

**EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-  
SUPERFICIAL A ESCALA PILOTO UTILIZANDO COMO MEDIOS FILTRANTES  
ANTRACITA, CARBÓN ACTIVADO Y COQUE Y SU EFECTO EN UN AGUA  
RESIDUAL**

**JOSÉ CLODOVEO LINDARTE RAMÍREZ  
PIEDAD PATRICIA ZÁRATE GUÍO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

**EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-  
SUPERFICIAL A ESCALA PILOTO UTILIZANDO COMO MEDIOS FILTRANTES  
ANTRACITA, CARBÓN ACTIVADO Y COQUE Y SU EFECTO EN UN AGUA  
RESIDUAL**

**José Clodoveo Lindarte Ramírez**

Ingeniero Químico

**Piedad Patricia Zárate Guío**

Ingeniera Química

Trabajo presentado como requisito para optar al título de

**Magister en Ciencias Ambientales**

**Director: Carlos Ricardo Bojacá Aldana**

Ingeniero Agrónomo, PhD

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**BOGOTÁ D.C.**

**2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

Carlos Ricardo Bojacá Aldana Ingeniero Agrónomo, PhD

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bogotá D. C., Septiembre, 2015.**

## **DEDICATORIA**

Al Dios Padre Todopoderoso por ser el dador de la vida, a mi esposa Ana Beatriz por apoyarme en todo momento, a mis dos hijas Diana Lorena y Mayra Alejandra por creer siempre en su padre, a mis dos hermosas e inteligentes nietas Valentina y Sara Gabriela por ser el impulso y motivación para obtener este logro y a la memoria y honra de mis padres que siempre me inculcaron en los principios y valores.

José

A ti Dios por brindarme la oportunidad de estudiar nuevamente, a mi Madre por apoyarme en todas mis locuras y por ella soy lo que soy, a la memoria de mi Padre porque desde el cielo orienta mis pasos.

Piedad Patricia

## **AGRADECIMIENTOS**

Fueron muchas las personas que nos apoyaron para conseguir nuestro título, nuestras familias, nuestros profesores, nuestros amigos, nuestros compañeros de estudio, nuestros estudiantes, pero debemos agradecer de manera especial al director del proyecto Carlos Bojacá por creer en nuestro proyecto, al Doctor Edilberto León por su acompañamiento y paciencia, a la Señora Sonia Forero Carvajal por su apoyo y confianza, a la Secretaría de Educación por su apoyo financiero y en especial a los estudiantes Diego G, Diana L, Ronal S, Olman C, Danna T, y Angie L pues sin su ayuda este proyecto no hubiese sido posible. Gracias, mil gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	15
2	MARCO TEÓRICO .....	18
2.1	Humedales.....	18
2.2	Clasificación de los Humedales .....	18
2.3	Humedales Artificiales.....	19
2.3.1.1.	Humedales Artificiales de Flujo Superficial.....	19
2.3.1.2.	Los Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial .....	20
2.4	Lechos Filtrantes en los Humedales Artificiales.....	21
2.4.2.1	Carbón Activado .....	23
2.4.2.2	Antracita .....	25
2.4.2.3	Coque.....	26
2.5	Aspectos Hidrodinámicos en los Humedales .....	27
2.5.1.	Tipos de Reactores Ideales para una Sola Reacción .....	28
2.5.1.1	Reactor Intermitente (BR, por sus Siglas en Inglés).....	28
2.5.1.2	El Reactor de Flujo Pistón (PFR, por sus Siglas en Inglés).....	28
2.5.1.3.	Reactor de Tanque Agitado (MFR, por sus Siglas en Inglés).....	28
2.5.2	Factores que Configuran el Patrón de Flujo .....	29
2.5.3.	Curva de Distribución de Tiempos de Residencia, DTR.....	30
2.5.3.1.	Curva F.....	31
2.5.3.2	Curva E(t) .....	31
2.5.3.3	Curva C(t).....	32
2.5.3.4	Relaciones entre las curvas F, C y E.....	32
2.5.4	Tiempo Adimensional .....	32
2.6	Trazadores.....	33
2.7	Modelos para Flujo No ideal .....	33
2.7.1	Modelos Matemáticos.....	34
2.7.1.1	Ajuste de Curva de Tendencia.....	34
2.7.1.2	Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick.....	36
2.7.1.3	Modelo de Dispersión o flujo Disperso en pistón .....	37
2.7.1.4	El modelo de Tanques en Serie.....	37
2.8	Parámetros físico-químicos de monitoreo de la calidad de agua.....	37
3	MARCO NORMATIVO.....	41

4	ESTADO DEL ARTE .....	47
4.1	Estudios Internacionales .....	47
4.1.1	Uso de Humedales Artificiales .....	47
4.1.2	Comportamiento Hidrodinámico de Humedales Artificiales. ....	50
4.2	Estudios Nacionales.....	52
5	JUSTIFICACIÓN.....	55
7.1	Objetivo General .....	59
7.1.1	Objetivos Específicos.....	59
7.1.2	Objetivo Pedagógico .....	59
8	HIPÓTESIS.....	60
9	MATERIALES Y MÉTODOS .....	61
9.1	Cálculos Previos .....	61
9.1.1	Volumen Útil del Humedal .....	61
9.1.2	Concentración del Trazador.....	61
9.1.3	Porosidad del Lecho .....	63
9.1.4	Tiempo de Retención Hidráulico Teórico .....	64
9.2	Fase Experimental de Laboratorio .....	65
9.2.1	Lugar de Trabajo .....	65
9.2.2	Montaje del Humedal.....	66
9.2.3	Materiales Granulares empleados como Lechos Filtrantes .....	67
9.2.3.1	Carbón Activado .....	67
9.2.3.2	Carbón Antracita.....	67
9.2.3.3	Coque .....	67
9.2.3.4	Lecho Mezclado .....	68
9.3	Evaluación Hidrodinámica .....	68
9.3.1	Modelos .....	70
9.3.1.1	Método de la Curva de Tendencia del Trazador.....	70
9.3.1.2	Modelo Simplificado de Wolf-Resnick .....	70
9.3.1.3	Modelo de Dispersión.....	71
9.3.1.4	Modelos de Tanques en Serie.....	71
9.4	Efectos de Algunos Parámetros Físico-químicos en el Agua del Canal Afidro al ser tratada.....	72
9.4.1	Generalidades del sitio de muestreo .....	72

9.4.2	Toma de muestras .....	73
9.4.3	Análisis estadístico de datos.....	74
10	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
10.1	Coque .....	75
10.1.1	Análisis de la Curva de Tendencia .....	75
10.1.2	Modelo Wolf-Resnick.....	77
10.1.3	Modelos de Dispersión y Tanques en serie .....	78
10.1.3.1	Modelo de Dispersión.....	78
10.1.3.2	Modelo de Tanques en Serie .....	79
10.2	Carbón Antracita .....	80
10.2.1	Análisis de la Curva de Tendencia .....	80
10.2.2	Modelo Wolf-Resnick.....	81
10.2.3	Modelos de Dispersión y tanques en serie .....	82
10.2.3.1	Modelos de Dispersión .....	82
10.2.3.2	Modelo de Tanques en serie .....	83
10.3	Carbón Activado .....	84
10.3.1	Análisis de la Curva de Tendencia .....	84
10.3.3	Análisis modelos de Dispersión y Tanques en serie.....	86
10.3.3.1	Modelo de Dispersión.....	86
10.3.3.2	Modelo tanques en serie .....	87
10.4	Lecho Mezclado.....	88
10.4.1	Análisis de la curva de tendencia .....	88
10.4.2	Modelo simplificado de Wolf-Resnick .....	89
10.4.3	Modelos de Flujo de Dispersión y Tanques en serie.....	91
10.4.3.1	Modelo de Flujo de Dispersión .....	91
10.4.3.2	Modelo de Tanques en Serie .....	92
10.5	Efectos de algunos parámetros físico-químicos en el agua del Canal Afidro al ser tratada.....	97
10.5.1	Descripción del agua residual.....	97
10.5.2	Efectos que se obtuvieron para cada lecho .....	98
10.5.3	Análisis estadístico de los datos generados .....	100
10.5.4	Análisis comparativo de la evaluación hidrodinámica con respecto a los efectos del tratamiento en el agua residual. ....	101

10.6	Componente pedagógico .....	102
11	CONCLUSIONES.....	103
12	RECOMENDACIONES .....	104
13	BIBLIOGRAFÍA .....	106
	ANEXO A .....	115
	ANEXO B .....	117
	ANEXO C .....	121

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de un humedal de flujo superficial. ....	20
<b>Figura 2.</b> Esquema de humedales sub-superficiales de A) flujo Horizontal y B) de flujo vertical. ....	22
<b>Figura 3.</b> Carbón Activado en Forma Granular y Polvo. ....	23
<b>Figura 4.</b> Aspecto de la Antracita .....	25
<b>Figura 5.</b> Coque siderúrgico y coque de fundición. ....	27
<b>Figura 6. Tipos de Reactores.</b> A. Reactor Intermitente. B. Reactor Flujo Pistón. C. Reactor Tanque Agitado .....	29
<b>Figura 8.</b> Concentración del trazador en el efluente de un reactor. ....	34
<b>Figura 9.</b> Curva de calibración conductividad versus concentración .....	63
<b>Figura 10.</b> Montaje de humedal .....	66
<b>Figura 11.</b> Materiales granulares empleados en los ensayos. ....	67
<b>Figura 12.</b> Adición instantánea de trazador .....	69
<b>Figura 13.</b> Recolección de Muestras .....	69
<b>Figura 14.</b> A. Localización de Canal Afidro, colegio Delia Zapata y Humedal la Conejera B. Localización de Canal Afidro. ....	72
<b>Figura 15.</b> A. Medidores de calidad de agua. B. Titulación de alcalinidad. ....	74
<b>Figura 16.</b> Comportamiento de la concentración del trazador a través del tiempo .....	76
<b>Figura 17.</b> Curvas de datos experimentales, modelos de dispersión y tanques en serie para el sustrato coque. ....	79
<b>Figura 18.</b> Curvas de datos experimentales, modelo dispersión y tanques en serie para antracita .....	83
<b>Figura 19.</b> Curvas de datos experimentales, modelo de dispersión y tanques en serie para carbón activado. ....	87
<b>Figura 20.</b> Curvas de datos experimentales y modelo dispersión y tanques en serie para el lecho mezclado .....	92
<b>Figura 21.</b> Diagramas de caja y bigotes de los parámetros físico-químicos considerados para cada uno de los lechos. ....	101

