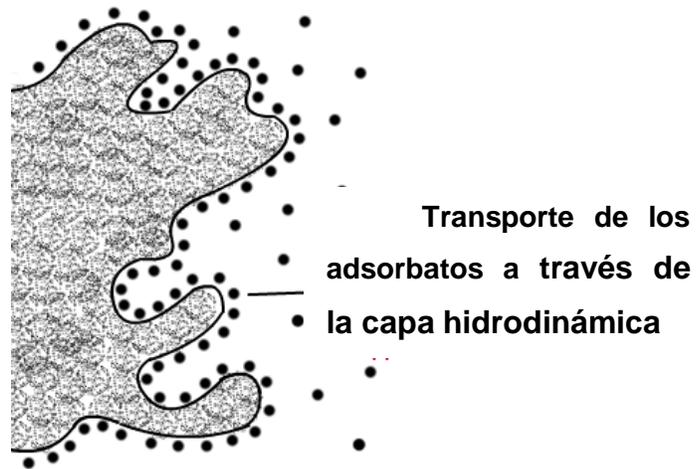
Tabla 6. Rangos típicos de diseño para columnas de GAC en el tratamiento de agua

Parametros	Valores	Comentarios
Tamaño de carbono	8 x30	Flujo descendente de lecho movil
		y ascendente en lecho empacado
	12 x 40	Flujo ascendente en lecho expandido
Velocidad de carga hidraulica		
columna sola	60 a 230 m ³ /d * m ²	
columna en paralelo	60 a 230 m ³ /d * m ²	
columna en serie	175 a 400 m ³ /d * m ²	
lecho movil	290 a 600 m ³ /d * m ²	
tiempo de contacto con volumen de carbono	10 a 60 min	Hay un retorno decreciente en el tiempo hasta el agotamiento y la velocidad de uso de carbono en el tiempo de contacto es mayor de 30 min. Pruebas pilotos son esenciales.
Velocidad de uso de carbono	20 a 100 kg/1000 m ³	Bajas velocidades son asociadas con largos tiempos de contactos.
Atura de la columna	1 a 5 m	Prefabricada seran dimensionadas para caber en recamaras planas
Diametro	< 3.6 m	Restricciones a 3.6 m para el transporte de unidades prefabricadas
Altura: Diametro	> 1:1	Sin no hay redistribucion de liquidos usar > 4:1 para distribucion apropiada de liquido
Caida de presion	0.2 a 8 kPa/m de carbono	
	600 a 1200 m ³ /d * m ²	
Expansion del lavado de retorno	10 a 50%	

FUENTE: La tabla anterior fue extraída del libro Water and Wastewater engineering: Design Principles and Practice.

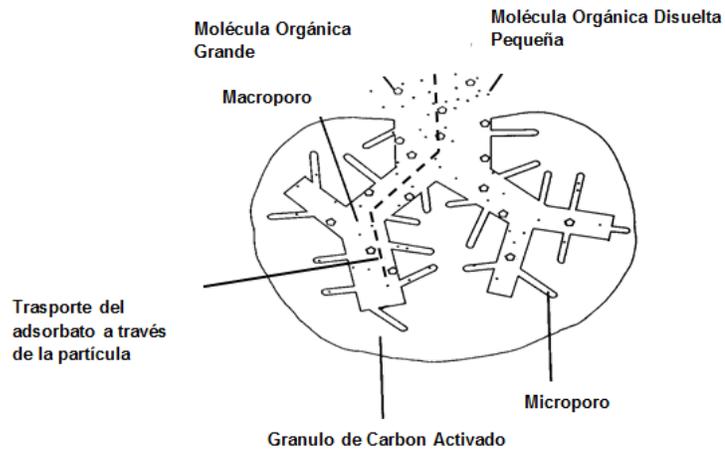
ANEXO II
FIGURAS

Fig. 1. Transporte de adsorbatos a capa estacionaria de agua



FUENTE: chemistry.tutorvista.com/analytical-chemistry/chromotography.html

Fig. 2. Transporte de los adsorbatos a los poros del carbón activado.



