

**CINÉTICA DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EN EL TRATAMIENTO  
DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “LOMA DE LOS COCOS” EN LA  
CIUDAD DE CARTAGENA.**



**FREDYS MAURICIO SAAH HERRERA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2015**



**CINÉTICA DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EN EL TRATAMIENTO  
DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO "LOMA DE LOS COCOS" EN LA  
CIUDAD DE CARTAGENA.**

**FREDYS MAURICIO SAAH HERRERA**

***PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL***

**Directora. MONICA ELJAIEK URZOLA, MSC  
INGENIERA CIVIL**



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2015**



**CINÉTICA DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EN EL TRATAMIENTO  
DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO "LOMA DE LOS COCOS" EN LA  
CIUDAD DE CARTAGENA.**

**Grupo de Investigación de Modelación Ambiental GIMA**

**Línea de Investigación de Saneamiento Básico**

**FREDYS MAURICIO SAAH HERRERA**

***PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL***

**DIRECTORA. MONICA ELJAEK URZOLA, MSC  
INGENIERA CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2015**



---

---

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Jurado**  
**JAIME ALEJANDRO MOUTHON BELLO.**

---

**Firma del Jurado**  
**JOSE ANGEL COLINA MARQUEZ.**

Cartagena de Indias D. T. y C., \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2015



---

---

## DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, quien me ha dado sabiduría y fortaleza en los buenos y malos momentos.

A mis padres, Fredys Manuel Saah Arroyo y Elsa Marina Herrera Saab, por ser mis pilares, mis cimientos, en los cuales me siento confiado construir mi futuro.

A mi abuela Meliza Alfonsina Arroyo de Saah, quien ya no se encuentra con nosotros y anhelaba tener este proyecto finalizado en sus manos y regalarme un abrazo y un beso felicitándome por haber culminado esta etapa de mi vida, a quien extraño mucho y me duele no haber terminado a tiempo para que gozara de mis triunfos como profesional.

A mi abuela Lily del Carmen Saab de Herrera, por siempre preocuparse y siempre darme ánimos, por sus oraciones, y por brindar ese cariño fortalecedor en los momentos difíciles.

A mis demás familiares, donde siempre encuentro apoyo, comprensión y cariño. En especial a mi hermana Aura Susana Arteta Herrera, que a pesar de la distancia siempre está cerca de mí.

A mis amigos, por estar pendientes del desarrollo de mis actividades y no dejar que decayeran mis ánimos al realizar mis estudios. En especial Yesenia Amell Amell, quien siempre fue mi apoyo fundamental para la culminación de este proyecto.

A mis maestros por darme los conocimientos necesarios para ser un excelente profesional y excelente ser humano.

*Fredys Mauricio Saah Herrera*



---

---

## **AGRADECIMIENTOS.**

### **DOCENTES.**

MONICA STELA ELJAIK URZOLA. MSc. Directora de Tesis.

JAIME ALEJANDRO MOUTHON BELLO. Phd. Evaluador.

JOSE ANGEL COLINA MARQUEZ. Phd. Evaluador.

### **COLABORADORES.**

GRUPO DE INVESTIGACION EN MODELACION AMBIENTAL "GIMA". Universidad de Cartagena.

LUIS FELIPE GUARDIOLA. Aspirante MSc. Ingenieria Ambiental.

EMPRESA CARIBE VERDE S.A.E.S.P.

### **FAMILIARES Y AMIGOS**

Familia Saah Arroyo

Familia Herrera Saab

Amigos y Compañeros.



## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. MARCO REFERENCIAL.....	15
2.1. ANTECEDENTES.....	15
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	16
2.3. MARCO TEORICO.....	20
2.3.1. Lixiviado.....	20
2.3.2. Características.....	21
2.3.3. Tratamiento de Lixiviados.....	23
2.3.4. Carbón Activado.....	24
2.3.5. Adsorción.....	28
2.3.6. Isotermas De Adsorción.....	30
2.3.7. Cinética de la adsorción.....	35
2.3.8. Peróxido de Hidrogeno.....	37
3. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	39
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	39
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	39
3.3. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	40
4. METODOLOGÍA.....	42
4.1. INFORMACION SECUNDARIA.....	42
4.2. INFORMACION PRIMARIA.....	42
4.2.1. Paso 1. Caracterización del lixiviado.....	42
4.2.2. Paso 2. Determinación de isoterma de adsorción.....	43
4.2.3. Paso 3. Pruebas para Pre-Tratamiento de lixiviado con Peróxido.....	44
4.2.4. Interferencia del residual de peróxido en la medición de la DQO.....	45
4.2.5. Paso 4. Determinación de Cinética del CAG con lixiviado solo y lixiviado pre-tratado.....	46
4.2.6. Paso 5: Análisis de la información.....	48
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49



5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO.....	49
5.2.	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	49
5.2.1.	Resultados de experimentos. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.2.2.	Correlación de isotermas. ....	50
5.3.	RESULTADOS PRE-TRATAMIENTO CON PEROXIDO DE HIDROGENO [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ].52	
5.3.1.	Ensayo 1. ....	52
5.3.2.	Ensayo 2. ....	53
5.3.3.	Corrección de la interferencia del residual de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en la medición de DQO	55
5.4.	RESULTADOS DE CINETICA DEL CAG CON LIXIVIADO SOLO Y LIXIVIADO PRE-TRATADO.....	56
5.4.1.	Resultados experimentales. ....	56
5.4.2.	Análisis de Datos.....	59
6.	CONCLUSIONES. ....	64
7.	RECOMENDACIONES. ....	65
8.	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA. ....	66
	ANEXOS.....	70





---

---

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** Comparación de características típicas de los rellenos sanitarios.
- Tabla 2.** Clasificación de lixiviados.
- Tabla 3.** Rango de valores para algunas propiedades de los carbones activos comerciales.
- Tabla 4.** Parámetros que influyen sobre las propiedades de la adsorción.
- Tabla 5.** Ecuaciones modelos cinéticos.
- Tabla 6.** Parámetros examinados en el Lixiviado.
- Tabla 7.** Características del lixiviado sin tratamiento.
- Tabla 8.** Ensayo de inferencia de residual de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].
- Tabla 9.** Duplicado de ensayo de inferencia de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].
- Tabla 10.** Propiedades del carbón activado granular utilizado en los experimentos.
- Tabla 11.** Resultados Experimentales Clarimex CAGR-B.
- Tabla 12.** Resultados Experimentales Filtrasorb 400.
- Tabla 13.** Resultados Experimentales Clarimex CAGR-B (Duplicado).
- Tabla 14.** Ajustes Modelos Isotérmicos.
- Tabla 15.** Relación DQO adsorbida – Masa de carbón activado.
- Tabla 16.** Remoción DQO respecto al tiempo y concentraciones de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (500ppm – 5000ppm).
- Tabla 17.** Remoción DQO respecto al tiempo y concentraciones de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (5000ppm – 10000ppm).
- Tabla 18.** Tiempo de toma de las muestras.
- Tabla 19.** Resultado DQO corregido para Lixiviado Pre-Tratado con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].



**Tabla 20.** Resultado DQO para Lixiviado sin Pre-Tratamiento.

**Tabla 21.** Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PPO.

**Tabla 22.** Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PSO.

**Tabla 23.** Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PPO.

**Tabla 24.** Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PSO.



---

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representación esquemática del sistema poroso de un carbón.
- Figura 2.** Formas de presentación del carbón activado.
- Figura 3.** Ciclo de Reactivación del Carbón Activado.
- Figura 4.** Procesos de activación térmica.
- Figura 5.** Proceso de activación química.
- Figura 6.** Cuadro Comparativo entre Adsorción Física y Química.
- Figura 7.** Cinética de la adsorción.
- Figura 8.** Peróxido de Hidrogeno.
- Figura 9.** Ubicación Relleno sanitario Loma de los cocos, Cartagena D.T. y C., Colombia.



---

---

## LISTA DE GRAFICOS

- Grafica 1.** Relación DQO adsorbida – Masa de carbón activado.
- Grafica 2.** Relación entre Concentración Final de DQO y  $[H_2O_2]$ .
- Grafica 3.** Relación entre Concentración Final de DQO y Tiempo de reacción.
- Grafica 4.** Relación entre porcentaje de remoción de DQO y  $[H_2O_2]$ .
- Grafica 5.** Correlación entre  $[H_2O_2]$  e incremento de DQO
- Grafica 6.** Cinética experimental de remoción de DQO de lixiviados.
- Grafica 7.** Resultado Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PSO.
- Grafica 8.** Comparación resultado experimental con Modelo cinético lixiviado Pre-Tratado.
- Grafica 9.** Resultado Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PSO.
- Grafica 10.** Comparación resultado experimental con Modelo cinético lixiviado sin Pre-Tratamiento.



## RESUMEN.

El tratamiento de los lixiviados es un tema que cada vez toma más fuerza a nivel global, pero ante esta temática, en Colombia existen muy pocas investigaciones. Durante el año 2011, en Colombia más del 90% de los residuos sólidos fueron dispuestos en rellenos sanitarios, para tal porcentaje de residuos, la generación de lixiviados es también considerable. Esto evidencia la necesidad de generar conocimientos para el mejoramiento de las técnicas y alternativas de tratamiento de lixiviados. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2011)

En este proyecto se evalúa la cinética de la adsorción en carbón activado granular (CAG) para la remoción de la DQO presente en el lixiviado maduro y lixiviado maduro pre-tratado con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] mediante la implementación de un experimento tipo batch.

Se tomaron dos muestras de lixiviado, una de ellas se dejó inalterada y a la otra se le adicionó una solución de peróxido de hidrógeno para llegar hasta una concentración óptima. Luego de haber pre-tratado el lixiviado, se añade Carbón Activado Granular a las dos muestras y posteriormente las muestras fueron sometidas a agitación controlada. Por último, se realizaron análisis de DQO luego de 10 min, 20min, 30 min, 45min, 60 min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 7 horas, 24 horas, 26 horas, 30 horas y 48 horas en cada caso.

En los resultados experimentales, se obtuvo una concentración final de DQO mayor en el lixiviado con pre-tratamiento de [ $H_2O_2$ ], a pesar que la DQO inicial del lixiviado pre-tratado fue menor, el CAG solo fue más efectivo.

El modelo cinético que se ajustó con un margen de error menor para los dos lixiviados, tanto pre-tratado como sin pre-tratamiento, fue el modelo de Pseudo-Segundo Orden (PSO), con errores que oscilan entre el 10 y 14 % y un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.9994 en lixiviado pre-tratado y de 0.9984 en lixiviado sin pre-tratar.



## 1. INTRODUCCIÓN.

Como producto de las actividades del hombre se generan residuos que son evacuados de las viviendas y depositados en lugares alejados de las zonas pobladas conocidos como rellenos sanitarios. En estos lugares la descomposición de dichos residuos genera diferentes elementos contaminantes, uno de ellos son los lixiviados, que provienen de la descomposición de los desechos y el líquido que ha entrado al relleno desde fuentes externas tales como: drenaje superficial, precipitación, agua subterránea y agua de manantiales subterráneos los cuales arrastran los materiales disueltos y suspendidos de los residuos (Guardiola, 2014).

El relleno sanitario *Loma de los Cocos*, el cual se encuentra geográficamente ubicado en el sector rural del corregimiento de Pasacaballos, al sureste del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias y a 14 km del Casco urbano de Cartagena, actualmente cuenta con una gran cantidad de lixiviado que es almacenado en cinco piscinas y al que se le hace necesario tratar para aumentar su índice de biodegradabilidad ya que en los últimos estudios realizados se registra que estaba entre el 0,25 y 0,30 para el año 2012. (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2008).

Existen varios tipos de tratamientos para los lixiviados, que pueden ser biológicos o físico-químicos; dentro de los cuales se encuentra el Pre-Tratamiento con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] o agua oxigenada y tratamientos con carbón activado.

En este proyecto, como objeto principal, se evalúa la cinética de la adsorción en carbón activado granular (CAG) para la remoción de la DQO presente en el lixiviado maduro y lixiviado maduro pre-tratado con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] mediante la implementación de un experimento tipo batch, para su uso en el tratamiento del lixiviado generado en el relleno sanitario.

El presente estudio está inscrito en la línea de investigación Saneamiento Básico, del grupo de investigación GIMA, de la Facultad de la Ingeniería de la Universidad de Cartagena por tratarse de una investigación relacionada con el componente ambiental y cuyo impacto se verá reflejado en la comunidad cartagenera en general.



## 2. MARCO REFERENCIAL.

### 2.1. ANTECEDENTES

En la universidad de Cartagena, con el programa de investigación ambiental GIMA, se ha trabajado en la investigación de métodos de tratamiento para el lixiviado del relleno sanitario loma de los cocos. En el 2012 se evaluó la viabilidad técnica de los sistemas de tratamiento con CAG y evaporación.

*Fernández Yepes y Torres Gil*, en su proyecto de grado con título *Reducción de DQO y aumento de biodegradabilidad de los lixiviados del relleno sanitario*, evaluaron la factibilidad técnica de tratar lixiviados no biodegradables del Relleno Sanitario Loma de los Cocos de la Ciudad de Cartagena, mediante la aplicación del tratamiento físico-químico de adsorción por medio de una columna empacada con carbón activado granular. En este estudio se obtuvieron remociones satisfactorias las cuales fueron, desde un 92 % a un 88% de DQO y de un 72% a un 59% de DBO5, lo que indica que la eficiencia en este tipo de columnas va disminuyendo con el tiempo. Así mismo, el índice de biodegradabilidad se logró llevar de 0.2 a aproximadamente 0.7, pasando de ser un lixiviado no biodegradable a ser un lixiviado biodegradable, por lo que el proceso de adsorción con carbón activado como tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario se considera viable desde el punto de vista técnico.

*Bermúdez Robles*, en su proyecto de grado con título *Sistemas de Evaporación como medio de tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Caso de estudio: Parque Ambiental Loma de los Cocos de la Ciudad de Cartagena de Indias*, clasificó los sistemas de evaporación según el mecanismo de suministro de calor latente de evaporación, en evaporadores naturales y mecánicos y fueron analizadas sus ventajas y desventajas operacionales acorde a las características de la ciudad. El proceso de adsorción en la columna, genera remociones hasta del 90% de DQO, 70% DBO, 80% de Color y una relación DBO/DQO de 0,7; para el proceso de evaporación se obtuvo que, los evaporadores naturales serían una alternativa viable, incluso en época de lluvia. En cuanto a los evaporadores mecánicos, se encontró que los que mejor se ajustarían



serían aquellos que permiten el aprovechamiento de los gases generados en el relleno o la reutilización vapores generados previamente por el sistema, brindando la posibilidad de generación de subproductos con alto poder fertilizante, potencialmente aprovechables.

*Lambis Ortiz*, en su proyecto de grado con título *Tratamiento de lixiviados mediante el uso de la quitina como coagulante natural. Caso de estudio: Parque Ambiental "Loma De Los Cocos" de la ciudad de Cartagena De Indias*, utilizó el test de jarras convencional, alternativamente se evaluó la eficiencia de remoción del sulfato de aluminio (alumbre) como coagulante comparativo. Los experimentos sugirieron que la mejor condición de pH del lixiviado en la remoción de contaminantes fue de 4 para los dos coagulantes. Sin embargo los efectos de la dosis óptima para el coagulante químico de sulfato de aluminio fue de 6 g/l eliminando el 19.28% de DQO y el 73.87% de color. Por otra parte el coagulante de quitina alcanzo a remover el 12.69% de DQO y 47.26 de color con una dosis de 10 g/l. Lo cual es posible que existan mayores partículas disueltas que partículas coloidales presentes en el lixiviado del relleno sanitario "Loma de los Cocos" dado la naturaleza de estos, los procesos de coagulación y floculación podrán remover en este orden. Sin embargo se recomienda para investigaciones futuras realizar mayores estudios en la caracterización del lixiviado, realizar ensayos experimentales con un mayor número de dosis de coagulante y de pH del lixiviado.

## 2.2. ESTADO DEL ARTE

El relleno sanitario de la ciudad de Mérida, México, utiliza un material de cubierta denominado localmente sahcab que posee elevadas concentraciones de carbonato de calcio que al contacto con el agua de lluvia incrementa la dureza del líquido y el aporte de calcio a los lixiviados. Al aplanar el sahcab durante la operación del relleno, se reduce su porosidad y actúa como filtro dentro del relleno, por lo que el contenido de sólidos suspendidos del lixiviado es bajo. Este resultado se comprobó mediante un análisis de los tamaños de las partículas suspendidas que resultaron en promedio de 23  $\mu$ m. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).