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características típicas del medio en humedales de flujo sub-superficial .....	23
<b>Tabla 2.</b> Materias primas y algunas características de carbones activados .....	24
<b>Tabla 3.</b> Grado y tamaño de poro de algunas antracitas comerciales .....	26
<b>Tabla 4.</b> Criterios de caracterización de flujo .....	36
<b>Tabla 5.</b> Porosidad del Lecho .....	64
<b>Tabla 6.</b> Tiempo de Retención Hidráulica Teórico .....	65
<b>Tabla 7.</b> Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el coque .....	76
<b>Tabla 8.</b> Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el coque .....	77
<b>Tabla 9.</b> Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el coque .....	78
<b>Tabla 10.</b> Resultados del modelo de dispersión para coque .....	78
<b>Tabla 11</b> Resultados del Modelo de tanques en serie. Coque .....	79
<b>Tabla 12.</b> Parámetros principales para el análisis de la .....	80
tendencia de la curva de distribución del trazador para la antracita .....	80
<b>Tabla 13.</b> Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para la antracita .....	81
<b>Tabla 14.</b> Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el carbón antracita .....	82
<b>Tabla 15.</b> Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con antracita .....	82
<b>Tabla 16.</b> Resultados del modelo de Tanques en serie para antracita .....	83
<b>Tabla 17.</b> Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el carbón activado .....	84
<b>Tabla 18.</b> Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el carbón activado .....	85
<b>Tabla 19.</b> Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el carbón activado .....	86
<b>Tabla 20.</b> Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con carbón activado .....	86

<b>Tabla 21.</b> Resultados del modelo de tanques en serie para el lecho de soporte con carbón activado.....	87
<b>Tabla 22.</b> Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el lecho mezclado .....	89
<b>Tabla 23.</b> Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el lecho mezclado .....	90
<b>Tabla 24.</b> Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el lecho mezclado .....	91
<b>Tabla 25.</b> Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con la mezcla de materiales.....	91
<b>Tabla 26.</b> Resultados del modelo de tanques en serie para el lecho de soporte con los materiales en mezcla .....	92
<b>Tabla 27.</b> Comparación de los resultados del comportamiento hidrodinámico evaluado para cada lecho soporte.....	95
<b>Tabla 28.</b> Condiciones in situ del agua a tratar .....	98
<b>Tabla 29.</b> Efectos de los lechos sobre los parámetros físico-químicos del agua tratada .....	99

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial de flujo sub-superficial a escala piloto utilizando como lechos filtrantes antracita, carbón activado, coque y una mezcla de estos tres componentes granulares en una proporción de 35 % de antracita, 30% de coque y 35% de carbón activado y analizar el cambio de algunos parámetros fisicoquímicos en un agua no depurada. Se utilizó el método estímulo-respuesta, dosificando cloruro de sodio (NaCl) en solución como trazador en forma instantánea a la entrada del humedal y midiendo la conductividad eléctrica a la salida en intervalos de tiempo constante de 1 ó 2 minutos. La curva de distribución del trazador se analizó desde el punto de vista cualitativo, a través del análisis de la curva de tendencia y desde el punto de vista cuantitativo, mediante el ajuste de los modelos matemáticos de Wolf-Resnick, dispersión axial y de tanques completamente mezclados en serie (RCM). La evaluación hidrodinámica del humedal artificial utilizando en forma individual el coque, la antracita y el carbón activado, presentó un alto grado de dispersión, lo cual los aleja de la tendencia del flujo pistón. El régimen de flujo fue dual con el predominio de mezcla completa (76% coque, 68.6% antracita y 63.1% carbón activado) y la presencia de zonas muertas para coque, antracita y carbón activado fue de 14.2%, -3.9%, y -19.1%, respectivamente. El modelo de flujo obtenido para el humedal construido operando con una mezcla de los tres materiales granulares fue dual (pistón y mezcla completa) con el predominio de mezcla completa y un altísimo porcentaje de zonas muertas (-71.5%). Se validó que el lecho con carbón activado que presentó el mejor comportamiento hidrodinámico, fue el mismo que obtuvo mejores porcentajes de remoción de los contaminantes evaluados en el agua del canal Afidro, indicando que su mayor porcentaje como flujo pistón influyó de manera significativa en su operación.

**Palabras clave:** flujo pistón, humedal construido, mezcla completa, modelo de tanques en serie, modelo de dispersión axial, modelo de Wolf-Resnick, DBO, Oxígeno disuelto.

## ABSTRACT

The present research focused on the assessment of the hydrodynamic behavior of pilot scale artificial subsurface flow wetlands using as bed filters activated carbon, anthracite and coke, and a mixture of these three components in a proportion of 35% for anthracite, 30% for coke and 35% of activated carbon. Its method used stimulus-response, dosing sodium chloride (NaCl) solution as a tracer in instantly to the entrance of the wetland and by measuring the electrical conductivity to the output at constant intervals of 1 to 2 minutes. The distribution curve of the tracer was analyzed qualitatively, through the analysis of the trend curve and quantitatively, through the fitting of the mathematical models of Wolf-Resnick, axial dispersion and completely mixed tanks in series (RCM). The hydrodynamic behavior for the artificial wetland assessment using individually coke, anthracite and activated carbon, presented a high degree of dispersion, which took them away the plug flow trend. The flow regime was dual with predominance of complete mixing (76% coke, 68.6% anthracite and 63.1% activated carbon) and the presence of dead zones for coke, anthracite and activated carbon were 14.2, -3.9, and -19.1%, respectively. The obtained flow model flow for the pilot wetland operating with a mixture of three granular materials was dual (plug flow and complete mixing) with the prevalence of complete mixing and a very high percentage of dead zones (- 71.5%). Validated bedding with activated carbon that presented the best hydrodynamic performance, was the same as who won better percentages of removal of pollutants evaluated in the Afidro canal water, indicating that its highest percentage as plug flow influence significantly in its operation.

**Key words:** plug flow, constructed wetland, complete mixing model of tanks in series, model of axial dispersion, model of Wolf-Resnick, BOD, dissolved oxygen.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente existen diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales ya sean físicos, químicos y biológicos o una combinación de éstos (Stoker y Seager, 1981) incluyendo la sedimentación, precipitación y adsorción, entre otros (Moshiri, 1993). Dentro de los sistemas de tratamientos físicos existentes, los humedales construidos pertenecen a las tecnologías no convencionales. Son zonas de tierras, generalmente planas, en las que la superficie se inunda de forma permanente al cubrirse regularmente de líquido; el suelo se satura quedando desprovisto de oxígeno dando lugar a un ecosistema híbrido entre lo acuático y lo terrestre (Cooper et al., 2001). Son sistemas donde los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural (Watson et al., 1989; Brix, 1998). La depuración de las aguas residuales en los humedales construidos se lleva a cabo, fundamentalmente, por la presencia de diversas poblaciones adheridas; tanto a la superficie de las plantas (Lara, 1999) como al medio de soporte (arena, grava entre otros). Debido a que el medio poroso brinda una mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo sub-superficial es mayor (Reed, 1995).

El interés por lo anteriormente expuesto, ha dejado de lado estudios de carácter hidrodinámico, los cuales permiten conocer cómo las condiciones de flujo no ideal en los humedales artificiales, que son considerados bioreactores por la realización de procesos degradativos de materia orgánica, pueden afectar su desempeño. Las causas comunes que afectan su operación son cortos circuitos, zonas muertas y recirculación interna por corrientes cinéticas y/o de densidad. Por lo que, el conocimiento de la hidrodinámica del sistema permite mejorar su eficiencia. Tradicionalmente, se ha empleado en el diseño de humedales construidos el parámetro denominado tiempo o período de retención. Las operaciones o procesos en estos sistemas ocurren por lo general, lentamente lo que conduce a un período de reacción largo o un período de contacto largo a fin de lograr la transferencia y que se produzcan los cambios deseados.

Es de capital importancia, que esto se verifique para cada una de las partículas del fluido y para cada uno de los elementos que conforman las impurezas. Para establecer la eficiencia hidráulica de un humedal construido o un sistema depurador de aguas, es muy común analizar la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo. Generalmente, la forma que toma la curva de concentración da una primera indicación del comportamiento hidrodinámico de un reactor -humedal artificial- (Galvis, 1984). A partir de esta curva se puede obtener la función de distribución del tiempo de residencia que a su vez permite determinar el tiempo de residencia hidráulico real (TRH) y la aplicación de diferentes modelos matemáticos para analizar el comportamiento del humedal.

Por lo general, la modelación de un proceso apunta a poder plantear descripciones matemáticas para ayudar a analizar, comprender y predecir el comportamiento de un proceso físico complejo en función de las variaciones de los parámetros que lo gobiernan (Himmelbalu et al., 1987). Pueden utilizarse diversos criterios, modelos y procedimientos para estudiar las características de flujos no ideales que permitan aproximarse a la realidad. Entre los modelos matemáticos más conocidos se encuentran el método de Wolf-Resnick, el modelo de dispersión axial y el modelo de reactores completamente mezclados en serie (Levenspiel, 1997). Existen varios estudios a nivel nacional como internacional sobre el comportamiento hidrodinámico de humedales artificiales de flujo sub-superficial a nivel de laboratorio y escala piloto utilizando medios filtrantes convencionales como grava y arena.

En la literatura consultada, no se reporta información alguna sobre el uso de sustratos como la antracita, el carbón activado y el coque; a excepción de un trabajo de investigación a nivel nacional, donde se obtuvo información del uso de la cáscara de coco (materia prima para producir carbón activado) como medio de soporte en un filtro anaerobio.