FUENTE: Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Kentucky: 'Water Quality in Kentucky: Using Activated Carbon Filters to Treat Home Drinking Water' (www2.ca.uky.edu/agc/pubs/ip/ip6/ip6.htm)

Fig. 3. Reactores de lecho fijo y expandido

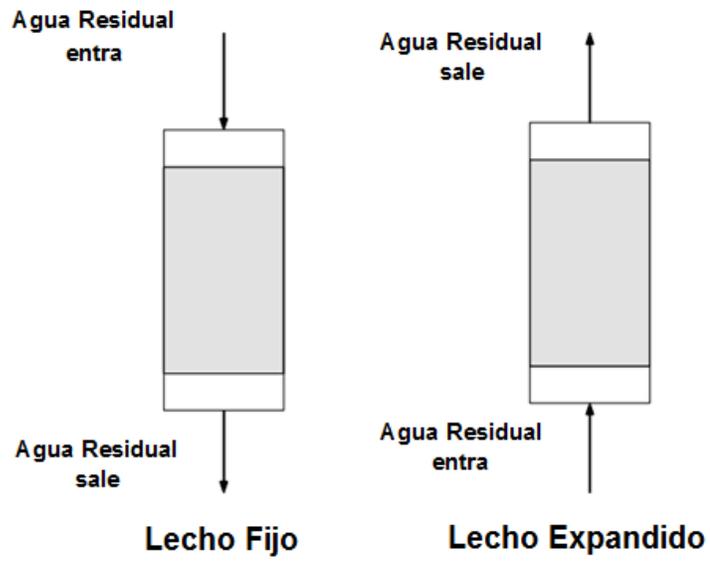


Fig. 4. Reactores de flujo descendente de lecho fijo en serie

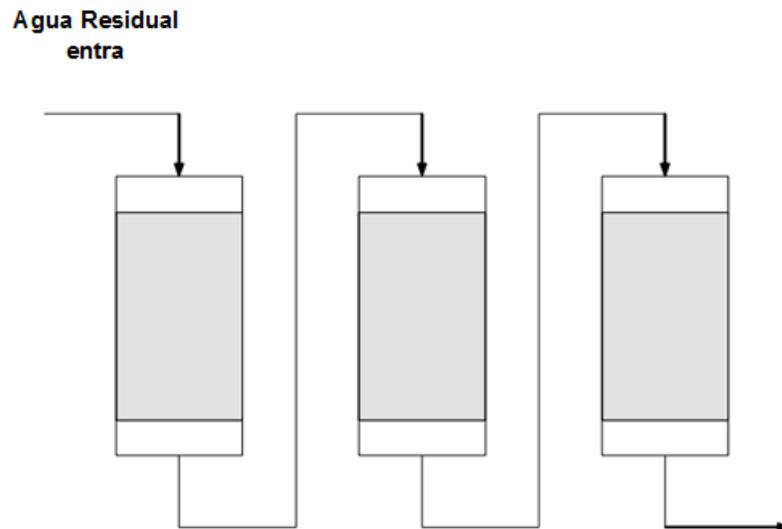


Fig. 5. Rectores de flujo descendente de lecho fijo en paralelo

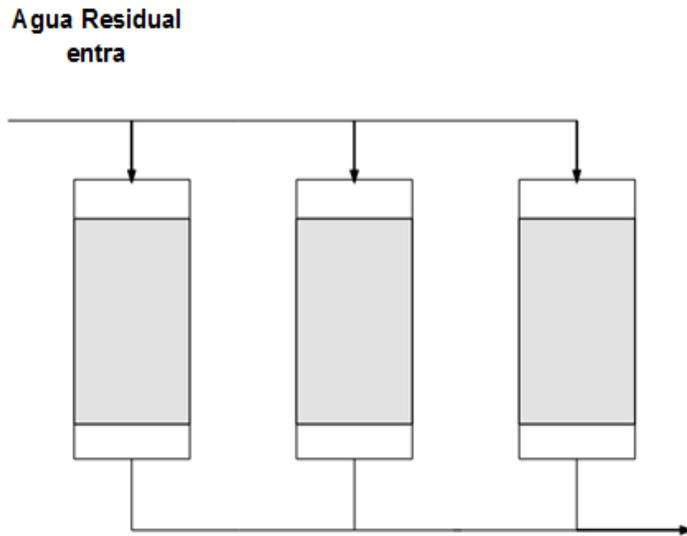


Fig. 6. Reactores de flujo ascendente de lecho fijo en serie

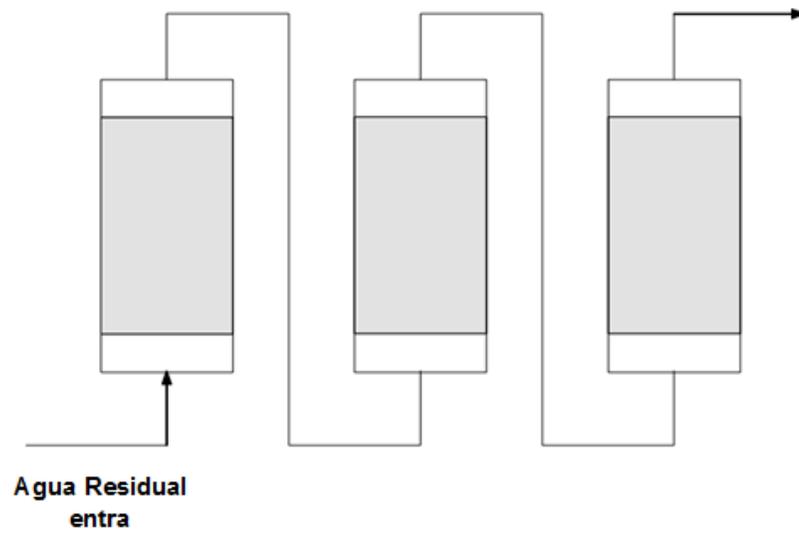


Fig. 7. Adsorción en lecho móvil.