Partículas coloidales de pequeño tamaño producen color a las suspensiones y son difíciles de remover por tratamientos fisicoquímicos (coagulación - floculación - sedimentación) y las mejores remociones se obtienen a valores de pH bajos. El objetivo de este trabajo fue determinar la tratabilidad fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de la Ciudad de Mérida, mediante el uso de columnas empacadas con carbón activado, a través de las cuales se hizo pasar lixiviado crudo y lixiviado con pH ácido, cercano a 2. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).

Los mejores resultados fueron obtenidos en los ensayos en los que se utilizó lixiviados con pH ácido. Para el mismo tiempo de contacto de 8 horas, se alcanzaron remociones de 65% de DQO para lixiviados sin tratamiento, mientras que en los ensayos con reducción de pH, se obtuvieron remociones de 90%. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).

Se obtuvieron eficiencias de remoción de DQO del 60 al 90% en lixiviados a los que se les ajustó el pH a 2 y de 65 al 38% a los lixiviados crudos, ambos con 8 horas de tiempo de contacto. Ninguno de los modelos de isoterma ensayados (Langmuir, Freundlich y BET) se ajustaron a los datos experimentales de la adsorción de materia orgánica de lixiviados por carbón activado. Los lixiviados estudiados poseen poca materia orgánica suspendida y los tamaños de partículas se encuentran en el rango de 0 a 75  $\mu$ m, con un valor medio de 23  $\mu$ m. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).

En este estudio no se utilizó la cinética para determinar el tiempo de contacto entre el carbón activado y el lixiviado del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, tampoco utilizaron peróxido de hidrogeno para hacer un pre-tratamiento al lixiviado.

En otro caso, en la ciudad de Hong Kong, se llevaron a cabo experimentos de laboratorio para investigar las actuaciones de tratamiento de ozonización solo y/o su combinación con carbón activado granular (GAC) de adsorción para el lixiviado prima del vertedero NENT. Para mejorar su eliminación de contaminantes recalcitrantes de



los lixiviados, la superficie de GAC se oxidó con ozono antes del tratamiento. (Kurniawan, Lo, & Chan, 2006).

Con respecto a la dosis de ozono y el pH, la eliminación de COD y / o NH<sub>3</sub>-N de ozonización solos y combinados de ozono-GAC adsorción se evaluaron y se compararon con los de otros tratamientos físico-químicos en algunos estudios reportados. Se presentó el mecanismo de eliminación de compuestos recalcitrantes por tratamiento de adsorción de ozono-GAC. Entre los diversos tratamientos estudiados, la combinación de la capa de ozono-GAC adsorción utilizando modificado ozono-GAC tenía la mayor remoción de DQO (86%) y/o NH<sub>3</sub>-N (92%) en comparación con la ozonización solo (COD: 35%; NH<sub>3</sub> N: 50%) al mismo COD inicial y/o NH<sub>3</sub>-N concentraciones de 8,000 y 2,620 mg/l, respectivamente. (Kurniawan, Lo, & Chan, 2006).

Aunque el tratamiento integrado fue más eficaz que la ozonización sola para tratar el lixiviado estabilizado, los resultados sugieren que no podría generar efluentes que cumplan con el límite de COD inferior a 200 mg / L y la norma de descarga de NH<sub>3</sub>-N de menos de 5 mg tratada/L. (Kurniawan, Lo, & Chan, 2006).

En este estudio no se realizó estudio de la cinética en el comportamiento del carbón activado en el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario de la ciudad de Hong Kong, tampoco utilizaron peróxido de hidrogeno para hacer un pre-tratamiento al lixiviado.

El mercurio y sus compuestos son altamente tóxicos. Interfieren con varios procesos del cuerpo que involucran aminoácidos, proteínas y enzimas. Éstos entran en el cuerpo a través del agua. (Goyal, Bhagat, & Dhawan, 2009).

El conjunto experimental consistió de una columna de vidrio de 25 mm de diámetro y 600 mm de longitud. El carbón activado en este estudio se saturó con agua para eliminar el aire atrapado y se empaquetó en la columna de vidrio soportado sobre placas perforadas. Una solución que contiene iones de Hg (II) de concentración conocida a un pH = 6 se preparó y se bombeó a un tanque elevado con rebosadero para mantener un cabezal constante. Lo que aseguró una velocidad de flujo influente constante durante



todo el experimento porque la solución desde el tanque superior a la columna se alimenta por gravedad. El efluente de la columna se recogió a intervalos regulares y se analizaron mediante procedimientos analíticos estándar. (Goyal, Bhagat, & Dhawan, 2009).

El tiempo de penetración de Hg (II) iones en GAC y ACC aumenta con aumento de la profundidad del lecho, pero disminuye en el aumento de la tasa de carga hidráulica (HLR) y la concentración de la alimentación. La capacidad de adsorción eficaz de los lechos de carbono aumenta con HLR y es máxima en HLR alrededor de 7 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>. La profundidad del lecho crítico y la profundidad de la zona de transferencia de masa obtenida usando el enfoque teórico BDST coinciden estrechamente con los valores experimentales. Los parámetros de diseño obtenidos para una concentración de caudal y de un experimento de alimentación de la columna se pueden utilizar para calcular los parámetros de diseño para otras concentraciones de alimentación y velocidades de flujo. (Goyal, Bhagat, & Dhawan, 2009).

Este proyecto aplicó el estudio de la cinética para determinar la curva de adsorción del mercurio con carbón activado, por ende no se usó para lixiviados; El peróxido de hidrogeno no fue usado.

Este trabajo buscó fusionar dos tecnologías existentes para la remoción del azul de metileno en el agua; estos son el ozono y el carbón activado granular (CAG). También se compararon las ecuaciones de mejor ajuste de formas lineales y no lineales de los dos modelos cinéticos ampliamente utilizados, a saber, de pseudo-primer orden y ecuaciones pseudo-segundo orden. (Lin & Wang, 2009).

La cinética experimental de adsorción de azul de metileno en el carbono activado se utilizó para esta investigación. Tanto el coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) y la desviación estándar normalizada  $\Delta q$  (%) estaban empleados como métodos de análisis de error para determinar las ecuaciones de mejor ajuste. (Lin & Wang, 2009).

Esto dio como resultado un aumento importante en la cantidad de remoción en comparación de los resultados individuales. Los resultados muestran que las formas no



lineales de los modelos de pseudo-segundo orden de pseudo-primer orden y eran más adecuados que las formas lineales para ajuste de los datos experimentales. La cinética experimentales pueden haber sido distorsionada por linealización de las ecuaciones cinéticas lineales, y por lo tanto, las formas no lineales de ecuaciones cinéticas deben utilizarse principalmente para obtener los parámetros de adsorción. Además, el método  $\Delta q$  (%) para el análisis de errores puede ser mejor para determinar el modelo que mejor se ajusta en este caso. (Lin & Wang, 2009).

Para este experimento se llevó a cabo la implementación del estudio de la cinética del carbón activado, pero se utilizó para eliminar azul de metileno y no lixiviados.

### **2.3. MARCO TEORICO.**

Enterrar los residuos sólidos urbanos ha sido, y es aún, la práctica más utilizada por las sociedades del mundo para su manejo. Una vez se han enterrado los residuos sólidos es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Para empezar, el agua que ha entrado en contacto con la basura recoge gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro del residuo, quedando de esa manera altamente contaminada. Esta agua residual se denomina lixiviado, y es uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conozcan, además, son catalogados como uno de los residuos más complejos y difíciles de tratar (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012) y (Giraldo, 2001).

#### **2.3.1. Lixiviado.**

Son emisiones líquidas producto de la descomposición de los residuos sólidos. La disposición final de los residuos sólidos urbanos ha evolucionado desde vertederos a cielo abierto, hasta rellenos sanitarios altamente tecnificados donde se controlan las emisiones líquidas y gaseosas potencialmente peligrosas para el medio ambiente. Tanto en los vertederos a cielo abierto como en los primeros rellenos sanitarios no se controlaban las emisiones líquidas y éstos escurrían a fuentes superficiales de agua o bien se infiltraban a las capas inferiores del terreno y en muchos casos contaminaban



los acuíferos subyacentes a ellos. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).

La generación de lixiviados en los rellenos sanitarios depende de muchos factores, entre los que se encuentran el grado de compactación de los desechos, el grado de humedad inicial de la basura, el tipo de material de cubierta de las celdas, la precipitación pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y la capacidad de campo del relleno. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002).

La composición de los lixiviados depende del tipo de desecho confinado, del nivel de degradación de los residuos y del volumen producido. En el proceso que se desarrolla en el relleno sanitario, no pueden separarse los líquidos provenientes de procesos de reacción bioquímica de los de lixiviación. Todo cambio en la estructura y composición del relleno tiene efecto sobre las corrientes y la acumulación, de tal modo que el agua y los procesos en el relleno son magnitudes que se influyen recíprocamente. (Méndez Novelo, Medina Hernández, Quintal Franco, Castillo Borges, & Sauri Riancho, 2002)

### **2.3.2. Características.**

Existen numerosas características de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fosforo, presencia abundante de patógenos y de sustancias tóxicas tales como metales pesados y constituyentes orgánicos. Estas características son importantes en cuanto indican que es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento. (Giraldo, 2001).

Para los lixiviados, dado su heterogeneidad y complejidad en su composición, existen parámetros básicos al momento de decidir el sistema de tratamiento a emplearse. Los



parámetros más importantes para ello son la DQO y la DBO<sub>5</sub>. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

CARACTERÍSTICA	LIXIVIADO JOVEN	LIXIVIADO VIEJO
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniaco	Muy alto	Alto
Fósforo	Usualmente Deficiente (1)	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy Altos	Bajos
Sales disueltas	Muy Altas	Bajas (relativamente)
Agentes Incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy Altos	Bajos
Metales Pesados	Muy Altos	Bajos

**Tabla 1.** Comparación de características típicas de los rellenos sanitarios.

**Fuente.** (Giraldo, 2001).

	Jóvenes	Intermedios	Viejos
<i>Edad (años)</i>	< 1	1 – 5	>5
<i>pH</i>	<6,5	6,5-7,5	>7,5
<i>DQO (g/L)</i>	>15	3-15	<3
<i>DBO /DQO</i>	0.5-1	0.1-0.5	<0.1
<i>COT/DQO</i>	<0.3	0.3-0.5	>0.5
<i>NH<sub>3</sub> -N (mg/L)</i>	<400	400	>400
<i>Metales pesados (mg/L)</i>	>2	<2	<2
<i>Compuestos orgánicos</i>	80% AGV	5-30% AGV+ AH+AF	AH+AF
<i>Tipo</i>	S/D	P	E

VFA=Ácidos Grasos Volátiles; AH=Ácido Humicos; AF= Ácidos Fulvicos; SD=sin degradar; P=parcialmente degradados o estabilizados; E= Estabilizados

**Tabla 2.** Clasificación de lixiviados.

**Fuente.** (Hernández, 2010)



### 2.3.3. Tratamiento de Lixiviados

Actualmente se reconocen como efectivos tres tratamientos para descontaminar a los lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios, la concentración de la contaminación del lixiviado y la cantidad de material a tratar, además del porcentaje de remoción que se desea, son las variables para determinar qué tipo de tratamiento se le puede aplicar. (Bodalo, Hidalgo, Gomez, Murcia, & Marin, 2007).

Estos tratamientos que se aplican a los lixiviados son los tratamientos biológicos, los tratamientos físicos y los tratamientos físico-químicos.

- **Tratamientos Físico - Químicos.**

Los tratamientos Físico-químicos son utilizados para el tratamiento de lixiviados no biodegradables, donde los más importantes son, según Bodalo, Hidalgo, Gomez, Murcia, & Marin (2007) son los siguientes:

- *Adsorción por carbón activo:* se realiza en una columna rellena de este material, que en el caso de los lixiviados de vertedero puede proporcionar porcentajes de eliminación de DQO de hasta el 80% debido a su capacidad de adsorción.
- *La evaporación:* se puede aplicar a cualquier mezcla, siempre que el líquido sea lo suficientemente volátil para ser evaporado, en condiciones de temperatura y presión adecuadas, y que los demás componentes sean lo suficientemente no volátiles y estables.
- *La oxidación química:* se utiliza cuando las técnicas físicas no son aplicables, los procesos de oxidación química resultan una alternativa efectiva, rápida y económica, ya que esta transforma los contaminantes orgánicos en compuestos inocuos, generalmente óxidos de carbono y agua.
- *El fraccionamiento (stripping) amoniacal:* es uno de los métodos utilizados para eliminar el nitrógeno amoniacal en las aguas residuales.



Se basa en un proceso de aireación por el cual se eliminan los gases disueltos en un agua residual o un lixiviado.

#### **2.3.4. Carbón Activado.**

El carbón activado es el mejor adsorbente de uso general para remoción/reducción de muchos compuestos orgánicos y aún algunos inorgánicos de diferentes líquidos y soluciones.

El carbón activado posee la virtud de adsorber en su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas, iones) del líquido que está en contacto con él. Este fenómeno se denomina poder adsorbente. La adsorción es la responsable de purificar, desodorizar y decolorar el agua u otros sólidos, líquidos o gases que entren en contacto con el elemento adsorbente. (Apelsa CARBONES, 2004).

- **Propiedades Del Carbón Activado.**

El carbón activo es un material en forma de polvo muy fino que presenta un área superficial excepcionalmente alta y se caracteriza porque contiene una gran cantidad de microporos (poros inferiores a 2 nm de diámetro). El carbón activo puede tener un área superficial entre 500 y 2500 m<sup>2</sup>/g (Universidad de Barcelona).

Este es el adsorbente más versátil de todos, pues reúne una serie de factores que lo muestran atractivo para muchos procesos. La superficie del carbón activo es esencialmente no polar, por ello no adsorbe fuertemente agua, así que puede ser utilizado para tratamiento de aguas o en procesos con gases húmedos. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

Los Poros dentro del carbón activado consisten en espacios entre placas gráficas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos ambas placas de carbón están lo

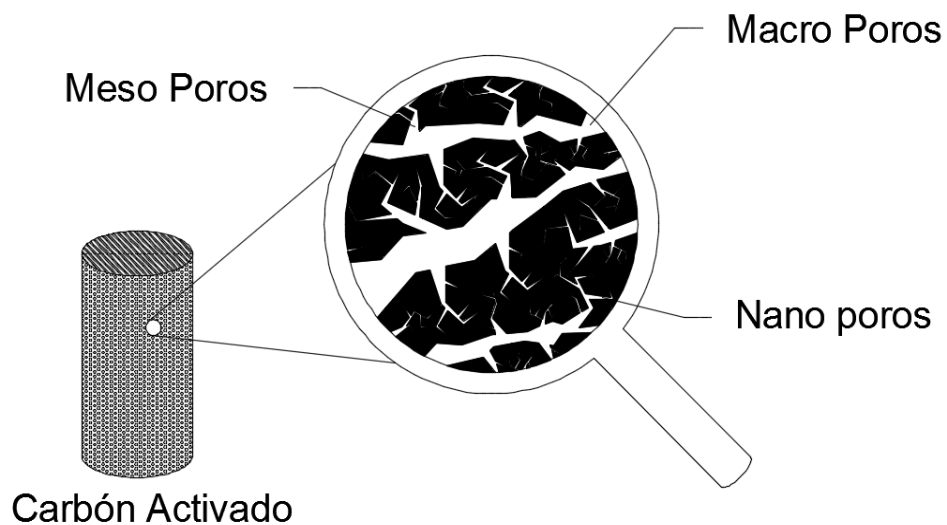




suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza. (TextosCientificos, 2006).

Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), que se basa en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente:

- Microporos: menores a 2 nm
- Mesoporos: entre 2 y 50 nm
- Macroporos: mayores de 50 nm (típicamente 200 a 2000 nm)



**Figura 1.** Representación esquemática del sistema poroso de un carbón.

**Fuente.** (Autor).

- Tipos De Carbón Activado.

El carbón activado se puede encontrar de dos maneras en el mercado; como Carbón Activado Granular (CAG) y como Carbón Activado en Polvo (CAP).