Razón por la cual el presente proyecto de investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento hidrodinámico en los humedales sub-superficiales a escala de piloto

usando como materiales porosos la antracita, el carbón activado y el coque; valorando su aplicabilidad en el tratamiento de una corriente de agua contaminada procedente de un canal que recoge aguas lluvias y aguas residuales domésticas, contiguo al humedal de la Conejera (canal Afidro).

## **2 MARCO TEÓRICO**

En este acápite se presenta una descripción sobre los humedales, los lechos filtrantes más utilizados en los humedales artificiales, los sustratos propuestos en la investigación, los aspectos más relevantes sobre la evaluación hidrodinámica en humedales y los conceptos sobre algunos parámetros físico-químicos evaluados durante el proceso de tratamiento del cuerpo de agua en el humedal artificial.

### **2.1 Humedales**

Son muchas las definiciones de humedales, pero la más conocida internacionalmente es la enunciada por la Convención de Ramsar (tratado intergubernamental para la acción nacional y la cooperación internacional en favor de la conservación y el uso racional de los humedales) que entiende por humedales a “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Convención Ramsar, 1971).

### **2.2 Clasificación de los Humedales**

Pueden reconocerse cinco tipos de humedales principales a saber: marinos, estuarinos, lacustres, ribereños y palustres. Además, existen los humedales artificiales, como los estanques empleados para la cría de peces y camarones, los estanques de fincas, los cuerpos de agua en tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales.(RAMSAR,1971).

Adicionalmente, la Convención Ramsar ha adoptado un sistema de clasificación de humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: a) humedales marinos y costeros, b) humedales continentales que incluye los c) humedales artificiales.

## **2.3 Humedales Artificiales**

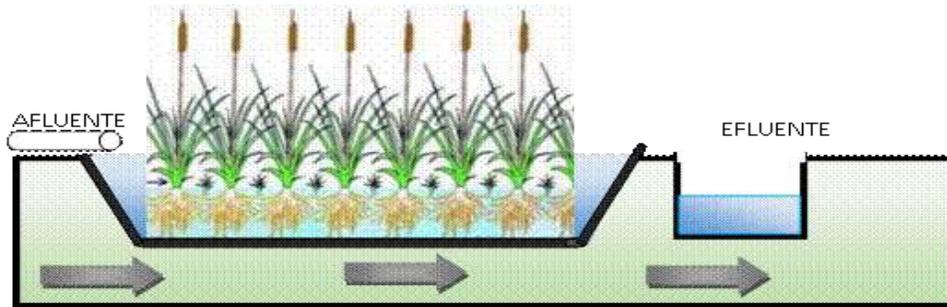
Los humedales artificiales son cuerpos de agua de menos de 60 cm de profundidad, con plantas superiores (macrófitas), empleados para el tratamiento de aguas residuales a través de varios procesos físico-químicos y bacteriológicos. Su proceso de depuración se caracteriza porque el oxígeno es suministrado por las plantas que toman el aire a través de las hojas y lo llevan hasta las raíces. En esta zona se realiza el transporte de oxígeno que ayuda a la eliminación microbiana de algunos contaminantes, estimula la degradación de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Se identifican tres funciones en el proceso depurativo: 1) fijar los contaminantes y la materia orgánica en el suelo; 2) transformar los elementos por medio de microorganismos y 3) lograr el tratamiento deseado con bajo consumo de energía y bajo mantenimiento del humedal. (Lara, 1999).

### **2.3.1 Tipos de Humedales Artificiales**

Los humedales artificiales según como circule el agua se clasifican en: 1) Humedales Artificiales de Flujo Superficial; 2) Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial.

#### **2.3.1.1. Humedales Artificiales de Flujo Superficial**

Son sistemas con profundidades menores a 0.4 m, utilizados como tratamiento terciario de aguas residuales, caracterizados porque el flujo del agua circula a través de los tallos de las plantas y está directamente expuesto a la atmósfera. La Figura 1 presenta un humedal de este tipo.



**Figura 1.** Esquema de un humedal de flujo superficial. Fuente: Pedescoll (2010)

### 2.3.1.2. Los Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial

Son sistemas con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m, empleados como tratamiento secundario o terciario del agua residual. Se caracterizan porque el flujo de agua subyace a través de un lecho filtrante. Estos sistemas de humedales según la dirección del flujo de agua se clasifican en dos tipos:

- a. El humedal sub-superficial de flujo horizontal (Figura 2A), es un sistema que se caracteriza porque el afluente ingresa en forma permanente por la parte superior para luego atravesar un lecho relleno de material granular de profundidad entre 0.45 m y 1 m (arena o grava) plantado con macrófitas. El flujo de agua avanza por gravedad en forma horizontal hasta el otro extremo del humedal
- b. El humedal sub-superficial de flujo vertical (Figura 2B), también conocido como filtro intermitente, está constituido de un lecho relleno de varias capas de grava, con un tamaño de grano creciente desde la parte superior hasta el fondo, el cual funciona como un filtro por gravedad. Por lo general, en el fondo existen gravas de tamaño de partícula entre 20-40 mm, la capa intermedia es de grava fina con diámetros entre 3-10 mm que constituye la mayoría de material granular y finalmente, la capa superficial compuesta de arena con diámetros entre 0.25-0.40 mm (García y Corzo, 2008).

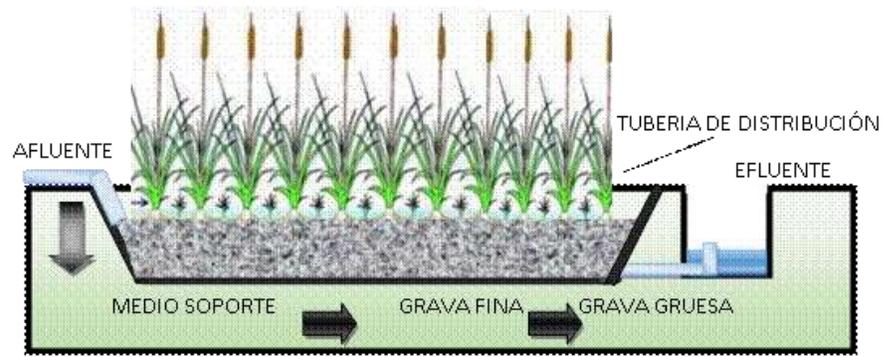
## **2.4 Lechos Filtrantes en los Humedales Artificiales**

En este numeral se describen las características de los medios filtrantes más utilizados (convencionales) en los humedales artificiales y los medios granulares evaluados en el presente trabajo: antracita, carbón activado y coque.

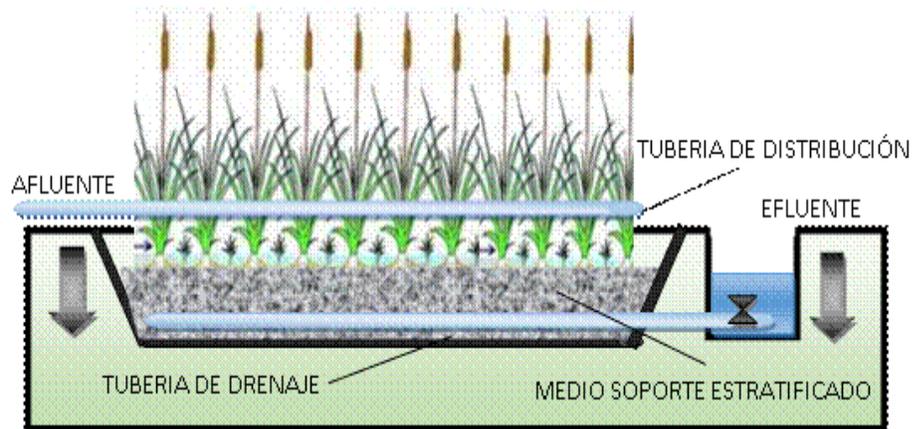
### **2.4.1. Materiales Filtrantes Convencionales**

El sustrato o medio granular, material que está delimitado por las zonas de entrada y salida, puede estar constituido por arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan dentro del humedal debido al crecimiento biológico. Las características físicas principales de estos materiales son su homogeneidad, dureza, durabilidad y el mantenimiento de su forma a largo plazo. Además permiten la formación adecuada de la biopelícula de microorganismos y el crecimiento de las macrófitas. Su importancia en estos sistemas de tratamiento radica en que:

1. Son el soporte de muchos organismos encontrados en el humedal.
2. Por su permeabilidad, el sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
3. Dentro del sustrato ocurren transformaciones químicas y microbiológicas
4. Los contaminantes se alojan allí luego del tratamiento.
5. Los restos de vegetación proveen de materia orgánica al humedal para conseguir las reacciones biológicas más importantes. (Lara, 1999).



A.



B.

**Figura 2.** Esquema de humedales sub-superficiales de A) flujo Horizontal y B) de flujo vertical. Fuente: Pedescoll (2010)

El medio granular es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Según el tamaño, tipo y calidad del medio se favorecen la capacidad de adsorción, la filtración o la conductividad hidráulica.

En la Tabla 1, se relacionan las características de materiales granulares empleados en humedales de flujo sub-superficial de plantas de tratamiento. (EPA, 2000).

**Tabla 1.** Características típicas del medio en humedales de flujo sub-superficial

Tipo de medio	Tamaño efectivo D10 (mm)*	Porosidad, N (%)	Conductividad hidráulica, $K_s$ ( $m^3/m^2/d$ )
Arena gruesa	2	28 a 32	100-1000
Arena con grava	8	30 a 35	500-5000
Grava fina	16	35 a 38	1000-10 000
Grava mediana	32	36 a 40	10 000-50 000
Roca triturada	128	38 a 45	50 000-250 000

\*D10 es el tamaño del tamiz por el que pasa el 10% de una muestra

## 2.4.2 Materiales Granulares Evaluados en el Proyecto

Los materiales que se describen fueron los evaluados en el presente proyecto de investigación como sustratos en humedales sub-superficiales. Aunque no han sido utilizados como lechos filtrantes en estos sistemas de depuración sí se han empleado en otros procesos de remoción de contaminantes.