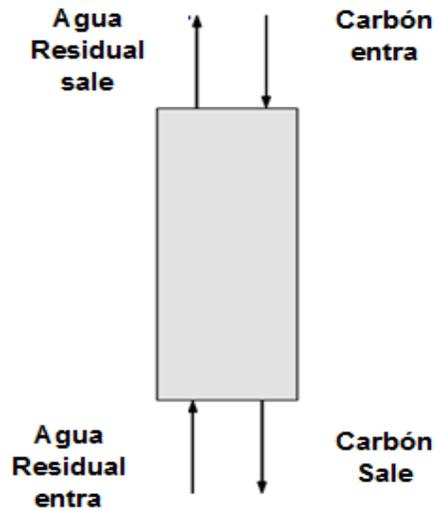
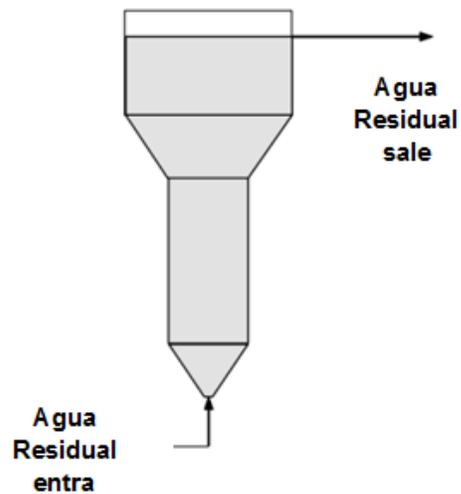
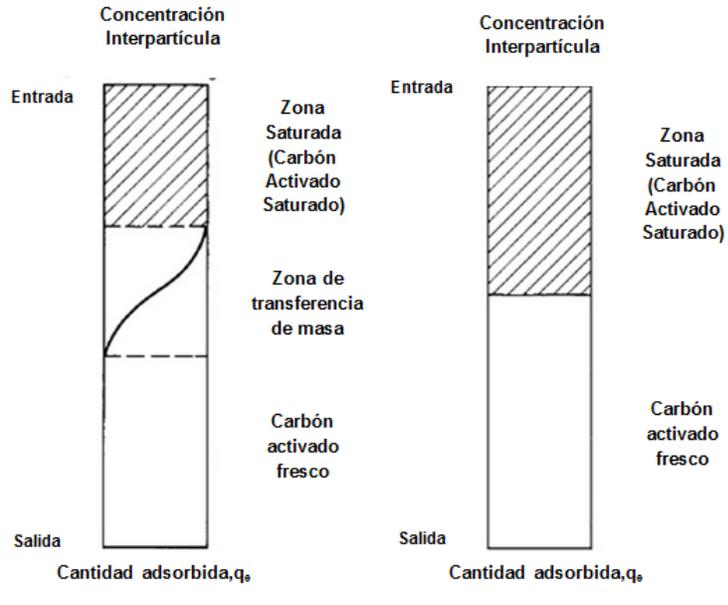


Fig.8. Adsorción de lecho fluidizado



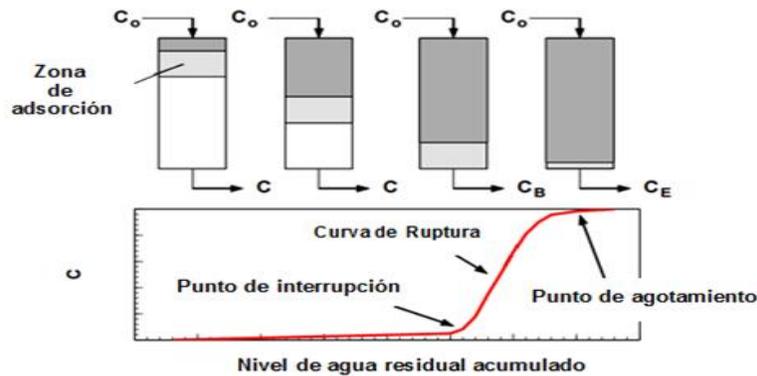
FUENTE: Las figuras anteriores fueron extraídas de Piero M. Armenante, Adsorption with GAC