El carbón que se usa con más regularidad es el Granular (CAG) ya que es más fácil su manipulación y su proceso de reciclaje y reactivación es más sencillo y económico.



El diámetro de las partículas del carbón en polvo (CAP) es generalmente inferior a 0,1 mm, siendo normales carbones en polvo con partículas comprendidas entre 10 y 50 micras, mientras que en los carbones granulares (CAG) comerciales el tamaño medio de partícula varía usualmente entre 0,2 y 1,7 mm. (Textos Científicos, 2006)

En la tabla 3 que se encuentra a continuación se muestra los valores de algunas propiedades de los carbones activos a nivel comercial.

PARÁMETRO	UNIDADES EN LAS QUE SE EXPRESA	RANGO DE VALORES TÍPICOS	EJEMPLO DE UNA NORMA QUE SE APLICA
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a 1,200	ASTM D-4607
Área superficial	m <sup>2</sup> /g	500 a 1,200	Adsorción de N <sub>2</sub> (método BET) ASTM D-3037
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm <sup>3</sup>	0.7 a 500.0 y 0.2 a 1.0	Porosimetría con mercurio y adsorción de N <sub>2</sub> . ASTM C-699
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0.26 a 0.65	ASTM D-2854
Dureza	Adimensional	30 a 99	ASTM D-3802
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana (U.S. Std Sieve)	4x8 a 20x50	ANSI/AWWA B604-90
Tamaño efectivo de partícula	mm	0.4 a 3.3	ANSI/AWWA B604-90
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	menor a 2.1	ANSI/AWWA B604-90
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15	ASTM D-2866
Solubles en agua	% base seca	0.5 a 7	ASTM D-5029
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Humedad (al empacar)	%	2 a 15	ASTM D-2867
Longitud de semidecloración	cm	2 a 10	DIN 19603

**Tabla 3.** Rango de valores para algunas propiedades de los carbones activos comerciales.

**Fuente.** (Bansal, 1998).

- *Carbón Activado En Polvo (CAP).*

Los CAP presentan tamaños menores de 100 micrómetros, siendo los tamaños típicos entre 15 y 25 micrómetros.

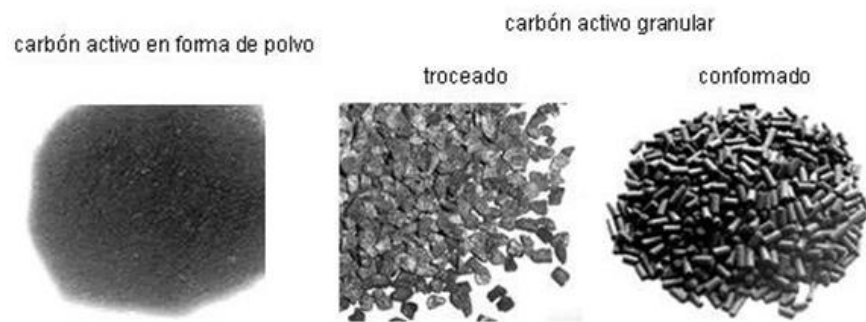


- *Carbón Activado Granular (GAG).*

Para los carbones granulares (GAC) las propiedades físicas más importantes son la dureza y el tamaño de partícula. Buena parte del coste de operación con los carbones en grano se debe a las pérdidas por atrición durante el manejo y la regeneración. Las pérdidas son menores en los carbones más duros. También la friabilidad del carbón usado en los lechos determina la velocidad con que las partículas se rompen y se hacen más pequeñas, perdiéndose durante la operación de lavado del lecho o escapando del mismo durante el funcionamiento normal, como sucede con otros medios porosos. (TextosCientificos, 2006)

Estos pueden dividirse en dos categorías: carbón activado troceado (o sin forma) y carbón activado conformado (o con una forma específica, cilindros, discos, etc.).

Los carbones activados troceados se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de briquetas de carbón o de trozos más grandes. Los carbones conformados pueden obtenerse por peletización o por extrusión de carbón en polvo mezclado con distintos tipos de aglomerantes. Existen además otras formas de adsorbentes de carbón, como las fibras de carbón activadas, las telas y los filtros de carbones activados, las estructuras monolíticas, las membranas de carbón, etc. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012)



**Figura 2.** Formas de presentación del carbón activado.

**Fuente.** (El Acuario Dulce, 2010).



### 2.3.5. Adsorción.

La adsorción en el elemento de carbón activado se da básicamente de tres tipos de maneras, dependiendo de la cantidad de material que se desee descontaminar y la concentración del contaminante.

El proceso de adsorción en el carbón activado es dependiente de su área superficial involucrando una interface sólido-líquido, en el caso de tratamiento de agua o soluciones, y sólido-gas, en el tratamiento de gases.

Los tipos de adsorción son:

- Adsorción Física o fisorción:

Las moléculas del líquido son adsorbidas en el sólido a través de fuerzas débiles de van del Waals, resultando en una adsorción de multicamadas. Dado que estas fuerzas son omnipresentes, resulta que rápidamente cualquier superficie limpia expuesta al ambiente acumula una capa de material fisisorbido.

- Adsorción Química o Quimiorción.

La adsorción química se debe a fuerzas mucho más fuertes que las de la adsorción física, como las que conducen a la formación de compuestos químicos; el compuesto adsorbido forma una capa monomolecular sobre la superficie del adsorbente y las moléculas no son libres de moverse de un sitio a otro; cuando la superficie está cubierta por el material adsorbido, la capacidad del adsorbente está prácticamente agotada. La adsorción química no es, generalmente, reversible y para remover el material adsorbido se debe calentar el adsorbente. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

- Adsorción de Intercambio.

Este tipo de adsorción se usa para describir la adsorción debida a la atracción eléctrica entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, como ocurre en el intercambio iónico. Los iones de un contaminante se concentran sobre sitios de



carga eléctrica opuesta sobre la superficie del adsorbente, a mayor carga eléctrica del ion, mayor atracción; así mismo, a menor tamaño del ion, mayor atracción. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

La tabla 4 muestra los parámetros que más influyen dentro de la adsorción en el carbón activado.

PARAMETRO	CARACTERISTICA
<b>Capacidad Vs Cinética (Tasa de reacción)</b>	(a) Los parámetros de capacidad determinan las características de carga del carbón (Concentración de adsorbato en el carbón, en el punto de saturación). La capacidad máxima de adsorción del carbón solo se alcanza en el equilibrio. (b) Los parámetros cinéticos solo determinan la rata de adsorción, teniendo un efecto despreciable sobre la capacidad de adsorción.
<b>Densidad Absorbente.</b>	Es utilizada para indicar la actividad de un volumen de carbón. Esta es significativamente más baja que la densidad teórica del sólido (La actividad volumétrica es proporcional a la densidad aparente).
<b>Área Superficial.</b>	La capacidad de adsorción es proporcional al área superficial (Ella es función del grado de activación del carbón).
<b>Tiempo de Contacto.</b>	Para alcanzar el equilibrio en la adsorción y maximizar su eficiencia, se requiere de suficiente tiempo de contacto.
<b>Tamaño del Poro.</b>	La correcta distribución del tamaño de poros es necesaria para facilitar el proceso de adsorción (suministrando los sitios de adsorción, los poros finos, y los canales de transporte adecuados para el manejo del adsorbato).
<b>Cenizas.</b>	Las cenizas constituyen el componente inerte del carbón. En la mayoría de los casos las cenizas solubles en agua son las de mayor consideración.
<b>Tamaño de las Partículas.</b>	Las partículas pequeñas proveen una más rápida rata de adsorción (distancia más cortas hasta los sitios de adsorción). Nota: El tamaño de partículas no influye sobre el área superficial total. El área superficial total es definida por el grado de activación y por la estructura de los poros del carbón.
<b>Concentración del Adsorbato.</b>	La capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato (altas concentraciones proveen grandes fuerzas de empuje durante el proceso de adsorción).
<b>Temperatura</b>	Las temperaturas bajas aumentan la capacidad de adsorción
<b>pH.</b>	La capacidad de adsorción aumenta, con aquellas condiciones de pH que aumentan la solubilidad del adsorbato.

**Tabla 4.** Parámetros que influyen sobre las propiedades de la adsorción.

**Fuente.** Fernandez Yepes & Torres Gil, (2012).

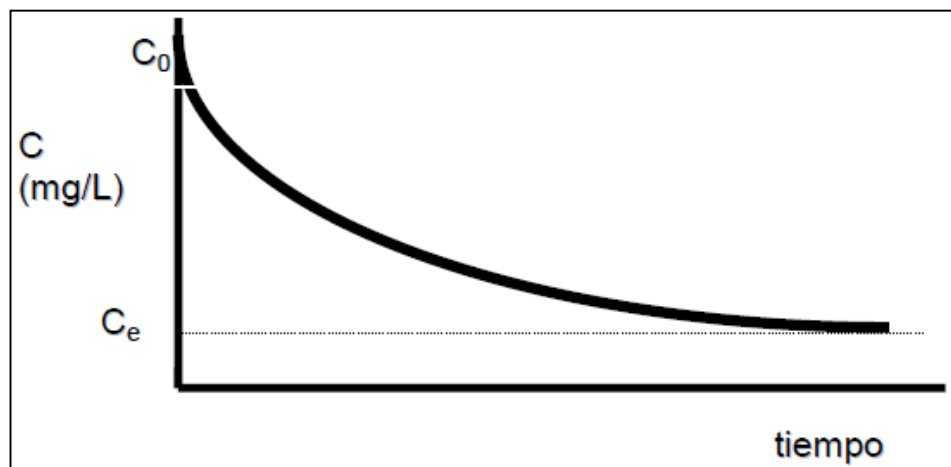


### 2.3.6. Isotermas De Adsorción.

La isoterma de adsorción es la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas del adsorbente a una temperatura dada. La concentración de adsorbato sobre el sólido bien dada como masa adsorbida por unidad de masa de adsorbente original.

Para obtener la isoterma de un determinado adsorbato se realizan experimentos en los cuales una solución de concentración  $C_0$  conocida se hace pasar por un adsorbente de varios pesos. Después de la adsorción se mide la concentración de la solución filtrada  $C_e$ , y la diferencia de concentraciones es la cantidad de sustancia disuelta que ha sido adsorbida por el carbón. Esta diferencia se divide entre la cantidad de adsorbente utilizado y la relación obtenida representa la capacidad de intercambio en el equilibrio que, la cual se grafica contra la concentración de equilibrio  $C_e$ , que es la concentración (ideal) del adsorbato en la cual se detiene el proceso de adsorción. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

En la figura 6 se aprecia que después de un tiempo de contacto, la concentración de soluto disminuye de un valor inicial  $C_0$ , hasta alcanzar el valor de equilibrio  $C_e$ .



**Figura 6.** Cinética de la adsorción.

**Fuente.** (Menendez & Perez, 2008).



La pendiente de la isoterma es la constante K de equilibrio de la reacción (que depende de la temperatura), y representa la adsorptividad, que es la facilidad con la cual el adsorbato es adsorbido. Cada adsorbato tiene una adsorptividad diferente, por lo cual es muy difícil hacer el diseño de un filtro de carbón activado en base a esta consideración.

Existen tres modelos de isotermas que se usan más frecuentemente para ajustar los datos experimentales obtenidos en el laboratorio, dependiendo del tipo de adsorción que se presente.

Estas isotermas son las de Langmuir, B.E.T. y Freundlich; las dos primeras de origen teórico y la tercera de origen empírico.

- Isoterma De Langmuir.

El modelo de isoterma de Langmuir fue creado en 1917 y plantea que la adsorción que se da en una superficie de adsorbente es en una monocapa, esto quiere decir que ninguna partícula del adsorbato se posara una encima de la otra.

Este modelo de Isoterma tiene las siguientes consideraciones, dadas como una realidad absoluta.

- a. Todos los sitios del solido tienen una igual actividad para la adsorción
- b. No existe interacción entre las moléculas adsorbidas.
- c. Cada unión adsorbato-adsorbente tiene la misma estructura y sucede por el mismo mecanismo.
- d. Cada sitio o poro del solido puede albergar una sola partícula de molécula de adsorbato.

Planteando el isoterma en una ecuación matemática obtenemos:

$$\frac{X}{m} = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$



Donde:

$X$ : cantidad de soluto adsorbido

$m$ : Dosis de carbón

$C_e$ : Concentración final de la solución o de equilibrio

$X_m$ : Cantidad de adsorbato necesario para formar una monocapa sobre un gramo de adsorbente. Corresponde al valor del inverso de la pendiente de la función lineal que resulta al representar en una gráfica:  $C/X$  contra  $C$ .

$b$ : Constante relacionada con el calor de adsorción. También se puede encontrar de la gráfica anterior.

La forma lineal de esta isoterma corresponde a la expresión:

$$\frac{m}{X} = \frac{1}{X_m * b * C_e} + \frac{1}{X_m} \quad (2)$$

- Isoterma De BET (Brunauer, Emmett Y Teller).

La isoterma mas usada para analizar la adsorción en multicapas se debe a S. Brunauer, P. Emmett y E. Teller (1938) denominada BET. Para su deducción se parte de tres supuestos:

- Todos los centros de adsorción de la superficie son equivalentes
- La capacidad de adsorción de un centro no depende del grado de ocupación de los centros vecinos
- Sobre cada centro pueden adsorberse varias capas de moléculas, siendo el calor de adsorción para todas ellas equivalentes excepto para la primera.

El modelo de B.E.T. se expresa matemáticamente así:

$$\frac{X}{m} = \frac{X_m * K * C}{(C_0 - C)[1 + (K - 1) * C/C_0]} \quad (3)$$





La su forma lineal de la ecuación de B.E.T. es.

$$\frac{C}{(X/m) * (C_0 - C)} = \frac{1}{X_m * K} + \frac{K - 1}{X_m * K} \cdot \frac{C}{C_0} \quad (4)$$

Donde:

$C_0$ : Concentración inicial de la solución

X: Cantidad de soluto adsorbido

m: Dosis de carbón

$X_m$ : Se encuentra combinando la pendiente con el intercepto de la función lineal, que resulta cuando se hace la grafica:  $C/X*(C_0-C)$  contra  $C/C_0$ . Es decir:

$$Xm = \frac{1}{pendiente + intercepto} \quad (5)$$

K: Constante relacionada con el calor de adsorción.

- Isoterma De Freundlich.

El modelo de isoterma de Freundlich es aplicable a superficies heterogéneas pero se asume adsorción monocapa, las características cualitativas de las isotermas de adsorción de diversos materiales son muy similares. De hecho, los resultados de la adsorción de solutos diversos se ajustan bien, en un intervalo restringido de concentraciones (m), a los que predice la siguiente ecuación empírica, propuesta en 1909 por Freundlich, en la ecuación 6 y 7 se muestra la forma matemática en que se expresa la ecuación de Freundlich así como su forma lineal:

$$\frac{X}{m} = C^{1/n} * K \quad (6)$$

$$\text{Log} \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \text{Log} C_e + \text{Log} K \quad (7)$$

Donde:



$X$ : Cantidad de soluto adsorbido

$m$ : Masa de carbón

$C$ : Concentración final de la solución o de equilibrio

$K$  y  $n$ : Constantes empíricas; se obtienen mediante métodos de regresión

Cuando  $1/n = 1$ , la reacción es lineal y se denomina "particionamiento".

Cuando  $1/n < 1$ , se dice que la reacción es "favorable", debido a que existe una cierta reversibilidad. La mayoría de adsorbentes exhiben una u otra adsorción lineal o favorable. Los modelos de Langmuir y Freundlich en el caso de  $1/n < 1$  son ambas cóncavas hacia abajo así que ambos modelos se pueden correlacionar a datos similares. (Fernandez Yepes & Torres Gil, 2012).

### 2.3.7. Modelos cinéticos empleados en tratamiento de lixiviados

Las isotermas de adsorción son una herramienta valiosa cuando se desea llevar escalar un proceso de adsorción o diseñar un adsorbedor, igual importancia adquiere determinar la cinética del proceso de adsorción ya que nos provee información valiosa para dimensionar el equipo y la efectividad del proceso (Rivas, 2006). Los modelos cinéticos usados para interpretar los datos experimentales de los procesos de adsorción se pueden generalizar en dos categorías modelos de adsorción-reacción y modelos de adsorción difusivos (Qui, 2009). Los modelos de adsorción difusivos se basan en tres pasos consecutivos:

- (i) transporte de masa externo o difusión hacia la película que rodea las partículas de adsorbente.
- (ii) difusión en el líquido contenido en los poros, llamado también difusión interna o difusión intra-partícula.
- (iii) Adsorción y desorción entre el adsorbato y los sitios activos (Ocampo, 2010) mientras que los procesos de adsorción-reacción están basados en el proceso global de adsorción, sin determinar cuál es el mecanismo controlante (Qui, 2009).