### 2.4.2.1 Carbón Activado

Término que encierra a una serie de carbones porosos obtenidos en forma artificial a través de un proceso de carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, que conduce a un producto con alto grado de porosidad y elevada área superficial interna. El carbón activo se puede clasificar en granular y polvo, dependiendo del tamaño de grano (grano grueso o grano fino). Un ejemplo de estos tipos de carbón activado se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Carbón Activado en Forma Granular y Polvo.  
Fuente: Sangiacomo (2005)

El carbón activado se caracteriza por su elevada capacidad de remoción de sustancias y su baja selectividad de retención, por ello su empleo es amplio en la industria de los azúcares, la industria química, la industria farmacéutica, el tratamiento de agua residual y de agua potable. La selectividad y procesos de remoción del carbón activado dependen del tipo de materia prima empleada para su elaboración y proceso de activación pues de ello depende la porosidad y área superficial interna obtenida. Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry – Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: macro-poros cuyo radio es mayor de 25 nm, meso-poros cuyo radio está entre 25 y 1 nm y micro-poros con radios menores a 1 nm (Luna et al, 2007).

En la Tabla 2 se presentan las principales materias primas y tecnologías de activación utilizadas, además de la dureza y el tamaño de poro de los productos obtenidos por los diferentes procesos físico-químicos.

**Tabla 2.** Materias primas y algunas características de carbones activados

Materia Prima	Activación	Dureza o Resistencia a la Abrasión	Tamaño de Poros
Madera de pino	Deshidratación química <sup>1</sup>	30 – 50	Macro-poroso
Madera de pino	Térmica <sup>2</sup>	40 – 60	Meso-poroso
Carbón mineral bituminoso	Térmica <sup>2</sup>	70 – 80	Meso-poroso
Concha de coco	Térmica <sup>2</sup>	90 – 99	Micro-poroso

<sup>1</sup> Típicamente con ácido fosfórico y en ocasiones con cloruro de zinc.

<sup>2</sup> En atmósfera saturada de vapor de agua o con gases de combustión.

Fuente: Sangiacomo (2005)

La composición química promedio del carbón activo es aproximadamente un 75% - 80% en carbono, 5% – 10% en cenizas, 6% en oxígeno y 0.5% en hidrógeno. El carbón activado es útil en la remoción de contaminantes orgánicos en el agua potable ya que por sus propiedades puede dejar el agua prácticamente libre de estos compuestos,

además destruye el cloro libre residual luego de la aplicación de este compuesto para su acción desinfectante.

El carbón activado es también utilizado en el tratamiento de aguas residuales. El agua a tratar después de haber pasado por el proceso biológico continúa su depuración mediante el proceso de adsorción del carbón activado en la remoción de nitratos, sulfatos y metales pesados.

#### **2.4.2.2 Antracita**

La antracita es considerada el mejor de los carbones dado que es muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Es un carbón duro que presenta el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil. Contiene aproximadamente un 87.1% de carbono, 9.3% de cenizas y 3.6% de material volátil. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. La Figura 4 muestra la apariencia de este material.



**Figura 4.** Aspecto de la Antracita  
Fuente: Minerales y rocas (2012)

Se emplea como combustible y fuente de carbono industrial. Dado su alto contenido de carbono y su bajo porcentaje de materia volátil, al quemarse, libera una gran cantidad de energía y desprende poco humo y hollín, comparado con otra clase de carbones.

La antracita puede emplearse como medio filtrante para purificar el agua, al ser triturada (tamaños entre 0.6 y 62 mm) y tamizada para obtener un material caracterizado por su estructura puntiaguda y fragmentada. Entre sus numerosas propiedades se destacan

su gran resistencia a la abrasión, su baja tendencia a la aglomeración y su escasa dependencia del pH (admite sin problemas valores de pH entre 3 y 12).

También es empleada conjuntamente con otros materiales filtrantes (como carbón activo o arena) para formar lechos mixtos o filtros multicapa, combinando las propiedades de cada material y obtener un mayor eficiencia de remoción. Los tamaños comúnmente encontrados en el mercado se presentan en la Tabla 3 (Tecnoquim, 2010).

**Tabla 3.** Grado y tamaño de poro de algunas antracitas comerciales

Grado	Tamaño (mm)	Grado	Tamaño (mm)
No. 1	0.60 – 0.80		
No. 1.5	0.85 – 0.95	No. 4	7.94 – 14.29
No. 2	1.70 – 4.00	No. 5	14.28 – 20.64
No. 3	4.76 – 7.94	No. 6	20.64 – 41.28

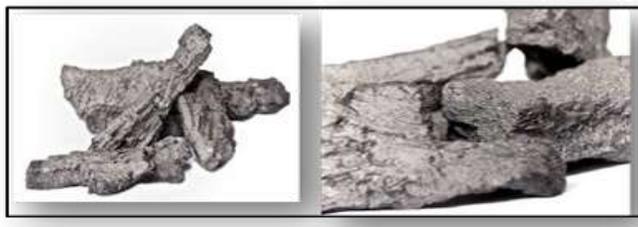
### 2.4.2.3 Coque

El coque es el residuo sólido que se obtiene a partir de la pirolisis, de determinados carbones minerales, como las hullas (o carbones bituminosos) que tienen la capacidad de transformarse después de haber pasado por una fase plástica. La mayoría del coque metalúrgico se usa en los altos hornos de la industria siderúrgica para la producción del acero (coque siderúrgico). El coque metalúrgico también se utiliza en la industria de la fundición del hierro (coque de fundición). En general, el coque de fundición suele ser de un tamaño mayor que el siderúrgico.

El coque también se puede utilizar como filtro oxidante en conjunto con la piedra caliza en el proceso de tratamiento de aguas residuales denominado camas filtrantes o camas de oxidación (Fair et al., 1966).

Los coques tipo exportación cumplen unas características especiales de acuerdo con los usos industriales. No se pretende dar una descripción detallada de las

especificaciones de este material carbonoso, ya que no es el objetivo del presente proyecto. De acuerdo, con la experiencia se mencionan algunas características generales del coque: cenizas del 8 al 10 %, carbono fijo 90 % aproximadamente, materia volátil 1.5% y la resistencia mecánica MICUN 40 del 80% mínimo, MICUN 10 del 8% máximo. En la Figura 5 se puede observar imágenes del coque.



Coque Siderúrgico

Coque de Fundición

**Figura 5.** Coque siderúrgico y coque de fundición. Fuente: <http://ccic.com.co/>

## 2.5 Aspectos Hidrodinámicos en los Humedales

Las características hidrodinámicas de un humedal artificial se han venido considerando desde hace poco tiempo, y es un tema fundamental para decidir la eficiencia y conveniencia de un humedal, en especial si se desea emplear este método como solución a un problema de contaminación. Este trabajo, se centra en la evaluación del comportamiento hidrodinámico de un humedal subsuperficial usando otros materiales granulares no convencionales.

Para iniciar con el análisis es necesario considerar al humedal como un reactor, es decir, un dispositivo donde ocurre un cambio en la composición debido a una reacción química. El mayor problema en el diseño de un reactor es encontrar la mejor manera de tratar factores como la temperatura y la composición del fluido reaccionante que pueden variar de un punto a otro dentro del reactor, lo que depende de la velocidad de adición o sustracción de calor del sistema y del patrón de flujo del fluido a través del reactor.

Los equipos en los que se efectúan reacciones homogéneas, es decir en una sola fase, pueden ser de tres tipos generales: reactor intermitente, de flujo en estado estacionario

y de flujo en estado no estacionario o semi-intermitente (Levenspiel, 2004). A continuación, se describen los tipos de reactores ideales para una sola reacción.

## **2.5.1. Tipos de Reactores Ideales para una Sola Reacción**

### **2.5.1.1 Reactor Intermitente (BR, por sus Siglas en Inglés)**

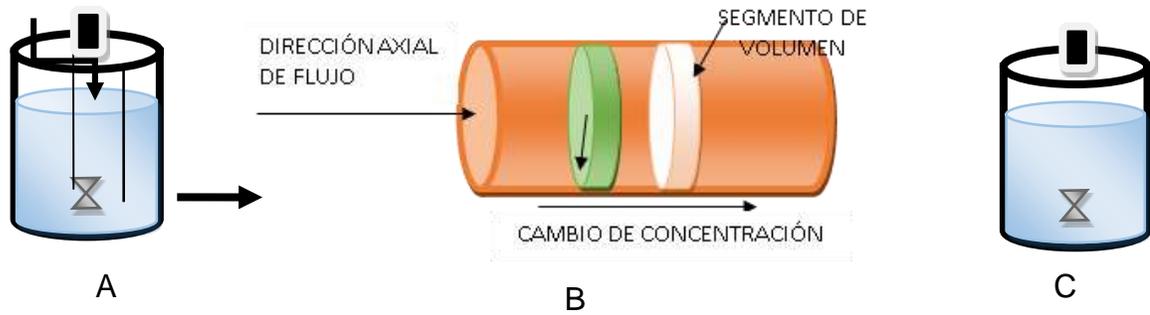
Los reactivos se cargan inicialmente en el reactor, se mezclan muy bien y se deja que reaccionen por cierto tiempo. Luego, la mezcla resultante se descarga. Esta es una operación en estado no estacionario en la que la composición va variando con el tiempo; sin embargo, la composición en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor (Levenspiel, 2004). En la Figura 6A, se puede ver la representación esquemática de un reactor tipo intermitente.

### **2.5.1.2 El Reactor de Flujo Pistón (PFR, por sus Siglas en Inglés)**

Se caracteriza porque el flujo del fluido a través del reactor es regular, es decir, ningún elemento del mismo sobrepasa o se mezcla con cualquier otro elemento situado antes o después de aquél. De hecho, en este reactor puede haber mezcla lateral del fluido, pero nunca puede existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo pistón es que el tiempo de residencia de todos los elementos del fluido sea el mismo (Levenspiel, 2004). En la Figura 6B se observa una representación esquemática de un reactor flujo pistón.