Fig. 9. Zonas de la columna de adsorción



FUENTE: La figura anterior fue extraída de Water Quality and Treatment handbook of community water supplies

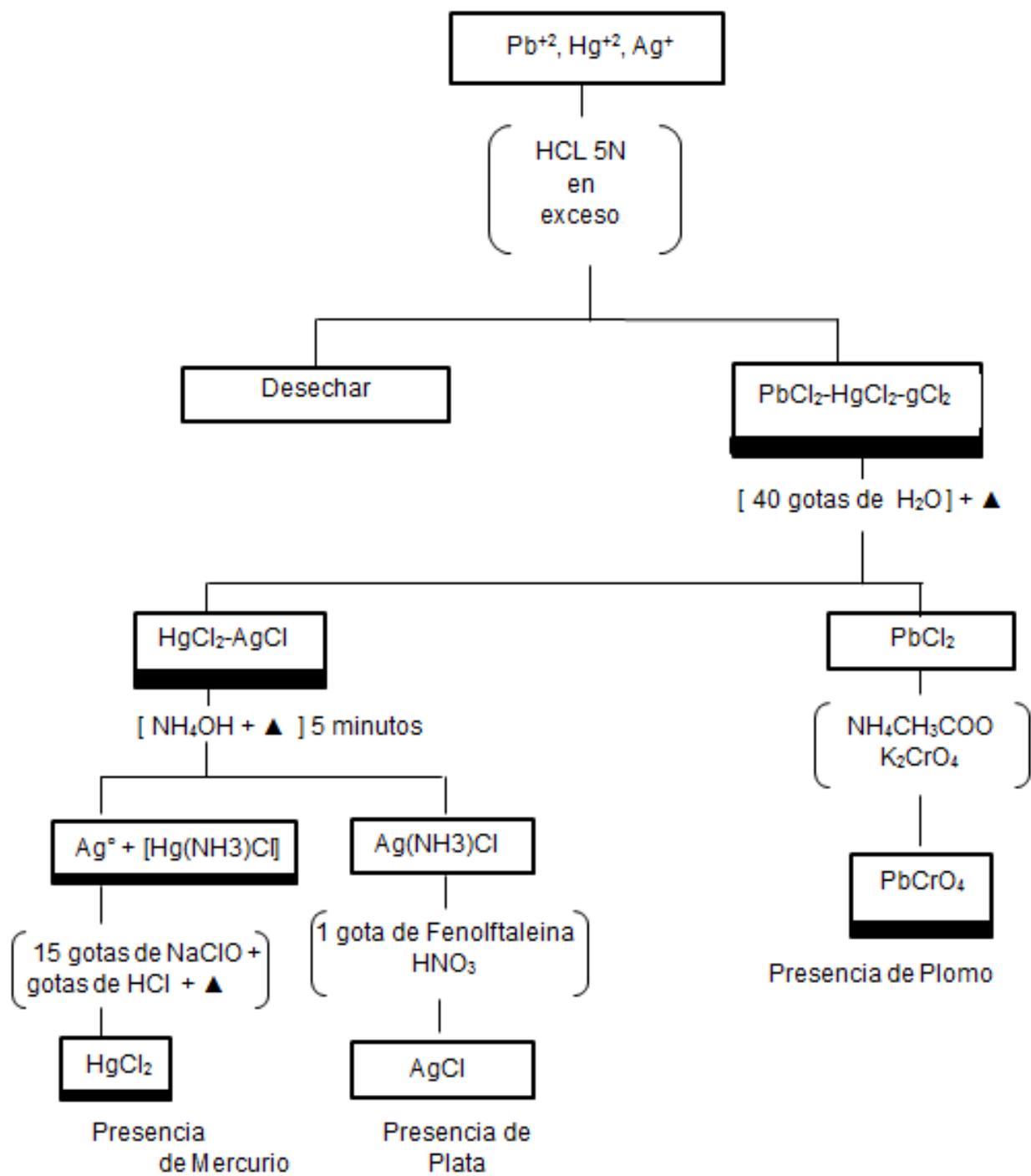
Fig.10. Proceso de saturación de la columna