En el ANEXO 3 se observa que los modelos de adsorción-reacción son una buena alternativa para determinar la cinética de adsorción de DQO presente en los lixiviados debido a la dificultad que representaría el determinar a través de modelos difusivos la cinética mezcla compleja de sustancias orgánicas que conforman la DQO en los lixiviados. Las ecuaciones pseudo-primer orden (PPO) desarrollada por Lagergreen en 1989 y pseudo-segundo orden (PSO) desarrollada por Ho y McKay en 1995 han dado buenos resultados para determinar la cinética de adsorción de DQO presente en lixiviados sobre carbón activado.

### 2.3.8. Cinética de la adsorción.

El estudio de las isotermas de adsorción nos permite determinar para un sistema soluto-adsorbente dado, el grado de separación que puede ser logrado y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del soluto. (Ochoa, 2015)

Sin embargo, para el desarrollo del modelo de la adsorción es necesario poder establecer, mediante el empleo de coeficientes de transferencia de masa, la velocidad de la adsorción o el tiempo necesario para alcanzar una cierta separación. (Ochoa, 2015)

La cinética describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y determina el tiempo en que se alcanza el equilibrio (Murillo, Giraldo, & Moreno, 2013).

Los modelos de Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden se aplicaron en el estudio de adsorción de DQO en el CAG.

- Modelo cinético de Pseudo primer orden (PPO).

El modelo cinético de Pseudo primer orden ha sido ampliamente utilizado para predecir la cinética de adsorción. El modelo dado por Lagergren es definido como

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (q_e - q) \quad [1]$$



Integrando la ecuación 1 con respecto a las condiciones límites  $q = 0$  a  $t = 0$  y  $q = q_e$  a  $t = t$ , se obtiene

$$\log(q_e - q) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2,303} t \quad [2]$$

Donde  $k_1$  es la constante velocidad de adsorción de Lagergren ( $\text{min}^{-1}$ );  $q_t$  y  $q_e$  son las cantidades de DQO adsorbido a un tiempo  $t$  y en el equilibrio respectivamente,  $t$  (min). (Murillo, Giraldo, & Moreno, 2013)

- Modelo cinético de Pseudo segundo orden (PSO).

La ecuación de Pseudo segundo orden basado en la adsorción de equilibrio se expresa como

$$\frac{dq}{dt} = k_2 (q_e - q)^2 \quad [3]$$

Separando las variables de la ecuación [3] se llega a

$$\frac{dq}{(q_e - q)^2} = k_2 dt \quad [4]$$

Integrando la ecuación [4] con respecto a las condiciones límites  $q = 0$  a  $t = 0$  y  $q = q_e$  a  $t = t$ , se obtiene:

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad [5]$$

Donde  $k_2$  es la constante de velocidad de Pseudo segundo orden ( $\text{g/mg/min}$ );  $q_t$  y  $q_e$  son las cantidades de DQO adsorbido a un tiempo  $t$  y en el equilibrio, respectivamente. (Murillo, Giraldo, & Moreno, 2013)

	Ecuación	Graficar
<b>PSO</b>	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	$\frac{t}{q_t}$ vs. $t$
<b>PPO</b>	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	$q_t$ vs. $t$

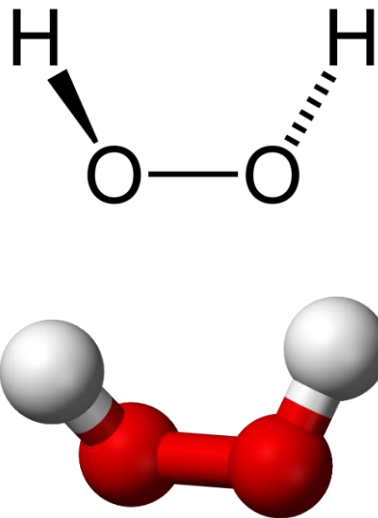
**Tabla 5.** Ecuaciones modelos cinéticos.

**Fuente.** (Guardiola, 2014).



### 2.3.9. Peróxido de Hidrogeno.

El peróxido de hidrógeno [ $H_2O_2$ ], también conocido como agua oxigenada, dioxigeno o dioxidano, es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que ésta. Es conocido por ser un poderoso oxidante.



**Figura 7.** Peróxido de Hidrogeno

- Propiedades Del Peróxido De Hidrogeno o Agua Oxigenada.

El agua oxigenada [ $H_2O_2$ ] es un líquido claro, incoloro, inorgánico con un pH ácido. Debido a la solubilidad completa del peróxido de hidrógeno en agua, se pueden hacer muchas soluciones con un amplio intervalo de concentraciones. La cantidad de [ $H_2O_2$ ] presente se expresa como un porcentaje del peso de las soluciones.

En condiciones normales, el peróxido de hidrógeno es extremadamente estable con pérdidas demostradas de menos del 1% al año en condiciones ambientales. El calor y el oxígeno se generan durante la descomposición del peróxido e incluso una descomposición anormal es fácilmente manejable por sistemas de almacenamiento diseñados adecuadamente.



Sin embargo, si se produce una grave contaminación o la solución se calienta a temperaturas extremadamente altas, los dispositivos de descompresión pueden no ser capaces de disipar el volumen de gas generado y el sistema puede ser demasiada presión.

El agua oxigenada no se considera explosiva, pero los vapores explosivos se pueden formar cuando el peróxido se mezcla con ciertos materiales orgánicos. Además, el agua oxigenada no es inflamable, pero se generan grandes cantidades de oxígeno durante la descomposición que mantiene la combustión. (Agua Oxigenada, 2012)

Muchas sustancias orgánicas no son biodegradables, así que deben ser tratadas químicamente. Un oxidante muy potente es una mezcla de agua oxigenada y sales de hierro, conocido como reactivo de Fenton. Al procesar los efluentes a través de este proceso, se crea una mezcla de compuestos orgánicos que es biológicamente menos peligroso y puede ser bio-degradado en otros procesos.

Últimamente, los procesos de activación de agua oxigenada más habituales son por luz ultravioleta (UV). Este procedimiento es particularmente adecuado para la oxidación de sustancias orgánicas en los lixiviados de los vertederos de basura y para el desglose de tintes orgánicos y decoloración de efluentes textiles. Con éxito se puede descomponer un número de compuestos persistentes y estables y orgánicas tóxicas, que también incluyen los pesticidas. (Agua Oxigenada, 2012)



### 3. OBJETIVOS Y ALCANCE.

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la cinética de la adsorción en carbón activado granular (CAG) para la remoción de la DQO presente en el lixiviado maduro y lixiviado maduro pre-tratado con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] mediante la implementación de un experimento tipo batch.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar el tipo de carbón activado granular (CAG) que obtenga los mejores resultados en el experimento de adsorción de la DQO en el lixiviado a tratar por medio de una isoterma de adsorción, el cual será utilizado en el experimento final de la cinética.
- Determinar por medio de ensayos de residual de peróxido la dosis optima de Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] a utilizar en el pre-tratamiento del Lixiviado.
- Determinar a través del análisis de los resultados experimentales obtenidos en el experimento tipo batch, el modelo cinético que rige la adsorción de DQO del Lixiviado pre-tratado con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] en el Carbón Activado Granular (CAG)
- Determinar el modelo cinético que rige la adsorción de DQO del Lixiviado sin pre-tratamiento en Carbón Activado Granular (CAG) a través del análisis de los resultados experimentales obtenidos en el experimento tipo batch.
- Establecer la influencia que tiene el pre-tratamiento con Peróxido de Hidrogeno [ $H_2O_2$ ] respecto al lixiviado sin pre-tratar en la cinética de remoción de DQO.



### 3.3. ALCANCE Y LIMITACIONES

El propósito de esta investigación es evaluar la cinética de una de las tantas alternativas que se pueden utilizar para el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario loma de los cocos, dicha alternativa es el tratamiento con columnas de carbón activado. Este proyecto se ha dividido en dos componentes al momento de su desarrollo, estos son el componente investigativo y el componente experimental.

El componente investigativo consiste en la recolección, sistematización y análisis de la información competente con el tema, relacionadas con la cinética del carbón activado en el tratamiento de lixiviados producidos en los rellenos sanitarios de diferentes partes del mundo y lo efectivo que esto ha llegado a ser.

Por otro lado, el componente experimental consiste en la ejecución de lo investigado a una escala de laboratorio, con la implementación de un experimento tipo batch. En este componente se trabaja el reconocimiento del lixiviado, para este proyecto se tienen en cuenta un parámetro que es la DQO. Se trabajará con el Carbón activado granular, su comportamiento y el cálculo de la eficiencia en remoción del DQO del lixiviado como tratamiento físico. Para obtener estos datos se realizaran ensayos en el Laboratorio de Sanitaria de la Universidad de Cartagena, con el apoyo del Grupo de Investigación y Modelación Ambiental (GIMA), el cual será ejecutado en el primer periodo académico del año 2015.

Esta investigación no cubre la medición de la biodegradabilidad, tampoco cubre el diseño de las columnas de carbón activado utilizadas para el tratamiento en campo del lixiviado ni tiempo de agotamiento de las columnas.

Las variables que se puedan presentar a lo largo de este experimento pueden presentarse en el momento de la toma de las muestras, debido a que la concentración del lixiviado puede ser distinta dependiendo de la época del año, ya que las aguas lluvias pueden alterar la dilución del lixiviado.







## 4. METODOLOGÍA.

Para lograr los objetivos establecidos en este proyecto de investigación experimental se llevara a cabo la recopilación de información secundaria y primaria.

### 4.1. INFORMACION SECUNDARIA

Para la recopilación de la información se han utilizado diferentes fuentes de información, dentro de las cuales se encuentran:

- Base de Datos virtual de la universidad de Cartagena.
- Revistas Especializadas en Saneamiento Ambiental.
- Revistas Científicas Multidisciplinarias.
- Documentos de Sitios Web Especializados en Medio Ambiente.

La recolección de la información está enfocada a la caracterización de los lixiviados del relleno sanitario localizado en la ciudad de Cartagena, investigaciones en los procesos de adsorción de contaminantes a través de CAG, en los tratamientos de lixiviados por medio de oxidación avanzada y adsorción por CAG.

La información obtenida dentro de la investigación estará a la disposición de nuevas investigaciones para constituir el estado del arte del proyecto y para analizar los parámetros de los lixiviados, la capacidad de adsorción del CAG, y la cinética de adsorción del CAG con lixiviados maduros.

### 4.2. INFORMACION PRIMARIA

La información secundaria se recopilará siguiendo lo establecido en los siguientes pasos:

#### 4.2.1. Paso 1. Caracterización del lixiviado.

Para la identificación del lixiviado se pidió una muestra de las piscinas de almacenamiento de lixiviado del relleno sanitario *Loma de los Cocos* de la ciudad de Cartagena y se revisan los siguientes parámetros:



Parámetro	Método	Referencia
Temperatura	N/A	N/A
Ph	Electrométrico	Standard Methods 4500 H+B
DQO	Espectrométrico	Standard Methods 5220 C

**Tabla 6.** Parámetros examinados en el Lixiviado.

#### 4.2.2. Paso 2. Determinación de isoterma de adsorción.

El isoterma de adsorción se implementó para determinar con anterioridad cual comportamiento que tendrá el carbón activado en la adsorción del DQO y para observar cual es el modelo que describe más acertadamente el proceso del sistema.

El CAG utilizado para las pruebas tienen las siguientes Propiedades:

	Clarimex CAGR-B (CAG1)	Filtrisorb 400 (CAG2)
Numero de Yodo, mg I <sub>2</sub> /g	950	1000
Humedad por peso, %	2	2
Tamaño efectivo, mm	1.3	0.75
Área superficial método N <sub>2</sub> BET, m <sup>2</sup> /g	1050	---
Número de abrasión	88	75
Densidad aparente, g/cc	0.47	0.54
Diámetro de poro, A	30	---
Granulometría	8X30	12X40

**Tabla 7.** Propiedades del carbón activado granular utilizado en los experimentos.

Los experimentos que se deben realizar para el estudio de isotermas consiste en agregar cantidades crecientes de CAG a 4 beakers con 500 ml de lixiviado cada uno y luego de 24 horas de agitación controlada (100 rpm) se midió la DQO final por duplicado.

Para esta prueba se aplicó el siguiente procedimiento:

- Se agregó 500ml de lixiviado sin pre-tratamiento y sin dilución en 4 recipientes reactores (beackers) de 1000ml. Los recipientes deben ser previamente identificados como muestra del 0 al 4, siendo 0 la muestra inalterada, con el fin de facilitar su manipulación.



- b) Se agitó suavemente los recipientes para homogeneizar la muestra.
- c) Se adicionó a los 4 recipientes dosificaciones crecientes de CAG, en el recipiente 1 se adicionó 3 gramos, en el recipiente 2 se adiciono 5 gramos, al recipiente 3 se adiciono 15 gramos y al recipiente 4 se adiciono 30 gramos. El recipiente 0 no se adiciona ya que es la muestra inalterada.
- d) Se agitó la mezcla a 100 rpm durante 24 horas para asegurar obtener el equilibrio de las fases.
- e) Se separó las fases por filtración.
- f) Se analizó la fase líquida para obtener los valores residuales de DQO, este análisis se realizó por duplicado.

Después de haber obtenido los resultados de DQO se hace un promedio entre la DQO1 y la DQO2 (duplicado), con el resultado obtenido en el promedio, se ajustaron los datos experimentales a los modelos matemáticos de isoterma propuesto por Langmuir, Freundlich y B.E.T (*Brunauer, Emmett y Teller*).

Para el carbón activado que obtuvo mejor comportamiento, se repitió la prueba para corroborar la información y generar el duplicado.

#### **4.2.3. Paso 3. Pruebas para Pre-Tratamiento de lixiviado con Peróxido.**

El objetivo de este paso es determinar la concentración optima de peróxido de hidrogeno que permita disminuir en mayor grado la DQO en el Lixiviado y a su vez determinar el efecto de la concentración residual de peróxido de hidrogeno [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] sobre el incremento de la DQO.

- En primer lugar se realizaron experimentos variando la concentración de peróxido de hidrogeno en 1000mL de lixiviado, se usaran concentraciones entre 500 ppm y 10.000 ppm.
- Para cada experimento se determinó la concentración de peróxido de hidrogeno [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] residual y la DQO de la muestra sometidas a agitación controlada de 50 rpm luego de 30 min, 60 min y 90 min, donde corresponda.



- Se realizó una curva comparativa donde se prepararan soluciones de  $[H_2O_2]$  en agua destilada con concentraciones entre 200 ppm y 10000 ppm, y se medirá la DQO de cada una de ellas; con esta información se establecerá una correlación que nos permita cuantificar la equivalencia entre el residual de  $[H_2O_2]$  y el incremento de la DQO. Finalmente se corrigió la DQO con los resultados de residual de peróxido previamente comparado con una curva de concentración de  $[H_2O_2]$  vs DQO.

#### 4.2.4. Interferencia del residual de peróxido en la medición de la DQO

La presencia de  $H_2O_2$  altera la medición de la DQO porque consume el agente de oxidación (Lee, Lee, Kim, Sohn, & Lee, 2011). Para corregir este efecto en los análisis de la DQO se prepararon soluciones de  $H_2O_2$  variando la concentración desde 100 mg/l hasta 4000 mg/l en agua destilada y se midió la DQO, este experimento fue realizado por duplicado y la muestra patrón fue estandarizada mediante titulación yodométrica.