### **2.5.1.3. Reactor de Tanque Agitado (MFR, por sus Siglas en Inglés)**

Denominado reactor de flujo mezclado o reactor de retromezclado. Es otro tipo de reactor ideal que se caracteriza porque el flujo se considera en estado estacionario, el contenido está totalmente agitado y su composición es la misma en todos los puntos del recipiente. A este tipo de flujo se le denomina flujo mezclado (Levenspiel, 2004). En la Figura 6C, se puede observar la representación esquemática de un reactor de tanque agitado.



**Figura 6. Tipos de Reactores.** A. Reactor Intermitente. B. Reactor Flujo Pistón. C. Reactor Tanque Agitado

### 2.5.2 Factores que Configuran el Patrón de Flujo

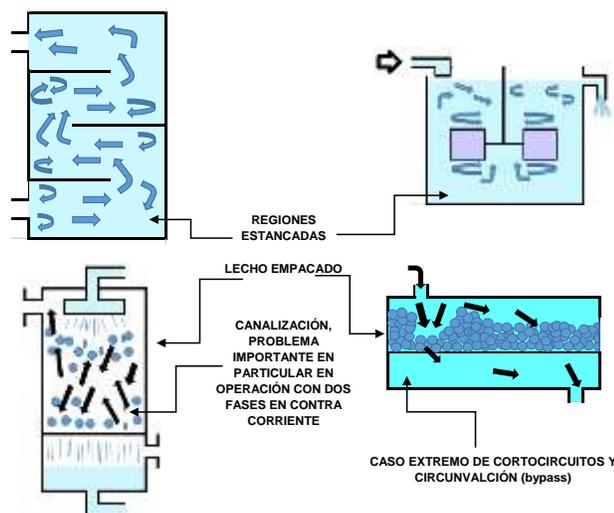
En los reactores reales normalmente se produce un alejamiento de los comportamientos de los reactores ideales, que puede ser debido a los siguientes factores entre otros:

1. No todas las moléculas que pasan por el reactor permanecen en él, igual tiempo.
2. Existen “zonas muertas” en las que el fluido prácticamente no se renueva.
3. Existen “cortocircuitos” en los que parte de la corriente de alimentación pasa directamente a la corriente de salida, sin existir mezcla con el resto del fluido del reactor.
4. Los reactivos y/o los productos forman aglomeraciones y no se mezclan entre sí.

La primera aproximación al flujo real existente en un reactor es considerarlo como flujo pistón o mezcla perfecta, que representan los dos extremos ideales de flujo. Sin embargo, el flujo real en el reactor se aparta de ese ideal y, en la práctica, supone una disminución en la conversión alcanzada por lo que es totalmente necesario conocer este efecto (Universidad Autónoma de Madrid, 2006).

La segunda aproximación consiste en hacer uso de información sobre el grado de mezcla existente en el reactor, que determina la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) en el sistema. Esta curva permite determinar el tiempo de

permanencia de cada fracción de fluido en el reactor y también mostrar si el comportamiento del sistema es o no ideal. Con toda esta información se elabora un modelo de flujo que describa el sistema. En la Figura 7, se pueden observar este tipo de comportamientos (Levenspiel, 2004).



**Figura 7.** Tipos de flujo no ideal que podrían presentarse en diversos equipos de proceso. Fuente: Levenspiel (2004).

### 2.5.3. Curva de Distribución de Tiempos de Residencia, DTR

Se denomina tiempo de residencia de las moléculas en el reactor, al tiempo que tarda una molécula desde que entra al reactor hasta que sale del mismo. En un reactor tubular de flujo pistón todas las moléculas tienen el mismo tiempo de residencia, mientras que en un reactor tanque de mezcla perfecta, las moléculas del fluido se mezclan uniformemente con las moléculas que se encuentran en el reactor, de forma que unas saldrán casi inmediatamente, mientras que otras permanecerán más tiempo en el reactor. En conjunto, las moléculas abandonan el reactor tras un periodo de tiempo próximo al tiempo medio de residencia (Levenspiel, 2004).

La función de distribución de tiempos de residencia (FDTR) se determina experimentalmente mediante técnicas de estímulo-respuesta utilizando trazadores. Las técnicas estímulo-respuesta consisten en introducir al reactor una cantidad de trazador

con una concentración dada y determinar su concentración en la corriente de salida en función del tiempo  $C(t)$ . Como trazadores se pueden utilizar colorantes, ácidos, bases, sales, isótopos radiactivos, entre otros, y la forma de analizarlos en la corriente de salida dependerá del tipo de trazador utilizado (absorbancia, pH, conductividad eléctrica, entre otros).

El estímulo o perturbación que se introduce al sistema también puede ser variada: impulso, escalón, senoide, rampa, al azar, entre otros. Las más empleadas y más fáciles de interpretar son el impulso y el escalón (Sabas, 2011).

El tiempo en que las moléculas del fluido tardan en atravesar el reactor pueden adoptar distintas formas. Estas se expresan mediante fórmulas matemáticas las que se describen a continuación:

#### **2.5.3.1. Curva $F$**

Fracción volumétrica de la corriente de salida que tiene una edad menor de  $t$  (se denomina “edad” de una partícula al tiempo que ésta permanece en el interior del reactor). Indica la probabilidad de que un elemento del fluido haya salido del reactor en un período de tiempo inferior a  $t$  (Levenspiel, 2004).

$$F = \frac{C(t)}{C_0} \quad (1)$$

Donde  $C(t)$  es concentración en el tiempo  $t$  y  $C_0$  es la concentración inicial.

#### **2.5.3.2 Curva $E(t)$**

Se le denomina, también, función de distribución de tiempos de residencia (FDTR) o de edades a la salida del reactor. Da idea del tiempo que tarda una fracción del fluido en atravesar el reactor. Representa la concentración de trazador en cada instante de tiempo respecto de la cantidad inicial de trazador que se introduce al reactor. La función

$E(t)$  muestra la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida respecto del tiempo (Levenspiel, 2004).

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{C(t)t_m}{C_o V_o} \quad (2)$$

donde  $E(t)$  es la función de distribución,  $t_m$  es el tiempo espacial o tiempo medio de residencia,  $C_o$  es concentración inicial y  $V_o$  es el volumen inicial.

$E(t)$  está normalizada. Al conocer esta función, se puede estimar qué fracción del fluido existe entre dos tiempos cualquiera.

### 2.5.3.3 Curva $C(t)$

Es la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida frente al tiempo. Para efectuar esta normalización se divide la concentración por  $Q$  (área bajo la curva concentración-tiempo) (Levenspiel, 2004), por tanto la ecuación normalizada es:

$$\int_0^{\infty} \frac{C}{Q} dt = \int_0^{\infty} C dt = 1 \quad \text{siendo } Q = \int_0^{\infty} C dt \quad (3)$$

### 2.5.3.4 Relaciones entre las curvas $F$ , $C$ y $E$

Existen relaciones matemáticas entre las curvas  $F$ ,  $C$  y  $E$  en flujo estacionario, dichas expresiones son empleadas en el presente trabajo con el fin de obtener los modelos matemáticos propuestos (Ver Anexo A).

### 2.5.4 Tiempo Adimensional

Para determinar el flujo del fluido a travé.

s de recipientes reales, es frecuente utilizar las curvas  $E$  y  $F$  en función de un tiempo adimensional,  $\theta$ , que se define como el cociente entre el tiempo real y el tiempo espacial:

$$t_m = \frac{V}{Q} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{/s]} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{t}{t_m} = \frac{t}{\frac{V}{Q}} = \frac{t Q}{V} \quad (5)$$

Donde  $Q$  es el área bajo la curva de la gráfica concentración versus tiempo.

## 2.6 Trazadores

Los trazadores para ser seleccionados deben cumplir con algunos criterios, tales como: no deben ser biodegradables para evitar adsorción en la biomasa; estabilidad en el tiempo y bajo condiciones del proceso (pH y potencial redox); solubilidad en el agua y preferiblemente con elevado peso molecular para evitar problemas por difusión; rango de concentración con respuesta lineal y buena sensibilidad (Rocha et al., 2000). Las sustancias trazadoras pueden ser: colorantes como fluoresceína o rodamina; iones como cloruros especialmente de sodio, potasio o litio; fluoruros o nitratos; elementos radiactivos como isótopos; ácido clorhídrico o benzoico y otras sustancias químicas como alizarim, sapirol y naftol (CEPIS, 2004). La forma de analizarlos en la corriente de salida dependerá del tipo de trazador utilizado (absorbancia, pH, conductividad eléctrica, entre otros).

## 2.7 Modelos para Flujo No ideal

Los modelos se emplean para caracterizar los tipos de flujo no ideal. En algunos se establecen la analogía entre la mezcla en flujo real y la mezcla en los procesos difusionales y se denominan modelos de dispersión. En otros modelos se considera un conjunto de tanques de mezcla ideal, y hay otros en que se suponen varias regiones de flujo conectadas en serie o en paralelo. Los modelos por lo general, son empleados para

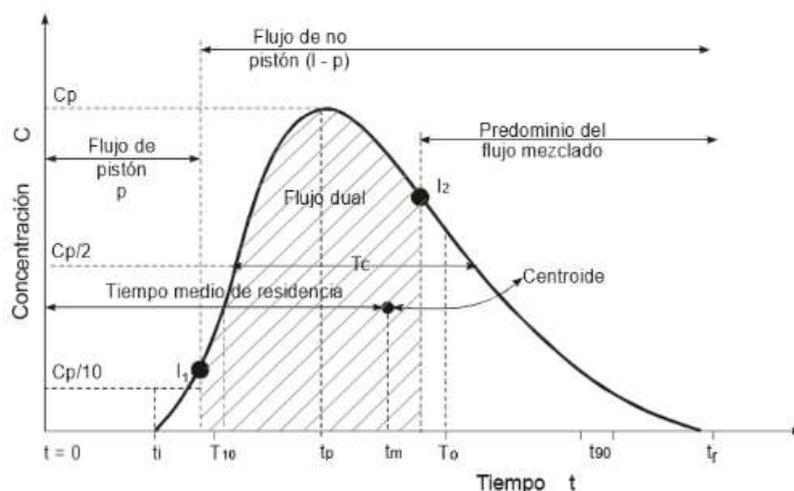
explicar las desviaciones de los sistemas reales respecto al flujo en pistón, tanques reales con agitación (González et al., 2000).