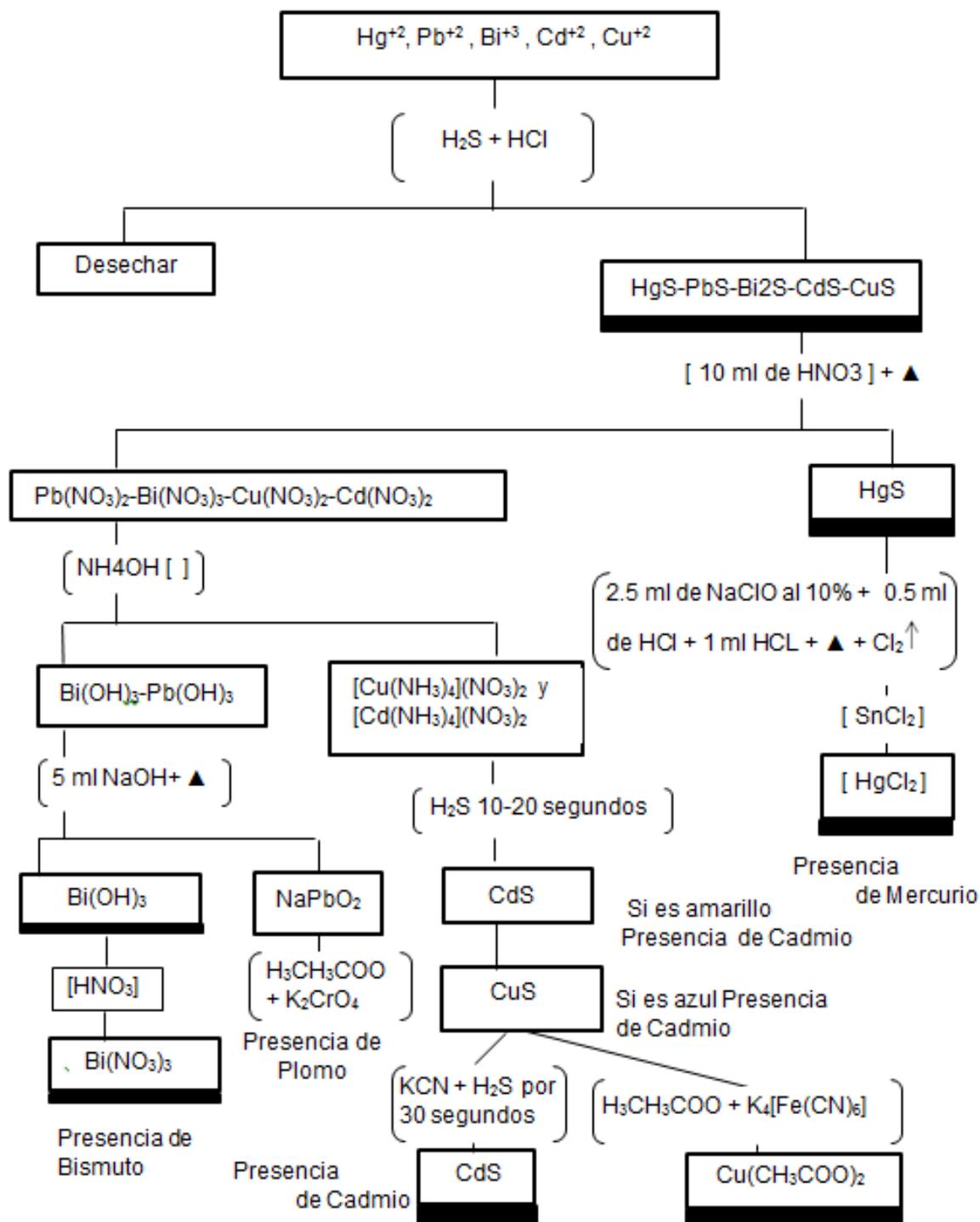
FUENTE: Las figura anterior fue extraída de Piero M. Armenante, Adsorption with GAC