<b>Volumen</b>	<b>300</b>	<b>mL</b>
<b>Concentración</b>	10000	Ppm
<b>Cant peroxido</b>	5,08	mL

#### ENSAYO 1

<b>N° Recipiente</b>	<b>Volumen muestra, mL</b>	<b>Volumen sol patron mL</b>	<b>[H2O2] ppm</b>	<b>DQO, mg/L</b>
<b>1</b>	60	0,60	100	50
<b>2</b>	60	1,80	300	106
<b>3</b>	60	3,60	600	188
<b>4</b>	60	6,00	1000	236
<b>5</b>	50	7,50	1500	442
<b>6</b>	50	10,00	2000	730
<b>7</b>	50	12,50	2500	991
<b>8</b>	50	15,00	3000	1377
<b>9</b>	50	17,50	3500	1428
<b>10</b>	50	20,00	4000	1577

**Tabla 8.** Ensayo de inferencia de residual de  $[H_2O_2]$ .



DUPLICADO

N° Recipiente	Volumen muestra, mL	Volumen sol patron mL	[H2O2] ppm	DQO, mg/L
1	60	0,60	100	57
2	60	1,80	300	120
3	60	3,60	600	330
4	50	5,00	1000	445
5	50	7,50	1500	660
6	50	10,00	2000	788
7	50	12,50	2500	1228,5
8	40	12,00	3000	1643
9	40	14,00	3500	1759
10	40	16,00	4000	2132

**Tabla 9.** Duplicado de ensayo de inferencia de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

**4.2.5. Paso 4. Determinación de Cinética del CAG con lixiviado solo y lixiviado pre-tratado.**

Para el proceso de adsorción, un análisis de los datos cinéticos es importante porque la cinética describe la tasa de adsorción del contaminante (adsorbato), lo que a su vez controla el tiempo de residencia en la interfaz de adsorbente-solución. (Lin & Wang, 2009)

Para determinar la cinética de carbón activado en lixiviado solo y lixiviado pre-tratado se hace un experimento parecido al que se hizo para determinar la isoterma de adsorción, esto con el fin de determinar la influencia del pre-tratamiento con peróxido de hidrogeno en la remoción de DQO del lixiviado.

- a) Se agregaron 2000ml de lixiviado (lixiviado solo o pre-tratado dependiendo del experimento que se vaya a tratar) en 2 recipientes reactores (beackers) de 2000ml. Los recipientes deben ser previamente identificados para facilitar su manipulación.
- b) Se agitaron suavemente los recipientes para homogeneizar la muestra.



- c) En un recipiente se adicionó lixiviado pre-tratado con peróxido de hidrogeno según los resultados obtenidos en los experimentos de pre-tratamiento y la dosis de CAG que mejor resultado generó del experimento de la Isoterma.
- d) En el otro recipiente se adicionó lixiviado sin tratar con la dosis de CAG que mejor resultado generó del experimento de la Isoterma.
- e) La mezcla se agitó a 50 rpm y tomar muestras de 20ml en intervalos de tiempo preestablecidos, las cuales deben ser filtradas antes de medir DQO, esto se realizará hasta que el resultado no varíe o varíe muy poco (Concentración de Equilibrio).

Se tomaron 2 muestras de 2000ml de lixiviado, una de ellas se dejó inalterada y a la otra se le adicionó una solución de peróxido de hidrógeno de 17 ml para llegar hasta una concentración de 5000 ppm. Luego de haber pre-tratado el lixiviado, se le añade 90 gramos de CAG. Posteriormente las muestras fueron sometidas a agitación controlada de 50 rpm y se realizaron análisis de DQO luego de 10 min, 20min, 30 min, 45min, 60 min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 7 horas, 24 horas, 26 horas, 30 horas y 48 horas en cada caso.

En cada caso se determinó la cantidad de DQO adsorbido en el tiempo t de acuerdo a la siguiente expresión:

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m_{CAG}}$$

Donde  $C_0$  corresponde a la DQO inicial (mg/L),  $C_t$  corresponde a la DQO (mg/L) obtenida en el tiempo t,  $m_{CAG}$  corresponde a la cantidad adicionada de CAG (g), y finalmente  $q_t$  es la DQO adsorbida por gramo de carbón activado (mg/L/g).

Los resultados obtenidos  $q_t$  vs Tiempo de contacto se compararon en ambos casos con los modelos cinéticos de Pseudo-primero orden (PPO) y Pseudo-segundo orden (PSO) propuestos por Lagergren y Blanchard, respectivamente. Y vemos la influencia que tiene el pre-tratamiento con  $[H_2O_2]$  ante la remoción de DQO.



#### **4.2.6. Paso 5: Análisis de la información.**

Después de haber hecho los experimentos correspondientes para la isoterma de adsorción, la cinética del carbón activado y la cinética con el lixiviado pre-tratado con peróxido de hidrogeno, se comparan los resultados dados para determinar la influencia del peróxido de hidrogeno en la cinética.

Para comparar los resultados se realiza una gráfica donde se superponen las gráficas de la cinética en el tratamiento de lixiviado con carbón activado y pre-tratado con peróxido de hidrogeno, esto nos muestra cuál de los tratamientos fue más efectivo al momento de descontaminar la muestra y aumentarle la biodegradabilidad.

Estos resultados se analizan detalladamente y se mira cual es la manera de optimizar la operación de remoción de DQO con el carbón activado determinando el tiempo óptimo de contacto del CAG con el DQO y si es ideal el pre-tratado o si no lo es.

Esta optimización del tiempo es ideal para la construcción de las columnas de carbón activado al momento de la ejecución del proyecto en el relleno sanitario loma de los cocos, ya que con esto se calcula el tiempo de contacto necesario para llegar al punto de descontaminación deseado, y con eso, la altura de estas columnas. Así se evita el desperdicio de materiales y se economiza el proyecto total.





## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO.

En la Tabla 8 se muestra la caracterización realizada al lixiviado tomado de las piscinas del relleno sanitario loma de los cocos de la ciudad de Cartagena, el cual fue llevado en 5 tanques de 60 litros a los laboratorios de sanitaria de la Universidad de Cartagena por la empresa operadora Caribe Verde S.A. E.S.P. en Agosto de 2014.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desv, standard
<i>DQO, mg/L</i>	10537	9928	10149	10204.7	308.3
<i>pH</i>	7.93	7.92	7.93	7.93	0.01
<i>Temperatura, °C</i>	29	29	29	29	0.00

**Tabla 10.** Características del lixiviado sin tratamiento.

Como se puede observar en la Tabla 8, los valores de DQO son bastante altos teniendo en cuenta que el tiempo de funcionamiento que lleva el Relleno Sanitario es aproximadamente de diez (10) años (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015), ya que de acuerdo a (Hernández, 2010), el rango de la DQO en Rellenos Sanitarios de esa edad son menores a 3 g/L. Los Valores de pH si corresponden a la edad del lixiviado, ya que es mayor a 7.5 y está en el rango establecido por (Hernández, 2010).

### 5.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.

Con el objetivo de determinar el tipo de carbón activado granular (CAG) que obtenga los mejores resultados en el experimento de adsorción de la DQO en el lixiviado a tratar, se realizó los experimentos de isotermas.

- Experimento 1 – CAG1.

Muestra	m, g de GAC1	DQO inicial, (mg/L)	DQO final 1, (mg/L)	DQO final 2, (mg/L)	DQO final, prom. (mg/L)	X, g de DQO absorbida	X/m
<b>0</b>	0.00	10204.7	10204.7	10204.7	10204.7	0.00	0.00
<b>1</b>	3.00	10204.7	7148	6615	6881.5	1.66	0.55
<b>2</b>	5.00	10204.7	6267	6008	6137.5	2.03	0.41
<b>3</b>	15.00	10204.7	3209	3359	3284.0	3.46	0.23
<b>4</b>	30.00	10204.7	2679	2956	2817.5	3.69	0.12

**Tabla 11.** Resultados Experimentales Clarimex CAGR-B.



- Experimento 2 – CAG2.

Muestra	m, g de GAC2	DQO inicial, (mg/L)	DQO final 1, (mg/L)	DQO final 2, (mg/L)	DQO final, (mg/L)	X, g de DQO absorbida	X/m
0	0.00	10204.7	10204.7	10204.7	10204.7	0.00	0.00
1	3.00	10204.7	9492	9117	9304.5	0.45	0.15
2	5.00	10204.7	9487	8872	9179.5	0.51	0.10
3	15.00	10204.7	8168	8545	8356.5	0.92	0.06
4	30.00	10204.7	6415	6415	6415.0	1.89	0.06

**Tabla 12.** Resultados Experimentales Filtrasorb 400.

- Experimento 3 – CAG1 (Duplicado).

Muestra	m, g de GAC1	DQO inicial, (mg/L)	DQO final 1, (mg/L)	DQO final 2, (mg/L)	DQO final, (mg/L)	X, g de DQO absorbida	X/m
0	0.00	10204.7	10204.7	10204.7	10204.7	0.00	0.00
1	3.00	10204.7	7746	7380	7563.0	1.32	0.44
2	5.00	10204.7	5819	6109	5964.0	2.12	0.42
3	15.00	10204.7	3447	3389	3418.0	3.39	0.23
4	30.00	10204.7	2951	3131	3041.0	3.58	0.12

**Tabla 13.** Resultados Experimentales Clarimex CAGR-B (Duplicado).

### 5.2.1. Correlación de isothermas.

Los datos experimentales se ajustaron con respecto a los modelos isotérmicos propuestos por Freundlich, Langmuir y B.E.T. Los resultados arrojan que la muestra, ya que la DQO inicial es bastante alta, presenta una mayor afinidad hacia el modelo de Freundlich y en su orden a juzgar por los coeficientes de correlación es el siguiente:

- Freundlich > Langmuir > B.E.T.

**Modelo de Freundlich:**  $X = m * K * DQO^{1/n}$

**Modelo de Langmuir:**  $X = m * \left[ \frac{K * DQO}{1 + K * DQO} \right]$

**Modelo de B.E.T.:**  $X = m * \left[ \frac{K * DQO}{\left(1 - DQO/c_s\right) \cdot \left(1 + K * DQO - DQO/c_s\right)} \right]$



	Freundlich		Langmuir		B.E.T.	
	Error	R	% Error	r	% Error	r
CAG 1	0.97	0.947	2.45	0.915	8.29	0.804
CAG 1*	1.31	0.927	2.52	0.904	7.31	0.811
CAG 2	0.10	0.980	0.11	0.976	0.22	0.219

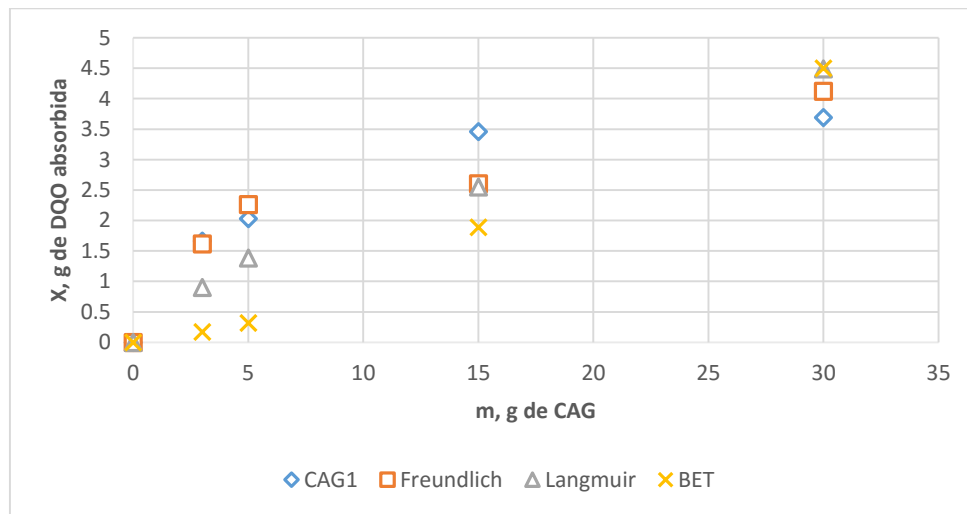
**Tabla 14.** Ajustes Modelos Isotérmicos.

Se observa que el ajuste con el modelo de B.E.T. presenta poca afinidad con respecto a los datos experimentales mientras que para los modelos de Freundlich y Langmuir los coeficientes de correlación son mayores y cercanos entre sí.

- Grafica DQO adsorbida vs masa de CAG1 (X vs m) – Experimento 1.

m, g	X, Experimental	Freundlich	Langmuir	B.E.T.
		X, calc	X, calc	X, calc
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.000	1.662	1.618	0.902	0.169
5.000	2.034	2.263	1.387	0.318
15.000	3.460	2.605	2.554	1.890
30.000	3.694	4.121	4.492	4.502

**Tabla 15.** Relación DQO adsorbida – Masa de carbón activado.



**Grafica 1.** Relación DQO adsorbida – Masa de carbón activado.

Con estos resultados se asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. También en esta isoterma se considera que no existen interacciones laterales entre las



moléculas adsorbidas y que debido a su alto DQO inicial se adsorbe en manera de multicapa. (Lazo, Navarro, Sun-Kou, & Llanos, 2008)

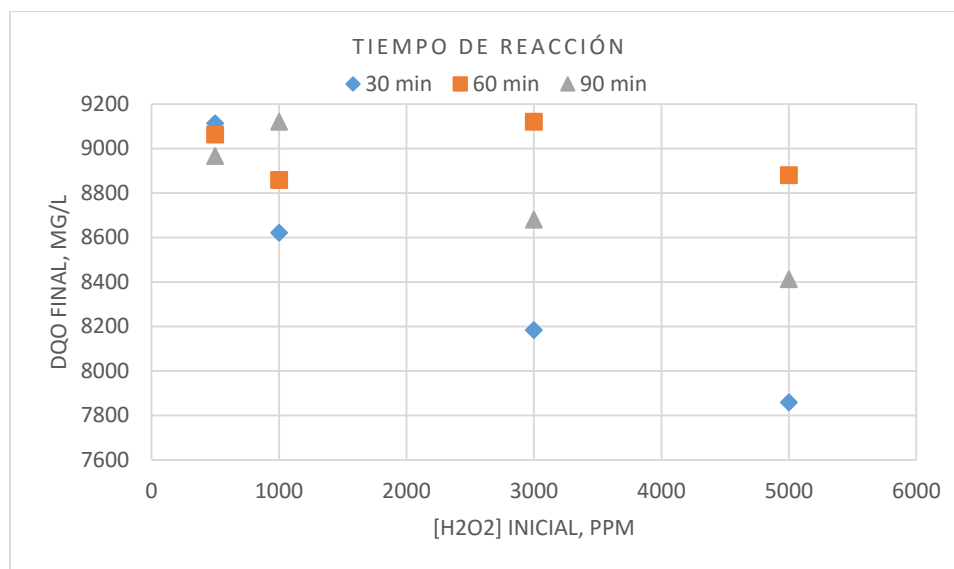
### 5.3. RESULTADOS PRE-TRATAMIENTO CON PEROXIDO DE HIDROGENO [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

#### 5.3.1. Ensayo 1.

Se tomaron 3 muestras de 1000ml de lixiviado, a las cuales se adiciono solución de peróxido de hidrógeno hasta una concentración de 500 ppm, 1000 ppm, 3000 ppm y 5000 ppm. Posteriormente las muestras fueron sometidas a agitación controlada de 50 rpm y se realizaron análisis de DQO luego de 30 min, 60 min y 90 min en cada caso y se observa el porcentaje de remoción de la DQO con respecto a la concentración inicial.

<i>Ensayo 1</i>		DQO inicial = 9652				
<i>[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>], ppm</i>	DQO mg/L			Remoción DQO, %		
	30 min	60 min	90 min	30 min	60 min	90 min
500	9113	9063	8966	5,6	6,1	7,1
1000	8621	8858	9120	10,7	8,2	5,5
3000	8183	9120	8680	15,2	5,5	10,1
5000	7858	8880	8413	18,6	8,0	12,8

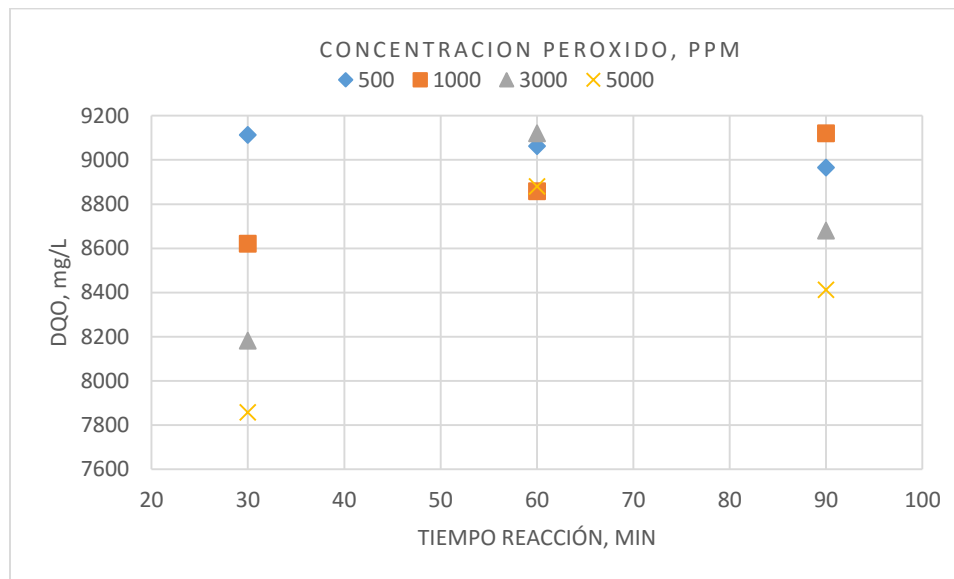
**Tabla 16.** Remoción DQO respecto al tiempo y concentraciones de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (500ppm – 5000ppm).