## 2.7.1 Modelos Matemáticos

En el trabajo investigativo se aplicaron los siguientes modelos: Ajuste de tendencia de la curva, Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick, Modelo de dispersión y Modelo de tanques en serie, los cuales se describen a continuación.

### 2.7.1.1 Ajuste de Curva de Tendencia

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la Figura 8.



**Figura 8.** Concentración del trazador en el efluente de un reactor.

Fuente: Gómez et al. (2013)

La curva de concentración contra tiempo ofrece información del comportamiento del flujo, por ejemplo el flujo de pistón puro, viene representado por el tiempo que transcurre hasta que aparece el trazador. Hirsch (1969) asume que dicho flujo se presenta hasta el punto de inflexión  $I_1$  (Figura 8), cuando la curva cambia de cóncava a convexa. De

este punto en adelante, el flujo debe considerarse como de no pistón. Entre dicho punto y el punto de inflexión I2 (Figura 8) en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinado). A partir del segundo punto de inflexión, el flujo tiene un carácter predominantemente mixto. Adicionalmente, de la figura anterior se deducen los siguientes parámetros:

$t_i$  = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$t_{10}$  = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador

$t_p$  = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

$t_m$  = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

$t_o$  = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención =  $V/Q$ .

$t_{90}$  = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

$t_f$  = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.

$C_o$  = concentración inicial.

$C_p$  = concentración máxima a la salida.

Empleando los parámetros anteriores, y otros dos como  $t_b$ , tiempo en el cual la concentración es mayor que  $C_p/10$  y  $t_c$ , tiempo en que la concentración es mayor que  $C_p/2$ , se pueden evaluar algunos criterios que permiten caracterizar el flujo dentro del reactor. En la Tabla 4 se describen los mencionados criterios y su importancia.

Además de las relaciones descritas, también se encuentra el Índice de Morrill (MDI), que se calcula mediante la ecuación 6 (CEPIS, 2004) y según la EPA un reactor tipo flujo pistón es aquel cuyo MDI < 2 (Metcalf y Eddy, 2003).

$$\text{Indice de Morrill} = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10\%}} \quad (6)$$

**Tabla 4.** Criterios de caracterización de flujo

Relación		Definición
$\frac{t_i}{t_o}$	(7)	Si, es igual a 1 para flujo de pistón, Si es igual a 0 para el flujo mezclado. Si es < 0.3 hay cortocircuito hidráulico
$\frac{t_m}{t_o}$	(8)	Si es < 1, existen cortocircuitos hidráulicos. Si > 1, errores experimentales o espacios muertos
$\frac{t_p}{t_o}$	(9)	Si, es igual a 1 para flujo de pistón, Si es igual a 0 para el flujo mezclado Si se aproxima a uno y es > 0.5, hay superioridad de flujo de pistón, Si se aproxima a 0, existe superioridad de flujo mezclado.
$\frac{t_c}{t_o}$	(10)	Si es igual al cociente $\Delta t_o/t_o$ hay flujo estable ideal. Si es cercano a 0.7 hay flujo mezclado.
$\frac{t_b}{t_o}$	(11)	Es igual al cociente $\Delta t_o/t_o$ para el flujo estable ideal Si es cercano a 2.3 hay flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	(12)	Es la excentricidad de la curva Es igual a cero para flujo de pistón Es mayor de 2.3 para flujo mezclado ideal.

### 2.7.1.2 Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick

Es un método cuantitativo muy utilizado en la evaluación hidrodinámica para determinar los porcentajes de flujo pistón, flujo de no pistón y zonas muertas. En el anexo B se relacionan los conceptos aplicados para este método (CEPIS, 2004).

### **2.7.1.3 Modelo de Dispersión o flujo Disperso en pistón**

Este modelo es también ampliamente aplicado para determinar el régimen de flujo de un sistema no ideal. Para el uso de este modelo es necesario considerar el flujo pistón como forma de difusión longitudinal, cuyo coeficiente de dispersión  $D$  ( $m^2/s$ ) representa este proceso. En el anexo B se adjunta los fundamentos teóricos que conlleva a aplicar es método (Levenspiel, 2004).

### **2.7.1.4 El modelo de Tanques en Serie**

Es otro modelo muy empleado para representar sistemas de flujo no ideal, en este modelo se supone que el reactor puede representarse por varios tanques de mezcla completa ideal del mismo tamaño y en serie, el único parámetro es el número de tanques (Levenspiel, 2004).

## **2.8 Parámetros físico-químicos de monitoreo de la calidad de agua**

En este numeral se describen los conceptos de algunos parámetros físicos-químicos que sirvieron de base para la evaluación de las condiciones del agua contaminada antes, durante y después de su tratamiento.

### **2.8.1 Temperatura**

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos. El aumento de la temperatura del agua puede provocar cambios en el desarrollo de las especies piscícolas.

Por otro lado, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento en las velocidades de las reacciones químicas que produce un aumento de la

temperatura, combinado con la reducción del oxígeno presente en las aguas superficiales, es causa frecuente de agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses de verano.

La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25°C y los 35 °C. Los procesos de digestión aerobia y de nitrificación se detienen cuando se alcanzan los 50°C. A temperaturas de alrededor de 15°C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad, mientras que las bacterias nitrificantes autótrofas dejan de actuar cuando la temperatura alcanza valores cercanos a los 5°C. Si se alcanzan temperaturas del orden de 2°C, incluso las bacterias quimioheterótrofas que actúan sobre la materia carbonosa dejan de actuar (CIDTA, 2010).

### **2.8.2 Potencial de Hidrógeno (pH)**

El potencial de hidrógeno, pH se define como como un valor numérico adimensional y se relaciona con el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno a una temperatura dada. Indica la intensidad del carácter ácido (acidez) o básico (alcalinidad) del agua y puede variar entre 0 y 14, donde 0 es el más ácido, 7 es neutro y 14 el más básico, y está controlado por los compuestos químicos disueltos (IDEAM, 2000).

La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas (CIDTA, 2010).

### **2.8.3 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica, depende de la presencia de iones, su concentración total, movilidad, valencia, concentración relativa y temperatura de medición y se expresa en microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Es un indicador del contenido de sales disueltas o de minerales en el agua (mineralización) (IDEAM, 2000).

#### **2.8.4 Oxígeno disuelto (OD)**

El oxígeno disuelto (OD) es el oxígeno libremente disponible en el agua. El déficit de oxígeno indica la diferencia del OD en el agua en relación con el máximo teórico que puede estar presente, calculado a partir de los valores de altitud, temperatura, salinidad y OD medidos en cada punto de monitoreo. En las aguas superficiales de Colombia, el OD varía entre 15 y 8 mg  $\text{O}_2/\text{l}$  a temperaturas entre  $0^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$  (IDEAM, 2000).

#### **2.8.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente por acción de los microorganismos aerobios en el agua. Es una oxidación más suave que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólo mide los compuestos biodegradables (asimilables por las bacterias). Normalmente se emplea la  $\text{DBO}_5$ , que mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días (Universidad de Sevilla, 2010).

Es el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado. La determinación del mismo está relacionado con la medición de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (Universidad de Sevilla, 2010).

#### **2.8.6 Alcalinidad**

La alcalinidad de un agua residual es consecuencia de la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoniaco. Los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad se determina por titulación con un ácido normalizado, expresándose los resultados en carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$  (CIDTA, 2010). El método clásico para el cálculo de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad (hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad Total} = T \times N \times 50000 \text{ /ml de Muestra utilizada} \quad (13)$$

Donde T es el volumen total de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  gastado en la titulación (volumen a la Fenolftaleina + volumen al naranja de Metilo) y N es la normalidad del  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

### **3 MARCO NORMATIVO**

En el marco teórico se mencionó que los humedales artificiales hacen parte de la categorización de los humedales según la convención Ramsar. Razón por la cual, se consideró enfatizar en este numeral sobre el marco legal de estos sistemas sin dejar de desconocer la normatividad existente para el control de la calidad del agua.

En Colombia existen disposiciones fraccionadas y dispersas relacionadas con los humedales, en los diferentes artículos del Código de los Recursos Naturales Renovables y en otros textos legales, como aquellos que se refieren a las aguas no marítimas, a los mares, a la fauna, entre otros. El término humedal aparece en la legislación ambiental colombiana con la Ley 357 de 1997, relacionada con la aprobación de la Convención de Ramsar, la cual precisa los ecosistemas que quedan incluidos bajo tal denominación. Esta Ley es la única norma que de manera específica y concreta impone obligaciones al Estado colombiano para la conservación y protección de los humedales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). En forma sucinta se describen las normas que rigen a los humedales en Colombia. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

1. Convención RAMSAR, 1971. Comunidad Internacional Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas.
2. Constitución Política de Colombia, 1991 Congreso de Colombia. Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos

naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Artículo 366. El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable. Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación.

3. Decreto-Ley 2811 de 1974 Congreso de Colombia, Código de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente. Artículo 8. Literal f, considera factor de contaminación ambiental los cambios nocivos del lecho de las aguas. Literal g, considera también como factor de contaminación, la extinción o disminución de la biodiversidad biológica. Artículo 9. Se refiere al uso de elementos ambientales y de recursos naturales renovables. Artículo 137. Señala que serán objeto de protección y control especial las fuentes, cascadas, lagos y otras corrientes de agua naturales o artificiales, que se encuentren en áreas declaradas dignas de protección. Artículo 329. Precisa que el sistema de parques nacionales tiene como uno de sus componentes las reservas naturales. Las reservas naturales son aquellas en las cuales existen condiciones de diversidad biológica destinada a la conservación. Investigación y estudio de sus riquezas naturales.
4. La ley 9 de 1979 tomó medidas de control sanitario de los usos del agua para la protección del medio ambiente, a fin de preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona con la salud humana.
5. Decreto número 475 de 1978 del Ministerio de Salud, que reglamenta las normas técnicas de calidad del agua potable.
6. Decreto 1541 de 1978 Ministerio de Agricultura. Por el cual se reglamenta la parte III del libro II del Decreto Ley 2811 de 1974; «De las aguas no marítimas» y

parcialmente la Ley 23 de 1973. Normas relacionadas con el recurso agua. Dominio, ocupación, restricciones, limitaciones, condiciones de obras hidráulicas, conservación y cargas pecuniarias de aguas, cauces y riberas.