ANEXOS III
DIAGRAMAS

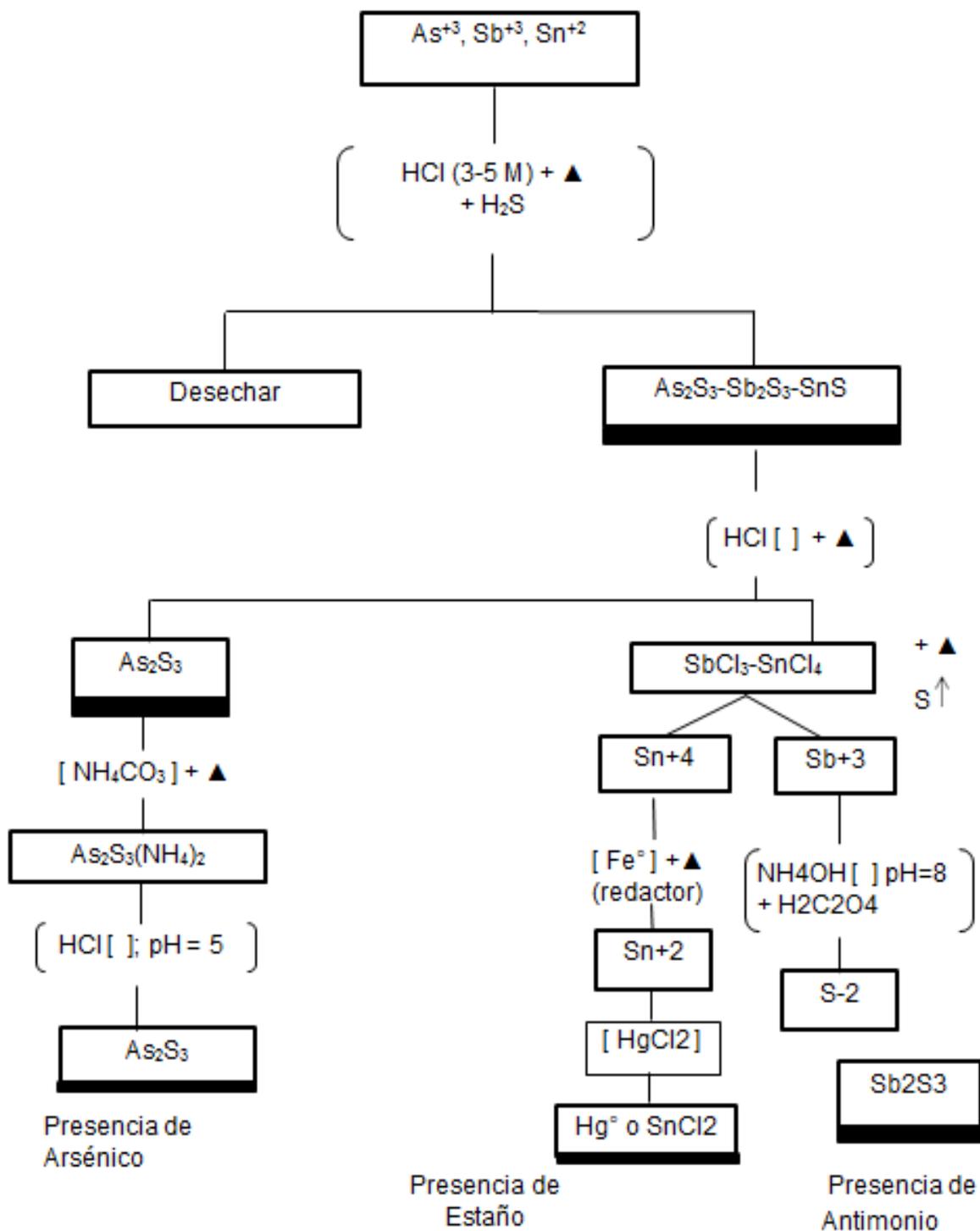
Marcha Analítica grupo I A



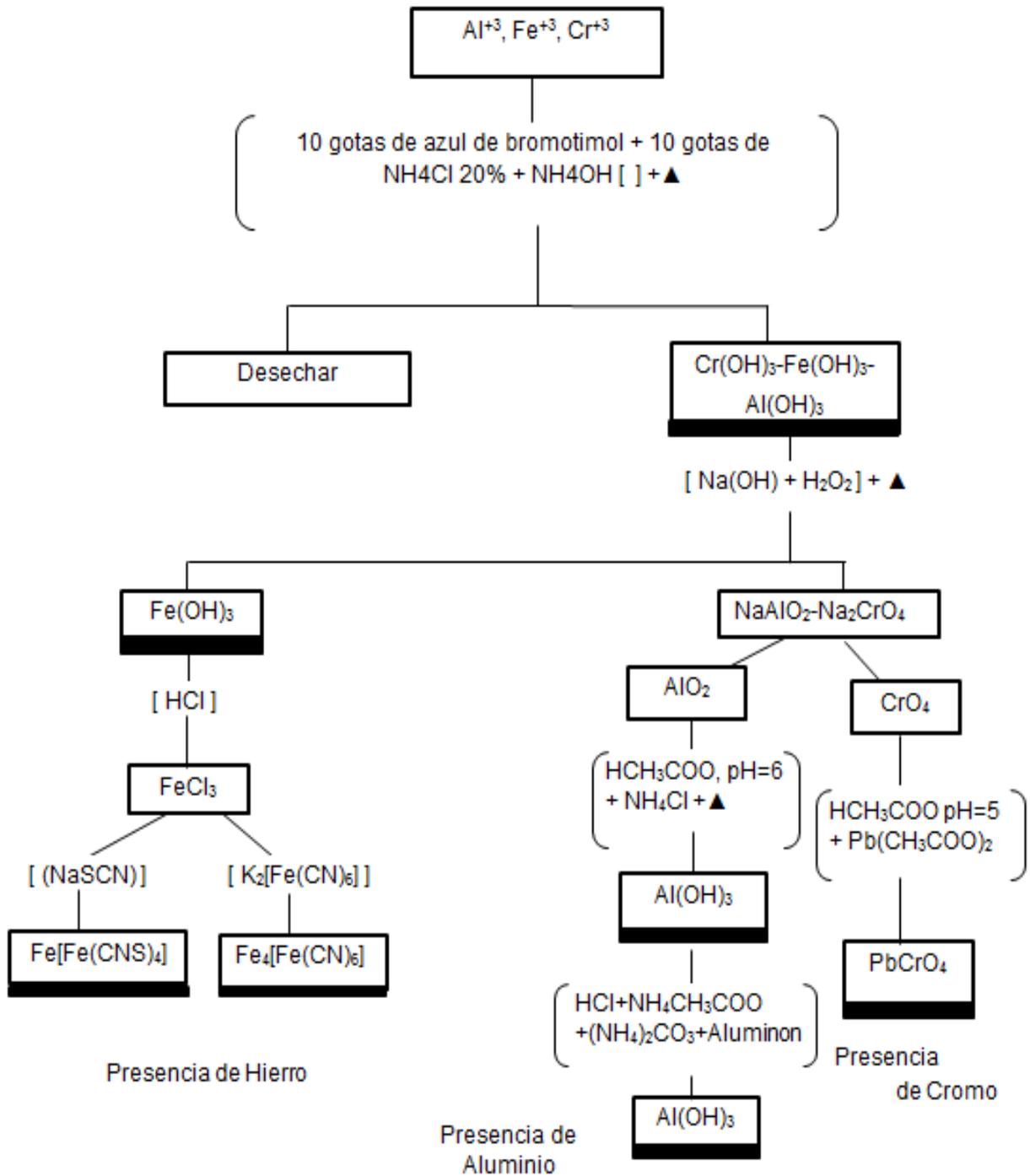
Marcha Analítica grupo II A



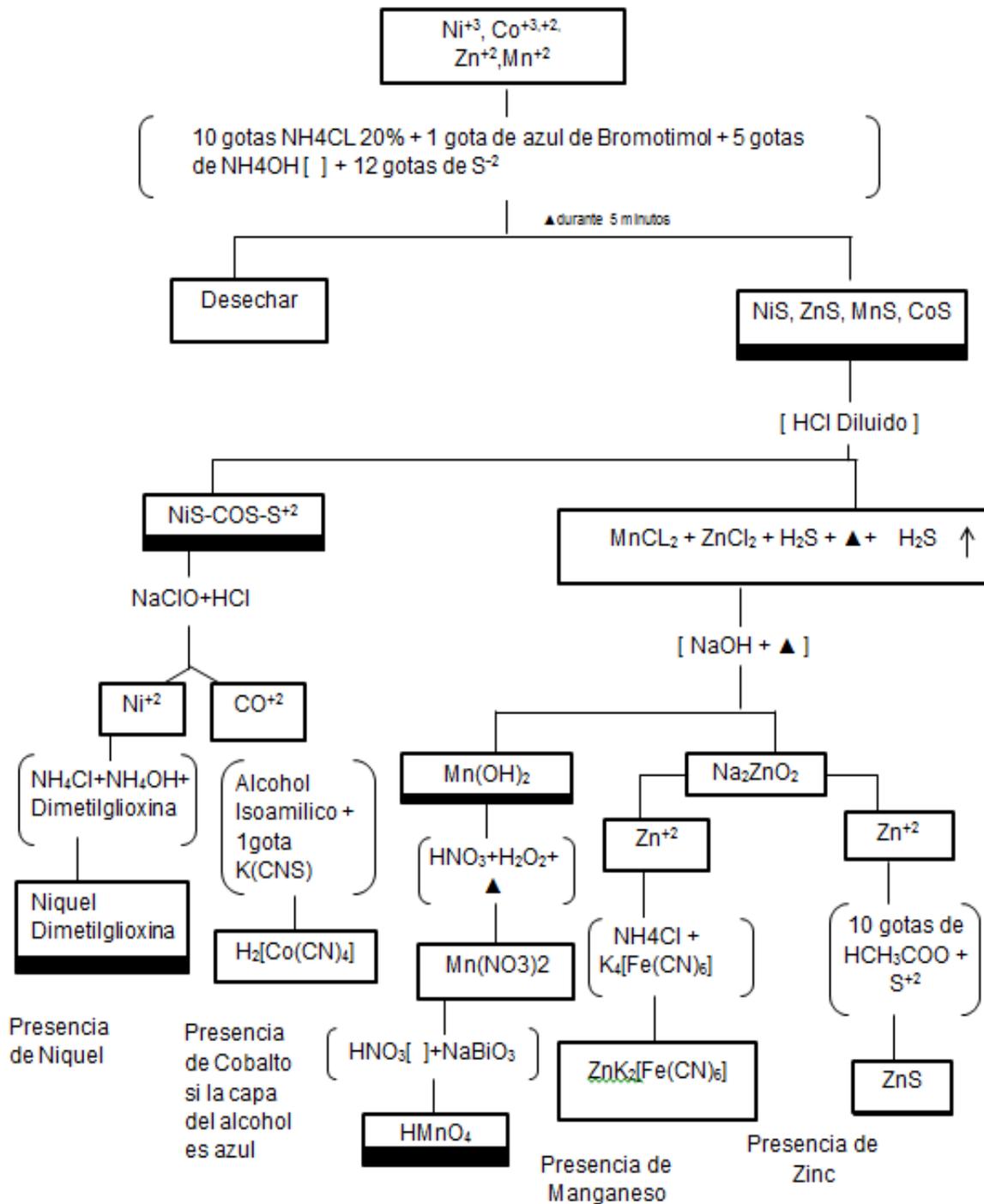
Marcha Analítica grupo II B



Marcha Analítica grupo III A



Marcha Analítica Grupo III B



FUENTE: Los diagramas anteriores fueron extraídos de Vogel, A. (1952)

Química Analítica Cualitativa

ANEXOS IV

Mapas

Mapa.1. Puntos de muestreo en la UNPHU



Leyenda de Puntos de Muestreo

- 1) Cuneta–Odontología/ Veterinaria
- 2) Cuneta – Edificio 2/ Arquitectura / Play
- 3) Cuneta – Edificio 4 (lado Este)
- 4) Cuneta–Parqueo Biblioteca/Edificio 5
- 5) Cuneta–Edificio 8 parqueo/zona verde
- 6) Caño Edificio 5

Mapa.2. Metales encontrados en cada punto de muestreo.



Leyenda de Resultados

- 1) Mercurio, cadmio, hierro, cromo y zinc.
- 2) Mercurio, hierro, cromo y zinc
- 3) Mercurio y cadmio.
- 4) Mercurio, cobre, hierro y plomo.