**Grafica 2.** Relación entre Concentración Final de DQO y [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].



En la Grafica 2 se puede apreciar que al incrementar la concentración inicial del peróxido desde 500 hasta 5000 ppm, es favorable para la reducción de materia orgánica. En este caso la muestra tratada con 5000 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> removi6 el 18.6% de la DQO inicial del lixiviado



**Grafica 3.** Relación entre Concentración Final de DQO y Tiempo de reacción.

Los tiempos de agitación establecidos para el experimento fueron de 30 min, 60 min y 90 min, los mejores resultados fueron obtenidos al cabo de 30 min, sin embargo, el comportamiento observado en la gráfica 3 no es lineal, por cuanto no se descarta la existencia de valores mínimos a tiempos de reacción superiores a 90 minutos.

### 5.3.2. Ensayo 2.

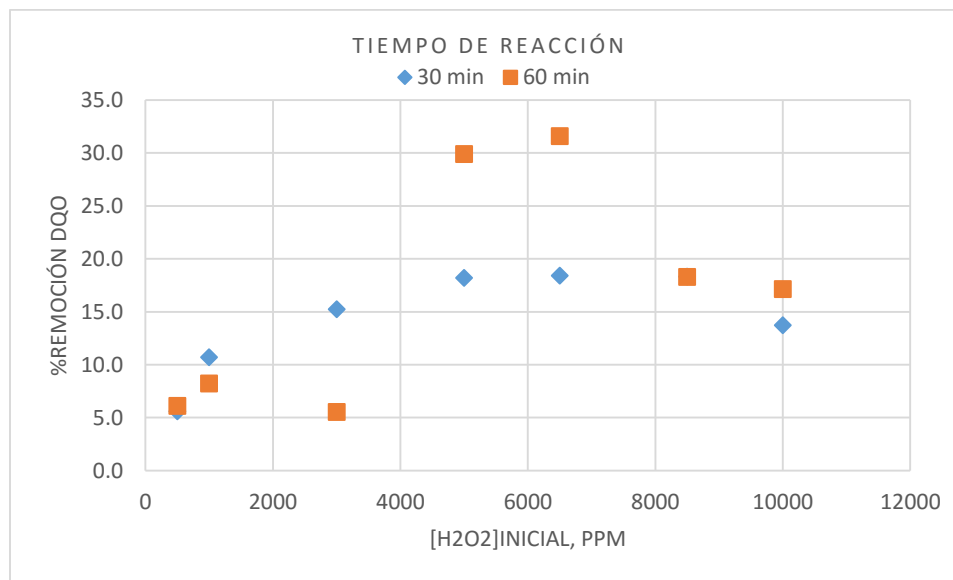
En el ensayo 1 se observa que al aumentar la concentración inicial del peróxido en el lixiviado desde 500 ppm hasta 5000 ppm, la tasa de remoción aumenta y en efecto se alcanzan los mejores resultados con 5000 ppm. Estos resultados no permiten inferir que 5000 ppm es la mejor puesto que no hay un máximo en el rango, lo anterior obligo a experimentar con mayores concentraciones de peróxido.



En el segundo ensayo se seleccionaron valores entre 5000 y 10000 ppm y se establecieron tiempos de reacción de 10, 20, 30 y 60 min, teniendo en cuenta también que los mejores resultados en el primer ensayo se obtuvieron en el tiempo menor de 30 min y se observa el porcentaje de remoción de la DQO con respecto a la concentración inicial.

[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ], PPM	DQO final mg/L				Remoción DQO, %			
	10 min	20 min	30 min	60 min	10 min	20 min	30 min	60 min
5000	8630	8420	7897	6766	10,6	12,8	18,2	29,9
6500	8571	8274	7875	6605	11,2	14,3	18,4	31,6
8500	8777	8467	7884	7887	9,1	12,3	18,3	18,3
10000	10042	8178	8329	7999	-4,0	15,3	13,7	17,1

**Tabla 17.** Remoción DQO respecto al tiempo y concentraciones de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (5000ppm – 10000ppm).



**Grafica 4.** Relación entre porcentaje de remoción de DQO y [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

La grafica 4 se obtuvo combinando los resultados obtenidos en los ensayos 1 y 2, en esta se puede observar claramente la existencia de los mejores % remoción cuando la



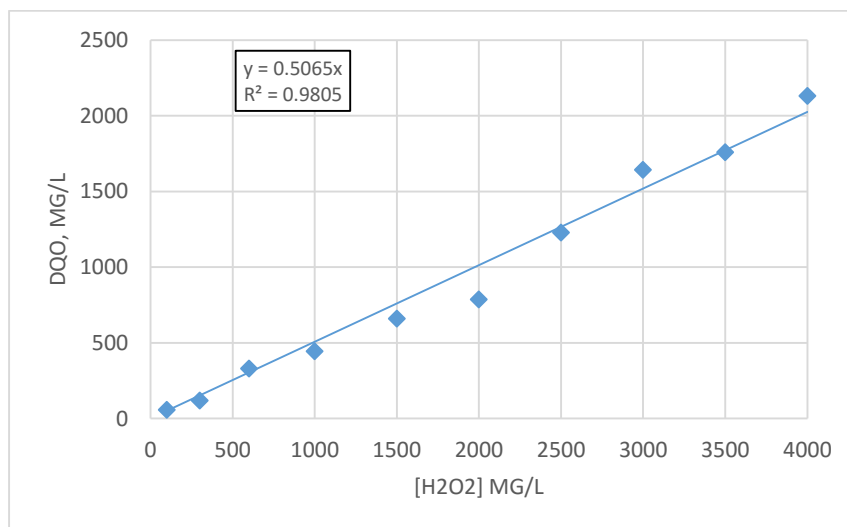
concentración inicial del peróxido de hidrógeno estuvo entre 5000 ppm y 6500 ppm. Valores de concentración de peróxido de hidrogeno superiores a 6500 ppm fueron menos efectivas, este comportamiento se puede explicar por la formación del radical hidroperoxilo  $HO_2$ , en la presencia de exceso de  $H_2O_2$  (Kurniawan & Lo, 2009).

### 5.3.3. Corrección de la interferencia del residual de $H_2O_2$ en la medición de DQO

La presencia de  $H_2O_2$  altera la medición de la DQO porque consume el agente de oxidación (Lee, Lee, Kim, Sohn, & Lee, 2011). Con el fin de corregir los resultados de los experimentos que implicaban la medición de DQO en presencia del residual de  $H_2O_2$  se realizaron los ensayos propuestos en el ítem 5.2.1. de la metodología, en donde se obtuvo una correlación lineal entre la concentración de  $H_2O_2$  y su medición de DQO. Ver Grafica 5.

$$DQO_{Corregido} = DQO_{Medido} - 0,5065 * [H_2O_2]_{residual}$$

Esto implica que por cada 1mg/l de  $H_2O_2$  en la muestra, se generó un incremento de a 0,5065 mg/l en la medición de DQO, resultados similares han sido obtenidos por Lee et al., 2011 quienes determinaron un incremento entre 0,5 y 0,58 mg de DQO por cada 1mg de  $H_2O_2$  en la muestra.



**Grafica 5.** Correlación entre  $[H_2O_2]$  e incremento de DQO



#### 5.4. RESULTADOS DE CINETICA DEL CAG CON LIXIVIADO SOLO Y LIXIVIADO PRE-TRATADO

En el momento del ejercicio, las mediciones de DQO se realizaron usando reactivos para DQO Hanna Instruments de rango medio (0 – 1500 mg/L). Las muestras de los lixiviados tomados durante el experimento de la cinética fueron diluidas a una relación de 1:5 utilizando agua destilada.

##### 5.4.1. Resultados experimentales.

- Tiempos de las muestras.

El experimento de la cinética de adsorción del carbón activado granular con lixiviado solo y con lixiviado pre-tratado con  $[H_2O_2]$  fue llevado a cabo entre las 10:14 AM del día Jueves 30 de Abril de 2015 hasta las 10:14 AM del día Sábado 2 de Mayo de 2015 en los laboratorios de la sanitaria de la universidad de Cartagena.

<i>Muestra</i>	Hora toma	t, (min)	<i>Muestra</i>	Hora toma	t, (min)
<i>0</i>	10:14	0	<i>8</i>	14:44	270
<i>1</i>	10:24	10	<i>9</i>	15:14	300
<i>2</i>	10:34	20	<i>10</i>	16:15	360
<i>3</i>	10:44	30	<i>11</i>	17:14	420
<i>4</i>	10:59	45	<i>12</i>	10:14	1440
<i>5</i>	11:14	60	<i>13</i>	12:14	1560
<i>6</i>	12:14	120	<i>14</i>	16:14	1800
<i>7</i>	13:14	180	<i>15</i>	10:14	2880

**Tabla 18.** Tiempo de toma de las muestras.

- Lixiviado con Pre-Tratamiento con  $[H_2O_2]$ .

En la tabla 17 observamos el experimento que se realizó con el lixiviado pre-tratado con peróxido de hidrogeno, teniendo en cuenta que las muestras tomadas fueron diluidas con agua destilada en una proporción de 1:5, ya que los reactivos necesarios para alto rango estaban agotados y se realizaron con rango medio. Debido a esto la DQO que se obtuvo fue





de solo 20% de la DQO real. También observamos que se tiene en cuenta la corrección de la DQO por el peróxido de hidrogeno y la concentración del oxidante.

Muestra	DQO Diluido	DQO Real	DQO Corregido, mg/L	$q_t$	Diluciones	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]	Remoción DQO, %
0	742	3710	3304.8	0.0	(1/20)x(1/10)	800	0.00
1	607	3035	2731.1	6.4	(1/10)x(1/20)	600	17.36
2	605	3025	2873.1	4.8	1/10x1/10	300	13.06
3	575	2875	2723.1	6.5	1/10x1/10	300	17.60
4	527	2635	2533.7	8.6	1/10x1/10	200	23.33
5	500	2500	2474.7	9.2	(1/25)	50	25.12
6	398	1990	1974.8	14.8	(1/10)	30	40.24
7	391	1955	1955.0	15.0	-	0	40.84
8	329	1645	1645.0	18.4	-	0	50.22
9	338	1690	1690.0	17.9	-	0	48.86
10	327	1635	1635.0	18.6	-	0	50.53
11	333	1665	1665.0	18.2	-	0	49.62
12	290	1450	1450.0	20.6	-	0	56.12
13	287	1435	1435.0	20.8	-	0	56.58
14	291	1455	1455.0	20.6	-	0	55.97
15	280	1400	1400.0	21.2	-	0	57.64

**Tabla 19.** Resultado DQO corregido para Lixiviado Pre-Tratado con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

- Lixiviado sin Pre-Tratamiento con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

Observamos en la tabla 18, el experimento que se realizó con el lixiviado sin pre-tratar con peróxido de hidrogeno, y similar al experimento con el lixiviado pre-tratado (tabla 17) se tiene en cuenta que las muestras tomadas fueron diluidas con agua destilada en una proporción de 1:5, ya que los reactivos necesarios para alto rango estaban agotados y se realizaron con rango medio. Debido a esto la DQO que se obtuvo fue de solo 20% de la DQO real.

Muestra	DQO Diluido	DQO Real	$q_t$	Remoción DQO, %
0	828	4140	0.0	0.00
1	674	3370	8.6	18.60
2	598	2990	12.8	27.78
3	543	2715	15.8	34.42
4	532	2660	16.4	35.75
5	480	2400	19.3	42.03
6	374	1870	25.2	54.83

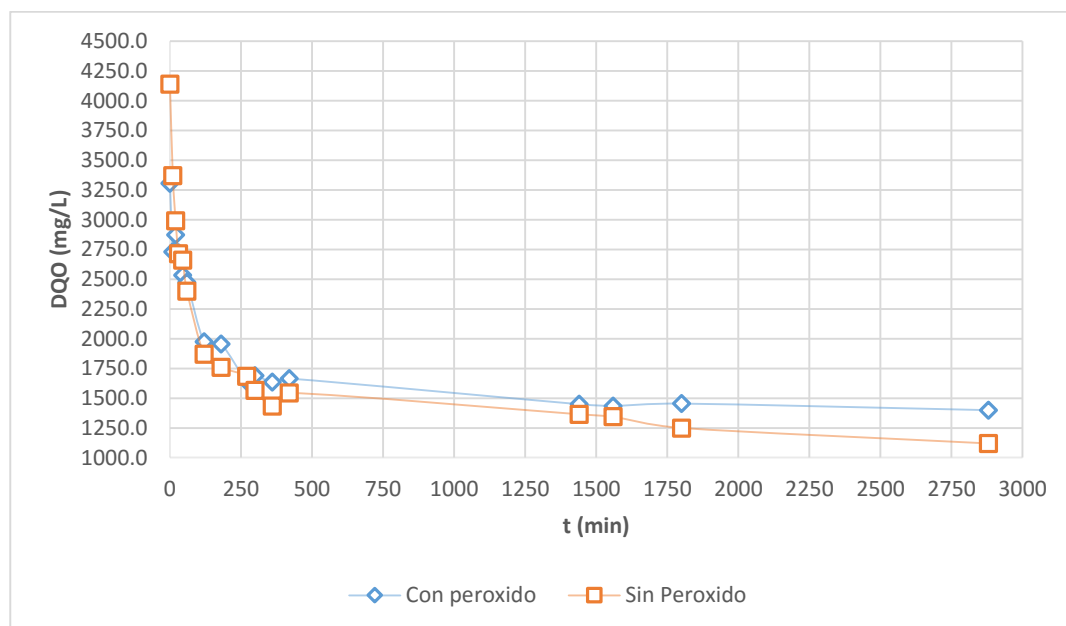


7	352	1760	26.4	57.49
8	337	1685	27.3	59.30
9	313	1565	28.6	62.20
10	287	1435	30.1	65.34
11	309	1545	28.8	62.68
12	273	1365	30.8	67.03
13	269	1345	31.1	67.51
14	250	1250	32.1	69.81
15	224	1120	33.6	72.95

**Tabla 20.** Resultado DQO para Lixiviado sin Pre-Tratamiento.

En la Tabla 17 observamos que se tiene una remoción total DQO en el lixiviado pre-tratado con  $[H_2O_2]$  es de 57.64% y en la Tabla 18 observamos que se tiene una remoción total DQO en el lixiviado sin pre-tratamiento de 72.95%.

Una Posible explicación para este comportamiento puede ser que el carbón activado granular en el lixiviado Pre-Tratado no solo adsorbe la DQO, si no también Peróxido de Hidrogeno, teniendo este una saturación más rápida. En cambio el lixiviado sin Pre-Tratar, al no tener otro adsorbato diferente a la DQO, la saturación fue más lenta, por ende se obtiene mayor remoción.



**Grafico 6.** Cinética experimental de remoción de DQO de lixiviados.



El experimento de la cinética nos facilita a tener un diagnóstico real del comportamiento de la adsorción del carbón activado granular y de un lixiviado particular dentro de un tiempo determinado y así podemos obtener una la DQO remanente o DQO residual deseada, ya sea para la calibración del efluente de los equipos de adsorción o para ser utilizado como pre-tratamiento arrojando una concentración del contaminante deseada.

De acuerdo al gráfico 5, se puede observar que a los 420 minutos (7 horas) se alcanza la concentración de equilibrio, tanto en el lixiviado pre-tratado como el lixiviado sin pre-tratamiento. También se observa que la diferencia entre los dos lixiviados es mínima, ya que los resultados a los 420 minutos (7 horas) es de una DQO de 1665 mg/L en el lixiviado con pre-tratamiento y de 1545 mg/L en el lixiviado sin pre-tratar.