7. Decreto 1594 de 1984 Ministerio de Agricultura. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título 1 de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI, Parte III, Libro II y el Título III de la parte III, Libro I, del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a Usos del Agua y Residuos Líquidos. Los usos de agua en los humedales, dados sus parámetros físicos-químicos son: Preservación de Flora y Fauna, agrícola, pecuario y recreativo. El recurso de agua comprende las superficies subterráneas, marinas y estuarianas, incluidas las aguas servidas. Se encuentran definidos los usos del agua así: a) Consumo humano y doméstico b) Preservación de flora y fauna c) Agrícola d) Pecuario e) Recreativo f) Industrial g) Transporte.
  
8. Ley 99 de 1993 Congreso de Colombia. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. Artículo 1. Dentro de los principios generales ambientales dispone en el numeral 2 que la biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible. Artículo 16. Literal g, autoriza al Presidente de la República para establecer un régimen de incentivos económicos, para el adecuado uso y aprovechamiento del medio ambiente y de los recursos renovables y para la recuperación y conservación de ecosistemas por parte de propietarios privados.
  
9. Resolución 157 de 2004 Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. MAVDT. Por la cual se reglamenta el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la convención RAMSAR.

10. Resolución 196 de 2006 MAVDT. "Por la cual se adopta la guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia".
  
11. Acuerdo 6 de 1990 Alcaldía Mayor de Bogotá y Concejo de Bogotá. Por medio del cual se adopta el Estatuto para el Ordenamiento Físico del Distrito Especial de Bogotá, y se dictan otras disposiciones Estatuto para el ordenamiento físico del Distrito Especial de Bogotá. Faculta a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB para realizar el acotamiento y demarcación de las rondas de los ríos, embalses, lagunas, quebradas y Canales. Los humedales forman parte integral del sistema hídrico, el cual está conformado por la ronda o área forestal de los cuerpos de agua. Se define la ronda hidráulica como: "la zona de reserva ecológica no edificable de uso público, constituida por una faja paralela a lado y lado de la línea del borde del cauce permanente de los ríos, embalses, lagunas, quebradas y canales, hasta 30 metros de ancho, que contempla las áreas inundables para el paso de crecientes no ordinarias y las necesarias para la rectificación, amortiguación, protección y equilibrio ecológico, las cuales no pueden ser utilizadas para fines diferentes a los señalados, ni para desarrollos urbanísticos y viales".
  
12. Acuerdo 02 de 1993, del Concejo de Bogotá. Prohíbe la desecación o relleno de lagunas y pantanos existentes y delega a los alcaldes locales la obligatoriedad de velar por el cumplimiento del Acuerdo. Acuerdo 19 de 1994, del Concejo de Bogotá. Por el cual se declaran como reservas ambientales naturales los humedales del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones que garanticen su cumplimiento.
  
13. Acuerdo 19 de 1996, del Concejo de Bogotá. Por medio del cual se adopta Estatuto General de la Protección Ambiental del Distrito Capital y normas básicas para garantizar la preservación y defensa del patrimonio ecológico, los recursos naturales y el medio ambiente.

14. Decreto 190 de 2004. Plan de Ordenamiento Territorial Concejo de Bogotá. Por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003. Se mencionan los artículos afines al proyecto de investigación: Artículos 72 y 75 en ellos se definen la Estructura Ecológica Principal, EEP y sus componentes respetivamente. Artículos 79, 81 y 83 (en su párrafo 5) definen, clasifican y establecen los planes de manejo ambiental del Sistema de Áreas Protegidas, en forma respectiva. Artículo 86 en su párrafo 2, involucra a la EAAB para realizar los estudios y acciones necesarias para mantener, recuperar y conservar los humedales en sus componentes, hidráulico, sanitario, biótico y urbanístico realizando además el seguimiento técnico de las zonas de ronda y de manejo y preservación ambiental, siguiendo las directrices de la autoridad ambiental competente en el marco del Sistema Ambiental del Distrito Capital SIAC, el Plan de Gestión Ambiental del D.C, PGA y con base en las directrices de la Convención de Ramsar (Ley 357 de 1997). Artículos 94 y 95 define, clasifica e identifica los Parques Ecológicos Distritales. La clasificación se da en dos tipos: Parque Ecológico Distrital de Montaña y Parque Ecológico Distrital de Humedal. Artículo 96 establece los regímenes de usos del Parque Ecológico Distrital. Artículo 118 define las acciones requeridas para el Programa de descontaminación y recuperación ecológica e hidráulica de humedales. Consta de dos componentes: descontaminación y recuperación hidráulica, que ejecutará la EAAB, bajo la coordinación del DAMA, en el marco del Sistema Ambiental del Distrito Capital (SIAC). Existe un párrafo, en el cual se describe los lineamientos del Programa de Descontaminación y Recuperación Ecológica e Hidráulica de Humedales se acogerán a los principios de la Convención Ramsar, 1971, adoptada por Colombia mediante la Ley 357 de 1997.
15. Decreto 062 del 2006 Alcalde Mayor. Por medio del cual se establecen mecanismos. Lineamientos y directrices para la elaboración y ejecución de los respectivos planes de manejo ambiental para los humedales ubicados dentro del perímetro urbano del Distrito Capital.

16. Decreto 624 de 2007 Alcalde Mayor. Por el cual se adopta la visión, objetivos y principios de la política de humedales del Distrito Capital.
17. Decreto 386 de 2008 Alcalde Mayor. Por el cual se adoptan medidas para recuperar, proteger y preservar los humedales, sus zonas de ronda hidráulica y de manejo y preservación ambiental, del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones.
18. Acuerdo 79 de 2003 Código de policía de Bogotá D.C. Artículo 75. Chucuas y humedales. Las chucuas y humedales y sus zonas de RH y ZMPA son parte del sistema de drenaje natural del Distrito y del espacio público. Para su uso y tratamiento se aplicará lo dispuesto en el POT. Artículo 76. La conservación y protección de las chucuas y los humedales demandan el compromiso de todos, por lo cual se deben observar los siguientes comportamientos: cuidar y velar por la preservación de la integridad física y natural de las áreas y no realizar acciones que puedan conducir a su reducción, parcelación o desmembramiento, como el relleno artificial y construcción de barreras, diques o canales, actividades agrícolas y ganaderas, usos residenciales, comerciales e institucionales sin la autorización de la autoridad ambiental competente.
19. Resolución 631 de 2015. Por la cual establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y otras disposiciones.

## **4 ESTADO DEL ARTE**

Existe una gran variedad de estudios sobre el uso de los humedales artificiales o construidos en el tratamiento de aguas residuales. La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en humedales artificiales fue realizada por Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck (GIZ, 2011). Sin embargo, los humedales artificiales tomaron auge en la década de los años noventa cuando se incrementó su uso debido a la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y aguas pluviales).

Los trabajos reportados describen el empleo de diferentes plantas macrófitas, además evalúan su eficiencia de remoción para contaminantes específicos. No obstante, son pocos los trabajos a nivel nacional e internacional que muestran investigaciones respecto al comportamiento hidrodinámico. La presente sección describe algunos trabajos referentes al empleo de humedales artificiales y su importancia para la remoción de contaminantes, finalizando con los estudios que hacen aportes valiosos a la presente investigación.

### **4.1 Estudios Internacionales**

#### **4.1.1 Uso de Humedales Artificiales**

La Agencia de Protección Ambiental EPA, en el año 2000 publicó un folleto informativo (832-F-00-023) sobre la tecnología de depuración de aguas residuales mediante humedales de flujo sub-superficial (SSF, por sus siglas en inglés) describiendo sus ventajas y desventajas, criterios de diseño, operación y mantenimiento. Adicionalmente, presenta un cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre un humedal SSF contra un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales. En el parangón, se destaca la conveniencia económica de los humedales artificiales sobre el método convencional, ya que, en el tratamiento de 1000 galones de agua depurada,

mediante este tipo de humedales, es de U\$0.73 frente al del método convencional, que es de U\$3.06.

En Europa, específicamente España, se destaca la investigación realizada por Rojo (2000), quien recopiló varios trabajos de investigación sobre la depuración de aguas en humedales. Dicho autor, encontró que el 90% se realiza mediante sistemas de humedales artificiales, de los cuales un 37% alcanzan una eliminación del 99% de los contaminantes, lo que evidencia la buena eficiencia de remoción a lo largo de diferentes países y condiciones.

Respecto al uso de materiales filtrantes en los procesos de remoción de sustancias en diferentes contextos, se reportan varias investigaciones al respecto.

En Australia, Do (2000) investigó sobre el uso de materiales como carbón nanotubo, carbón whisker, carbón micro-poroso alloy, carbón meso-poroso, materiales altamente porosos útiles en los procesos de adsorción que permiten considerar la viabilidad para su empleo dentro del tratamiento de agua.

En Estados Unidos, Olson et al. (2000) encontraron un buen desempeño en la eficiencia de adsorción de sales orgánicas de cloro generadas en la desinfección de agua potable, empleando filtros de carbón activado en polvo obtenido a partir de lignito.

En México, Aguirre et al. (2001), evidenciaron el empleo de coque de petróleo, otro material filtrante, en el tratamiento de aguas residuales. En el estudio se evaluó y comparó la eficiencia de los procesos de adsorción y bio-adsorción del coque de petróleo con un carbón activado comercial, mostrando mayor eficiencia de remoción de este último.

En Noruega, Jenssen et al. (2005) aportaron con su investigación el uso y operación de un humedal construido en un sistema depurativo de tratamiento terciario. El sistema quedó constituido por un tanque séptico, seguido de un bio-filtro de flujo descendente

vertical aeróbico y finalmente un humedal horizontal de flujo sub-superficial. En dicho trabajo, se destacó la importancia de un tratamiento biológico como el bio-filtro aeróbico, para reducir la carga orgánica especialmente en épocas frías donde el humedal artificial disminuye su eficiencia.