- 5) Plomo, hierro y zinc
- 6) Mercurio, hierro y zinc.

Mapa. 3. Areas de escorrentia de las diferentes muestras



Fuente: Los mapas anteriores fueron realizados en Google Earth para fines del estudio realizado

ANEXOS V
Análisis

Análisis 1. Carbón activado



JACOBI CARBONS
www.jacobi.net

Certificate of Analysis

Customer:	Puradom SRL	Cust Ref:	1833
Lot No.:	81404120	Date Issued:	8-Apr-2014
Quantity:	22000 kg	Date Printed:	1-Jun-2014
Grade.:	AquaSorb CS 12x40 mesh 12.5 kg SJ 428P		

Parameter	Method	Spec. min	Spec. max	Value	Unit
Iodine Value	ASTM D4607	1000		1046	mg/g
Moisture Content, as packed	ASTM D2867		5.0	1.8	%
Total Ash Content	ASTM D2866		4.0	2.3	%
Ball Pan Hardness	ASTM D3802	98		98	%
Particle Size	ASTM D2862				
	> 12		5.0	0.3	%
	< 40		4.0	0.8	%

This document is valid and generated automatically from our Enterprise Quality Management system..



Water treatment
grades are certified to
ANSI/NSF Std. 61



Jacobi Carbons
is certified to
ISO 9001:2008

Análisis 2. Metales

RESULTADOS DE ANALISIS DE TESIS ESTUDIANTES UNPHU.

Parámetros	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	Unidad
Cromo (Cr)	0.0064	0.0028	0.0026	0.0041	0.0026	0.0062	mg/L
Cadmio (Cd)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	mg/L
Hierro (Fe)	0.3302	0.0401	0.0149	0.2749	0.0096	0.0270	mg/L
Mercurio (Hg)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/L
Plomo (Pb)	0.0029	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	mg/L
Cobre (Cu)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/L

Método de Análisis: ICP-OES

Arismendis Gómez
Encargado del Laboratorio
Tel: (809) 567-3500, ext.6818
E.Mail.: ar.gomez@dga.gov.do
Laboratorio de la
Dirección General de Aduanas



Laura Rivera
Sustentante

Josué Guzmán
Sustentante

Ing. Carlos Sanlley
Asesora

Jurado

Jurado

Jurado

Calificación: _____

Fecha: _____

Ing. Doris Peña
Directora del Dpto. de Química