Teniendo en cuenta este comportamiento se podría decir que, en este caso particular, es recomendable no realizar el pre-tratamiento, ya que los resultados arrojados son menos favorables e implica realizar experimentos adicionales, lo cual puede resultar más costoso, además requiere más tiempo.

#### **5.4.2. Análisis de Datos.**

Los datos experimentales se ajustaron con respecto a los modelos cinéticos de Pseudo-primer orden (PPO) y Pseudo-segundo orden (PSO) propuestos por Lagergren y Blanchard. Los resultados arrojan que las muestras presentan una mayor afinidad hacia el modelo de Pseudo-Segundo Orden (PSO) tanto en el lixiviado pre-tratado con peróxido de hidrogeno [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] como en el lixiviado solo. Se llega a esta conclusión cuando observamos los porcentajes de error arrojados en los ajustes a los modelos cinéticos.

Este experimento es útil en el diseño para determinar el tiempo de contacto mínimo del adsorbente con el contaminante necesario para obtener una concentración deseada en el efluente del equipo de adsorción.



- Análisis de Lixiviado Pre-Tratado con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (Pseudo-primer orden (PPO)).

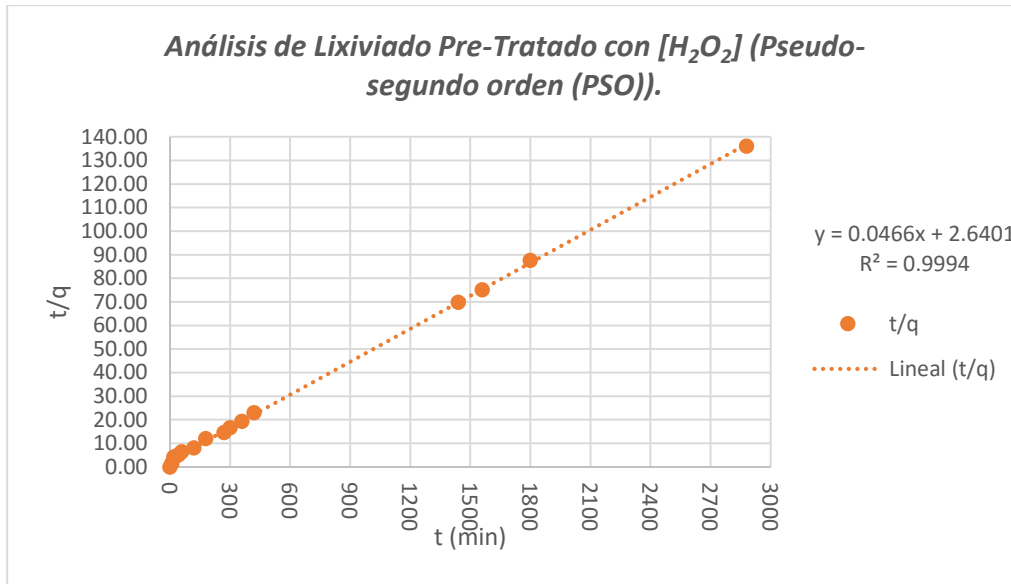
<i>Muestra</i>	<i>q<sub>t</sub></i>	<i>q<sub>t</sub> calc</i>	<b>ERROR</b>		
0	0.0	0	0		
1	6.4	17.9414107	11.5669662		
2	4.8	17.9422218	13.1449996	<b>qE</b>	17.9422218
3	6.5	17.9422218	11.478333	<b>K1</b>	1.00041729
4	8.6	17.9422218	9.37444406		
5	9.2	17.9422218	8.71861073		
6	14.8	17.9422218	3.16449962		
7	15.0	17.9422218	2.94444406		
8	18.4	17.9422218	0.50000038		
9	17.9	17.9422218	3.8023E-07		
10	18.6	17.9422218	0.61111149		
11	18.2	17.9422218	0.27777816		
12	20.6	17.9422218	2.66666705		
13	20.8	17.9422218	2.83333371		
14	20.6	17.9422218	2.61111149		
15	21.2	17.9422218	3.2222226		
<b>ERROR TOTAL</b>			<b>73.1145225</b>		

**Tabla 21.** Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PPO.

- Análisis de Lixiviado Pre-Tratado con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] (Pseudo-segundo orden (PSO)).

<i>Muestra</i>	<i>t/q<sub>t</sub></i>	<i>t/q<sub>t</sub> calc</i>	<b>ERROR</b>		
0	0.00	2.25882645	2.25882645		
1	1.57	2.72836767	1.15960351		
2	4.17	3.19790889	0.97117044	<b>qE</b>	21.2973846
3	4.64	3.66745011	0.97371878	<b>K2</b>	0.00097603
4	5.25	4.37176194	0.88047512		
5	6.51	5.07607378	1.42897065		
6	8.12	7.8933211	0.22701017		
7	12.00	10.7105684	1.29120961		
8	14.64	14.9364394	0.29612132		
9	16.72	16.3450631	0.37527379		
10	19.40	19.1623104	0.24121096		
11	23.05	21.9795577	1.07203391		
12	69.87	69.8727623	2.2893E-07		
13	75.09	75.507257	0.41901226		
14	87.58	86.7762463	0.80078905		
15	136.08	137.486698	1.40941976		
<b>ERROR TOTAL</b>			<b>13.804846</b>		

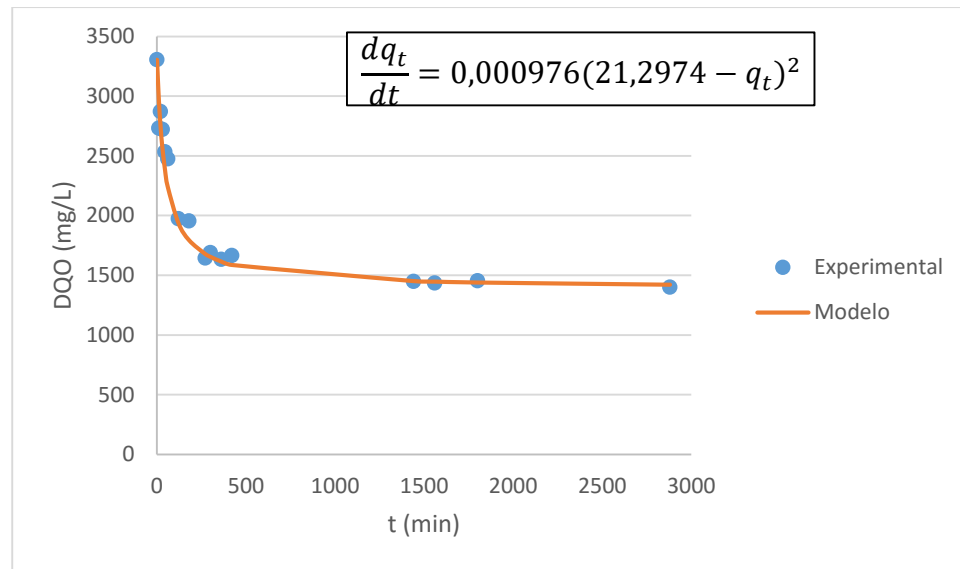
**Tabla 22.** Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PSO.



**Grafica 7.** Resultado Ajuste de Lixiviado Pre-Tratado al modelo PSO.

Como se puede observar, el error en el modelo cinético de Pseudo-Segundo Orden (PSO) el error fue menor, dando a entender que nuestra cinética es PSO.

- Modelo cinético Pseudo-Segundo Orden (PSO) Lixiviado con Pre-Tratamiento con [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].



**Grafica 8.** Comparación resultado experimental con Modelo cinético lixiviado Pre-Tratado.



- Análisis de lixiviado Sin Pre-Tratar (Pseudo-primer orden (PPO)).

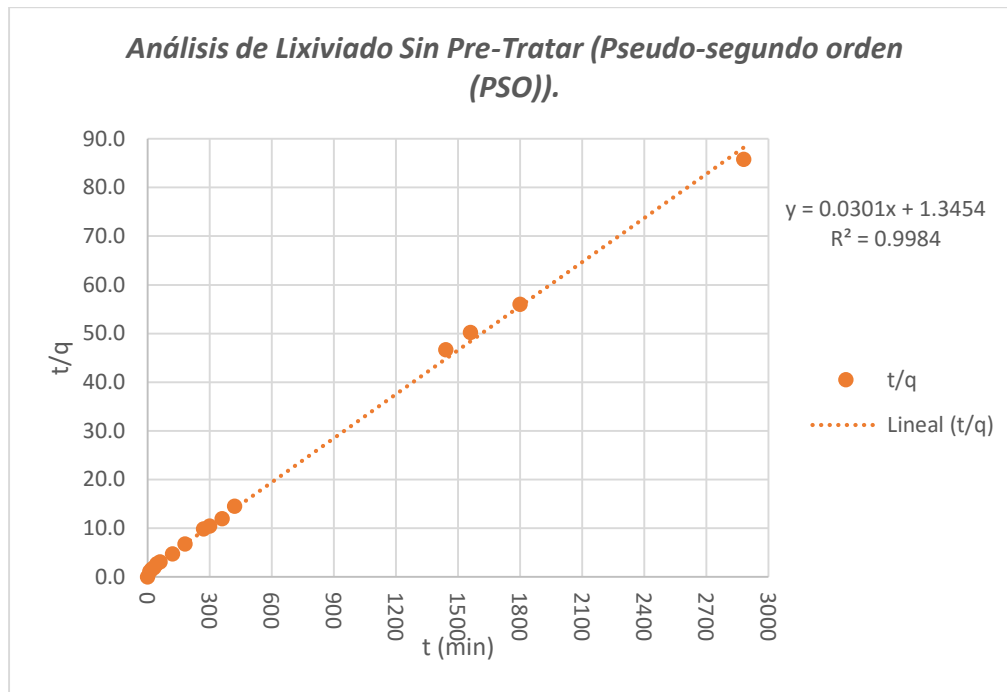
<i>Muestra</i>	$q_t$	$q_t$ calc	ERROR		
0	0.00	0	0		
1	8.56	27.2765478	18.7209922		
2	12.78	27.2777767	14.4999989	<b>qE</b>	27.2777767
3	15.83	27.2777767	11.4444434	<b>K1</b>	1.00076399
4	16.44	27.2777767	10.8333323		
5	19.33	27.2777767	7.94444341		
6	25.22	27.2777767	2.05555452		
7	26.44	27.2777767	0.8333323		
8	27.28	27.2777767	1.0364E-06		
9	28.61	27.2777767	1.33333437		
10	30.06	27.2777767	2.77777881		
11	28.83	27.2777767	1.55555659		
12	30.83	27.2777767	3.55555659		
13	31.06	27.2777767	3.77777881		
14	32.11	27.2777767	4.83333437		
15	33.56	27.2777767	6.27777881		
<b>ERROR TOTAL</b>			<b>90.4432164</b>		

**Tabla 23.** Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PPO.

- Análisis de Lixiviado Sin Pre-Tratar (Pseudo-segundo orden (PSO)).

<i>Muestra</i>	$t/q_t$	$t/q_t$ calc	ERROR		
0	0.0	1.27732801	1.27732801		
1	1.2	1.58165073	0.41281956		
2	1.6	1.88597344	0.32075605	<b>qE</b>	32.8598539
3	1.9	2.19029616	0.29555932	<b>K2</b>	0.00072505
4	2.7	2.64678023	0.08970625		
5	3.1	3.10326431	0.00018397		
6	4.8	4.92920061	0.17149135		
7	6.8	6.7551369	0.05158579		
8	9.9	9.49404135	0.40412566		
9	10.5	10.4070095	0.07842739		
10	12.0	12.2329458	0.25512694		
11	14.6	14.0588821	0.50759189		
12	46.7	45.0997992	1.60290354		
13	50.2	48.7516718	1.48088638		
14	56.1	56.055417	5.3632E-05		
15	85.8	88.9222703	3.09445575		
<b>ERROR TOTAL</b>			<b>10.0430015</b>		

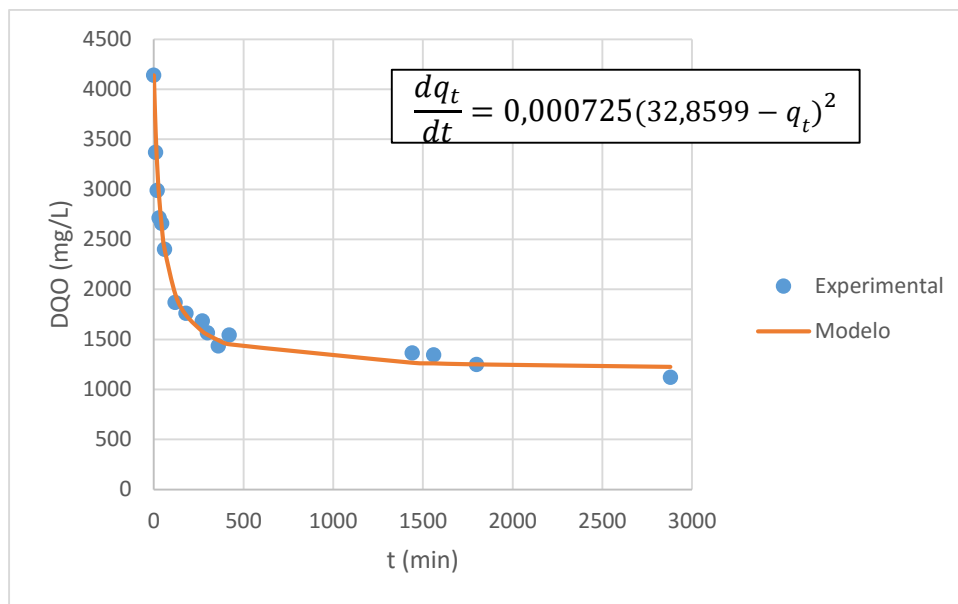
**Tabla 24.** Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PSO.



**Grafica 9.** Resultado Ajuste de Lixiviado sin Pre-Tratamiento al modelo PSO.

Como podremos observar, el error en el modelo cinético de Pseudo-Segundo Orden (PSO) el error fue menor, dando a entender que nuestra cinética es PSO.

- Modelo Cinético Pseudo-Segundo Orden (PSO) Lixiviado Sin Pre-Tratar.



**Grafica 10.** Comparación resultado experimental con Modelo cinético lixiviado sin Pre-Tratamiento.



## 6. CONCLUSIONES.

- El carbón activado CAGR de Clarimex obtuvo los mejores resultados en cuanto a capacidad de adsorción de DQO, alcanzando un máximo de 0.55 g de DQO adsorbida por g de CAG
- El modelo que presento mejor ajuste con respecto los datos experimentales para la adsorción de DQO presente en el lixiviado maduro fue el propuesto por Freundlich; esto se debe a que los resultados estimados y los obtenidos en el laboratorio fueron muy aproximados.
- El pretratamiento del lixiviado con peróxido de hidrogeno redujo en un 30% la DQO inicial del lixiviado y se determinó que la concentración optima fue de 5000 mg/L para este sistema al igual que el tiempo de reacción.
- La concentración final de DQO fue mayor en el lixiviado con pre-tratamiento de [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] que el lixiviado sin pre-tratamiento, a pesar que la DQO inicial del lixiviado pre-tratado fue menor, el CAG solo fue más efectivo debido a que en el tiempo de concentración de equilibrio (7 horas) la DQO fue de 1665 mg/L en el lixiviado con Peróxido mientras que en el lixiviado sin pre-tratamiento fue de 1545 mg/L.
- El modelo cinético que se ajustó con un margen de error menor para el lixiviado pre-tratado fue el modelo de Pseudo-Segundo Orden (PSO), con un error de un 13.80% y un coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) de 0.9994.
- El modelo cinético que se ajustó con un margen de error menor para el lixiviado sin pre-tratamiento fue el modelo de Pseudo-Segundo Orden (PSO), con un error de un 10.04% y un coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) de 0.9984.





## 7. RECOMENDACIONES.

Para la realización de futuras investigaciones en cuanto al lixiviado utilizado en las pruebas se recomienda que:

- Se haga una toma de muestras en diferentes épocas del año para observar la influencia que pueda tener las lluvias y la temperatura media en la concentración de DQO inicial del lixiviado.
- Se realice este experimento durante un periodo de tiempo predeterminado para observar la tendencia del lixiviado respecto al aumento o disminución de la DQO durante el proceso de maduración.
- Se realice este Experimento con otra unidad de medida más específica que la DQO.

En cuanto al uso de Peróxido de hidrogeno en el Pre-Tratamiento del lixiviado se recomienda que:

- Potenciar el poder oxidante del Peróxido de Hidrogeno [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] a través de la adición de hierro (FENTON) o luz ultravioleta (UV-[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>])
- La dosificación de peróxido de hidrogeno utilizada en el proyecto fue aplicación total de la cantidad requerida para la concentración optima, una sugerencia seria cambiar la manera de adicionar el peróxido durante el transcurso del tiempo requerido para el pre-tratamiento.
- Utilizar una bomba dosificadora al momento de adicionar el Peróxido de Hidrogeno [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>].

En cuanto al uso de carbón activado en el tratamiento de lixiviado se recomienda que:

- Se utilice otro tipo de carbón activado, ya sea de otra marca comercial con diferentes características físico-químicas y observar su comportamiento.



## 8. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

Agua Oxigenada. (2012). *aguaoxigenada.org*. Obtenido de Agua Oxigenada; Usos, propiedades, beneficios y riesgos: [www.aguaoxigenada.org](http://www.aguaoxigenada.org)

Apelsa CARBONES. (2004). *Apelsa Proveedores de Carbon activado en Mexico*. Obtenido de ¿Que es el Carbon Activado?: <http://www.carbonapelsa.com.mx/pages/spanish/carbonactivado.html>

Bansal, R. D. (1998). *Activated Carbon*. New York: Marcel Dekker.

Bodalo, A., Hidalgo, A., Gomez, M., Murcia, D., & Marin, V. (2007). TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO: TRATAMIENTO CONVENCIONALES. *INFOAMBIENTAL*, 8.

Caribe Verde S.A. E.S.P. (2008). *caribeverde.com*. Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de <http://www.caribeverde.com/>

Caribe Verde S.A. E.S.P. (2015). *Caribe Verde S.A. E.S.P.* Obtenido de [caribeverde.com](http://www.caribeverde.com): [www.caribeverde.com](http://www.caribeverde.com)

El Acuario Dulce. (14 de Mayo de 2010). *El carbón activado: Informe detallado del uso en nuestros acuarios*. Obtenido de [elacuariodulce.com](http://www.elacuariodulce.com): <http://www.elacuariodulce.com/t4481-el-carbon-activado-informe-detallado-del-uso-en-nuestros-acuarios>

Fernandez Yepes, J. J., & Torres Gil, L. K. (23 de 11 de 2012). Reducción de DQO y aumento del índice de biodegradabilidad de los lixiviados del relleno. *Proyecto de grado para optar al Título de INGENIERO CIVIL*. Cartagena, Bolivar, Colombia: Universidad de Cartagena.

Giraldo, E. (Noviembre de 2001). Tratamiento de Lixiviados de Rellenos sanitarios: Avances Recientes (Spanish). *Revista De Ingeniería*, 14, 44-55.



- Goyal, M., Bhagat, M., & Dhawan, R. (2009). Removal of mercury from water by fixed bed activated carbon columns. *Journal of Hazardous Materials*, 1009-1015.
- Guardiola, L. F. (2014). *Estudio de la Adsorción en Carbón Activado Granular de la Materia Orgánica Presente en Lixiviados Previamente Tratado Mediante Proceso de Oxidación Avanzada*. Universidad de Cartagena, Departamento de Postgrado. Cartagena: Facultad de Ingeniería.
- Hernández, J. J. (2010). *Eliminación de materia carbonada de residuos líquidos orgánicos municipales en un filtro anaerobio*. Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Mexico D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Kurniawan, T. A., & Lo, W.-h. (2009). Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment. *Water Research*, 43, 4079-4091.
- Kurniawan, T. A., Lo, W.-H., & Chan, G. Y. (2006). Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 443-455.
- Lazo, J., Navarro, A., Sun-Kou, M., & Llanos, B. (2008). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS ORGANOFÍLICAS Y SU APLICACIÓN COMO ADSORBENTES DEL FENOL. *Revista Sociedad Química*, 74(1), 3-19. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v74n4/a02v74n1.pdf>
- Lee, E., Lee, H., Kim, Y. K., Sohn, K., & Lee, K. (2011). Hydrogen Peroxide Interference in chemical oxygen demand during ozone based advanced oxidation of anaerobically digested livestock wastewater. *Sci. Tech*, 8(2), 381-388. Obtenido de <http://www.bioline.org.br/pdf?st11035>



- Lin, J., & Wang, L. (2009). Comparison between linear and non-linear forms of pseudo-first-order and pseudo-second-order adsorption kinetic models for the removal of methylene blue by activated carbon. *Front. Environ. Sci. Engin.*, 3(3), 320-324.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (2009). COMPARACIÓN DE CUATRO TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS DE LIXIVIADOS. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 133-145.
- Méndez Novelo, R. I., Medina Hernández, E., Quintal Franco, C., Castillo Borges, E. R., & Sauri Riancho, M. R. (SEPTIEMBRE - DICIEMBRE de 2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería*, 6(3), 19-27.
- Menendez, G. C., & Perez, O. J. (2008). *ADSORCION*. La Habana: Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverría.
- Murillo, Y., Giraldo, L., & Moreno, J. (2013). DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE 2,4-DINITROFENOL EN CARBONIZADO DE HUESO BOVINO POR ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS. *Revista Colombiana de Química*, 40(1), 91-104. Obtenido de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/23151/28390>
- Ocampo, R. L. (2010). Modeling adsorption rate of pyridine onto granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*(165), 133-141.
- Ochoa, S. H. (2015). Planta Piloto de Fermentaciones., (pág. 31). Iztapalapa, Mexico. Recuperado el 02 de 05 de 2015, de <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Adsorcion.pdf>
- Qui, H. L. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 10(5), 716-724.



Rivas, F. B. (2006). Adsorption of landfill leachates onto activated carbon: Equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*(B131), 170-178.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2011). *superservicios.gov.co*.  
Obtenido de [http://www.superservicios.gov.co/content/download/901/13765/version/1/file/\(2011\)+SITUACION+DE+LA+DISPOSICION+FINAL+DE+RESIDUOS+SOLIDOS+EN+COLOMBIA+-+DIAGNOSTICO+2011.pdf](http://www.superservicios.gov.co/content/download/901/13765/version/1/file/(2011)+SITUACION+DE+LA+DISPOSICION+FINAL+DE+RESIDUOS+SOLIDOS+EN+COLOMBIA+-+DIAGNOSTICO+2011.pdf)

TextosCientificos. (25 de Junio de 2006). *EL CARBÓN ACTIVO COMO ADSORBENTE*.  
Obtenido de [TextosCientificos.com: http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/adsorbente](http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/adsorbente)


TextosCientificos. (25 de Junio de 2006). *LOS MATERIALES ADSORBENTES*. Obtenido de [TextosCientificos.com: http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/materiales-adsorbentes](http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/materiales-adsorbentes)

Universidad de Barcelona. (s.f.). *Operaciones Basicas Laboratorio de Quimica*. Obtenido de [Precipitacion, Carbon Activado: http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio\\_carbo.html](http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio_carbo.html)



## ANEXOS.

### 1. Ficha técnica Carbón Activado Granular CLARIMEX CAGR-B

	<b>CARBON ACTIVADO CLARIMEX 061 CAE FICHA TECNICA</b>	Fecha elaboración: 13 dic 2010
		Fecha revisión:
		ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD
		Número de documento:
		Página 1 de 1

#### CARBON ACTIVADO CLARIMEX CAGR-B

Carbón Activado **CLARIMEX CAGR-B**, es un producto de alta calidad, fabricado a partir de hulla bituminosa, por medio de un proceso de activación con vapor. Por su alta dureza, el carbón Clarimex CAGR-B puede ser utilizado en columnas de lecho fijo o lecho móvil, con un mínimo de pérdidas durante los procesos de retro lavado y regeneración.

El carbón **CLARIMEX CAGR-B** cumple con los estándares de la **AWWA B 604**.

	Especificaciones		Propiedades Típicas	
	8 X 30	12 X 40	8 X 30	12 X 40
Humedad al empacar, %	4 máx.	4 máx.	2	2
pH	Alcalino	Alcalino	8	8
Actividad relativa de melazas, %			92	94
Número de yodo, mg I <sub>2</sub> /g	900 mín.	1000 mín.	950	1025
Densidad aparente, g/cc			0.47	0.47
Valor Taninos, ppm			430	430
Número de melazas	200 mín.	230 mín.	230	250
Area superficial, método N <sub>2</sub> BET m <sup>2</sup> /g			1050	1075
Diametro de poro, A			30	30
Volumen de poro, ml/g			0.8	0.8
Número de Abrasión, ASTM	80	80	88	88
Altura de decoloración media, cm			4.6	2.75
<b>GRANULOMETRIA</b>				
Pasa Malla 30	5% máx.		2%	
Pasa malla 40	5% máx.		2%	



## 2. Ficha Técnica HANNA INSTRUMENTS



### Hanna Instruments Colombia

*Hanna Instruments Ltda.*

### Reactivos Certificados de DQO



Tres rangos de medición para satisfacer cada necesidad.

Como los niveles de DQO varían dependiendo de la aplicación y puntos de proceso de medición, HANNA ofrece reactivos para cubrir tres rangos separados.

Basta con elegir la mejor escala para la aplicación:



- de bajo rango: 0 a 150 mg / L de O2
- de mediano rango: de 0 a 1500 mg / L o de 0 a 1000 mg / L de -O2
- de alto rango: 0 a 15000 mg / L de O2

- Mediciones precisas y repetibles.

Los reactivos HANNA DQO han sido elaborados de conformidad con la Norma de los Métodos 5220D, la USEPA 410.4 e ISO 5705:2002.

- Viales Pre-dosificados.

El viales HANNA contienen aprox. 3 mL de pre-dosificado reactivo. El operador sólo tiene que añadir una pequeña cantidad de la muestra 2 ml para BR y MR, y 0,2 mL para el análisis.

- Mediciones rápidas y precisas

Con viales pre-dosificados, el tiempo de preparación de la prueba se reduce drásticamente. No existe un procedimiento de preparación del reactivo o limpieza de la cristalería.

- Reactivos seguros.

Los reactivos HANNA DQO son seguros para los operadores y el medio ambiente. Los viales y las tapas se han diseñado para evitar derrames accidentales de reactivos. Debido a los reactivos predosificados la cantidad de químicos se reduce al mínimo.

CODIGO	DESCRIPCION	METODO	Rango
HI 93754A-25	bajo rango	EPA*	0-a-150 mg/L (ppm)
HI 93754B-25	medio rango	EPA*	0-a-1500 mg/L (ppm)
HI 93754C-25	alto rango	EPA*	0-a-15000 mg/L (ppm)
HI 93754D-25	bajo rango	Libre de mercurio***	0-a-150 mg/L (ppm)
HI 93754E-25	medio rango	Libre de mercurio***	*0-a-1500 mg/L (ppm)
HI 93754F-25	bajo rango	ISO 15705**	0-a-150 mg/L (ppm)
HI 93754G-25	medio rango	ISO 15705**	0-a-1000 mg/L (ppm)
HI 93754H-25	bajo rango	-	0-a-150 mg/L (ppm)





### 3. Tabla de modelo de adsorción-reacción

Tipo de carbon	Nombre comercial	SV (m2/g)	Contaminante	Fuente	pH	Temperatura	Isoterma	Ajuste	Modelo cinética	Ajuste	Referencia
CAG	---	929	Fenol	SIn preparada	5.5	21 °C	Hill de Boer/Temkin	1.01% (DESV)	---	---	Hamdaoui, 2007
	---		2-Clorofenol	SIn preparada	5.5	21 °C	Fowler-Guggenheim	0.84% (DESV)	---	---	
	---		4-Clorofenol	SIn preparada	5.5	21 °C	Fowler-Guggenheim	4.51% (DESV)	---	---	
	---		2,4-Diclorofenol	SIn preparada	5.5	21 °C	Fowler-Guggenheim	2.26% (DESV)	---	---	
	---		2,4,6-Triclorofenol	SIn preparada	5.5	21 °C	Fowler-Guggenheim	4.21% (DESV)	---	---	
Bituminoso+quitosano	F400	---	Acido Humico	SIn preparada	4.0	25 °C	Langmuir	0.99 (R2)	PSO	0.95 (R2)	Maghsoodloo, 2011
Bituminoso	F400	---	Acido Humico	SIn preparada	4.0	25 °C	Langmuir	0.99 (R2)	PSO	0.98 (R2)	
Date-pit CAG (lignítico)	---	490	DQO	Agua desecho refineria	7.5-8	25 °C	Langmuir	1.00 (R2)	PSO	1.00 (R2)	El-Naas, 2010
BDH-CAG	BDH	1220	DQO	Agua desecho refineria	7.5-8	25 °C	Langmuir	0.99 (R2)	PSO	1.00 (R2)	
	Ceca AC40	1201	Acido Ftalico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	3.72% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	Ocampo, 2012
	Ceca AC40		Bisfenol A	SIn preparada	5.0	25 °C	Praustnitz-Radke	3.69% (DESV)	PSO/MDVP	0.98 (R2)	
	Ceca AC40		Acido difenolico	SIn preparada	5.0	25 °C	Praustnitz-Radke	9.93% (DESV)	PSO/MDVP	0.93 (R2)	
	Ceca AC40		Acido 2,4 diclorofenoxiacetico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	0.10% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	
	Ceca AC40		Acido 4-Cl, 2-metilfenoxiacetico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	3.98% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	
	Sorbo Norit	1225	Acido Ftalico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	7.12% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	Ocampo, 2012
	Sorbo Norit		Bisfenol A	SIn preparada	5.0	25 °C	Praustnitz-Radke	1.86% (DESV)	PSO/MDVP	0.95 (R2)	
	Sorbo Norit		Acido difenolico	SIn preparada	5.0	25 °C	Praustnitz-Radke	2.86% (DESV)	PSO/MDVP	0.96 (R2)	
	Sorbo Norit		Acido 2,4 diclorofenoxiacetico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	4.12% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	
	Sorbo Norit		Acido 4-Cl, 2-metilfenoxiacetico	SIn preparada	3.0	25 °C	Praustnitz-Radke	6.10% (DESV)	PSO/MDVP	0.99 (R2)	
Norit 08	1150	DQO	Lixiviado de relleno	8.2	20°C	Redlich-Peterson	---	PPO	---	Rivas, 2006	
Picacarb 1240	1050	DQO	Lixiviado de relleno	8.2	20°C	Freundlich	---	PPO	---		
Chemiron AQ40	1180	DQO	Lixiviado de relleno	8.2	20°C	Freundlich	---	PPO	---		
Norit 08	1150	DQO	Lixiviado tratado O3	8.0-9.0	---	Sips	1.69e-3 ((err)2)	PPO	---	Rivas, 2003	
CAG tratado con O3	PHO 8/35 LBD	900-1100	DQO	Lixiviado tratado O3	8.0	25-27°C	---	---	Loebenstein	---	Kurniawan, 2006b
CAG bituminoso	Nuchar WV-H	600-650	Acido 2,4 diclorofenoxiacetico	SIn preparada	8.0	25	Freundlich/Koble-corrigan	3.5% (err)	PPO	0.98 (R2)	Aksu, 2004
CAG de semillas tamarindo	---	---	DQO	Lixiviado de relleno	8.0	30°C	Langmuir	0.99 (R2)	PSO	>0.99 (R2)	Foo, 2013a
CAG de cascara de coco	---	---	DQO	Lixiviado de relleno	7	30°C	Langmuir	0.98 (R2)	PPO	0.98 (R2)	Halim, 2010
CAG de bagazo de caña de azucar	---	1620	Nitrogeno amoniacal	Lixiviado de relleno	---	30°C	Langmuir	0.99 (R2)	PSO/Elovich	>0.99 (R2)	Foo, 2013b
	---	1620	Ortofosfatos	Lixiviado de relleno	---	30°C	Langmuir	0.98 (R2)	PSO/Elovich	>0.99 (R2)	

PPO = Pseudo primer orden  
 PSO = Pseudo segundo orden  
 MDVP = Modelo de difusión en el volumen de los poros