En México, García et al. (2006) presentaron un estudio en el que se evalúa una planta de tratamiento constituida por un tanque Imhoff, seguido de ocho humedales en paralelo con la misma superficie (56 m<sup>2</sup> cada uno), que reciben el mismo caudal de agua residual y que tienen diferentes características de diseño (relación largo-ancho, tamaño del medio granular y profundidad). Se destacó la influencia de las dimensiones de los humedales artificiales en la eficiencia de remoción (García et al., 2006).

El trabajo realizado en la República Checa publicado por Vymazal (2008) resume detalladamente la operación de humedales artificiales de flujo sub-superficial durante ocho años, plantando *Phragmites australis* y *Phalaris arundinacea* en una superficie total de 5000 m<sup>2</sup>. La eliminación de fósforo es estable pero baja, el porcentaje de remoción de amoníaco alcanzó un 19.4 % y la separación de sólidos suspendidos totales promedio alcanzó 89.1% con una concentración media de flujo de salida de 7.9 mg/l. El autor describe también la eliminación de 34 elementos traza en un humedal de flujo horizontal durante periodo de tiempo de dos años aproximadamente.

En Asia, Vashi et al. (2011) estudiaron los efluentes con contenidos de sales minerales y tinturas en la industria de tejido, usando carbón activado con dosis variable, diferentes tiempos de contacto y el efecto de la temperatura en la remoción de la demanda orgánica de carbono y la demanda biológica de carbono. La reducción de estas dos variables fueron de 97.6% y 93.7% respectivamente.

Otro trabajo realizado en España, por Pozo Morales (2012), también reporta estudios sobre la colmatación del sistema, el principal problema de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Esta investigación se llevó a cabo con las aguas residuales domésticas reales con dos diferentes arreglos de sustrato. Se evidenció, que

un cambio en el diseño del lecho de la grava y la clase de ésta afecta en la acumulación de materiales en el lecho.

En Suecia, Nazaitulshila et al. (2013) publicaron el trabajo en el que se comparó la eficiencia de remoción de un humedal de flujo vertical sub-superficial (VF-SSF, por sus siglas en inglés) y uno horizontal (SSF, por sus siglas en inglés) para el tratamiento de lixiviados. En este estudio, se demostró que el humedal VF-SSF presentó mayor retiro de nitrógeno como amoníaco y Mn comparado con SSF. En contraste, el humedal de tipo SSF exhibió mayor eliminación de nitrógeno como nitratos y Fe y iones fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$ . Tanto los humedales VF-SSF y SSF podrían alcanzar hasta 95% de eliminación de nutrientes y más del 80% de presencia de metales pesados de los lixiviados.

#### **4.1.2 Comportamiento Hidrodinámico de Humedales Artificiales.**

Es evidente que el uso de humedales artificiales ha tomado gran importancia para el proceso de descontaminación de cuerpos de agua, sin embargo, dichos trabajos se centran en la efectividad de remoción del sistema, más no en su parte hidrodinámica.

En la década de los setenta, Mikio Hino propuso el nombre de ecohidrodinámica para promover el estudio de temas tales como el flujo de agua en canales con vegetación, la purificación del agua por medio de microorganismos, el efecto de la turbulencia en la dinámica del fitoplancton y la difusión de materiales radiactivos en cuerpos de agua (Hino, 1981, citado por García, 1996).

Al mismo tiempo, los ecólogos han tratado de utilizar principios básicos de la hidrodinámica para comprender el metabolismo, alimentación y comportamiento de microorganismos en ambientes acuáticos naturales (Stazner et al., 1988, citado por García, 1996).

A continuación se presentan algunos trabajos que son tomados como referencia para la realización del presente proyecto.

Giácoman et al. (2003) realizaron un análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón, encontrando la existencia de más de un tipo de cinética al describir la distribución del tiempo de residencia en un sistema, midiendo el cambio de conductividad debido a la inyección puntual de un trazador en el mismo. Los resultados indicaron que al inicio del sistema ya se presentan los efectos de dispersión en el flujo, principalmente debido a factores de perfil de velocidad. Los datos registrados a la salida del sistema señalan la existencia de zonas muertas. Estas dos situaciones afectan los tiempos de permanencia del trazador.

Pérez et al. (2008) en México investigaron el comportamiento hidráulico de un humedal artificial a escala de laboratorio, considerando el régimen de flujo en un medio poroso. Además, se analizó el efecto potencial del sistema como fuente de tratamiento de bajo consumo de energía, bajo costo y valor agregado mediante la utilización de plantas de *Gossypium herbaceum* y diferentes sustratos de piedra pómez y grava. Para la determinación del comportamiento del humedal se utilizó como trazador el  $\text{KMnO}_4$  a diferentes caudales para cada uno de los sustratos. El comportamiento del sistema para el caudal más bajo presentó un régimen de flujo pistón, mientras que en los otros dos caudales se presentó una mezcla de dual.

Por su parte, en Venezuela, Ferrer et al. (2013), determinaron el tiempo de retención hidráulico en dos humedales artificiales de flujo horizontal a escala piloto, utilizando como sustratos grava y arena. El trazador químico,  $\text{LiCl}$ , fue inyectado como una señal impulso, empleando como técnica de análisis la espectrofotometría de absorción atómica. El análisis de las muestras se realizó en tres etapas: 1) flujo horizontal sin plantas, 2) afluentes sumergidos y 3) humedales plantados. Los resultados indicaron que el tiempo de retención hidráulico TRH, tuvo una tendencia similar en el comportamiento del sistema de los humedales para las tres etapas: TRH = 2.70 - 1.38 - 1.33 h en el humedal 1 y de 2.84 - 0.98 - 1.09 h en humedal 2. El porcentaje de recuperación del trazador varió entre 55% y el 90%.

## 4.2 Estudios Nacionales

En Colombia se han realizado estudios encaminados a la evaluación hidrodinámica de humedales construidos y sistemas de depuración utilizando para ello la inyección de diferentes trazadores al sistema. Seguidamente se describen algunos de ellos y su aporte a la presente investigación.

Sandoval et al. (2007), en el Valle del Cauca realizaron el análisis de desempeño de un humedal de flujo subsuperficial en zonas tropicales basado en modelos de hidrodinámica y una cinética de primer orden. En este trabajo se combinaron seis caracterizaciones de tipo hidrodinámicas y fisicoquímicas con modelos matemáticos para evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica de un humedal artificial subsuperficial sembrando *Phragmites australis*, empleado para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

Lara et al. (2007) determinaron entre otros el tiempo de retención en un humedal artificial, mediante la adición del trazador cloruro de sodio a diferentes concentraciones. Se encontró que el tiempo mediano en el sentido de flujo fue de 31.7 horas, lo que corresponde a un tiempo de retención hidráulico del sistema de 63.4 horas (2.64 días), muy superior a los 1.6 días establecidos en el diseño.

Vargas et al. (2008), realizaron el diseño e implementación de un reactor biológico de cargas secuenciales de flujo tipo pistón a escala de laboratorio para evaluar el comportamiento hidrodinámico mediante los métodos de Wolf-Resnick y el análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador (curva de Gauss). Se emplearon dos trazadores, fluoresceína y cloruro de sodio dosificados instantáneamente con el fin de medir la conductividad durante un TRH teórico de 10 horas. Se realizaron seis pruebas para los dos escenarios propuestos, identificando la unidad más eficiente hidráulicamente. Las características hidrodinámicas para el escenario 1 fueron: TRH experimental (560 min), porcentaje de flujo a pistón (24.12%), porcentaje de mezcla completa (75.88%), porcentaje de zonas muertas (5.02%). Las características

hidrodinámicas para el escenario 2, fueron: TRH experimental (610 min), porcentaje de flujo a pistón (66.6%), porcentaje de mezcla completa (33.4%), porcentaje de zonas muertas (4.2%) evidenciando que este último escenario presentó un mejor comportamiento hidrodinámico a lo largo de las pruebas realizadas.

Angulo et al. (2009), realizaron una investigación para el tratamiento de fenoles en reactores híbridos constituidos por humedales artificiales y reactores anaerobios de flujo tipo pistón, a escala piloto. Las aguas a tratar fueron las generadas en la Clínica Veterinaria de la Universidad de la Salle sede de la Floresta en la ciudad de Bogotá D.C. Se evaluó el comportamiento hidrodinámico del reactor híbrido mediante el modelo Wolf-Resnick y el modelo ADZ, (Rodríguez, 2005) que simplifica el fenómeno dispersivo en una zona de almacenamiento simple con un volumen definido y con un tiempo de residencia asociado. Se logró establecer parámetros de diseño y mayores zonas de retención de fenoles dentro del reactor, para su tratamiento.

Cano (2010) realizó una comparación entre la rodamina WT y el cloruro de sodio (NaCl), como sustancias trazadoras para evaluar el régimen hidrodinámico mediante la distribución de tiempos de residencia de reactores a escala de laboratorio encontrando que la rodamina presentó mejores resultados. Adicionalmente, evaluó las diferentes relaciones geométricas y configuraciones en los reactores sin diferencias significativas al respecto.

Rosero et al. (2011) propusieron el uso de trazadores fluorescentes en la modelación hidrodinámica de humedales construidos con el objetivo de conocer la distribución de tiempos de residencia de partículas que ingresan al sistema y en general, el patrón de flujo. Reportaron que algunos trazadores como la rodamina WT presentan fenómenos de adsorción sobre el substrato; situación que debe ser considerada en el análisis de curvas de distribución de tiempos de residencia por medio de los procesos de advección-dispersión.

Sabas (2011) evaluó hidrodinámicamente humedales construidos con flujo horizontal subsuperficial a escala de laboratorio sin plantar, mediante el análisis de la distribución de tiempos de residencia obtenidos con rodamina WT (RWT) y cloruro de litio (LiCl) como sustancias trazadoras. Se comparó el desempeño de estos trazadores en el estudio de los efectos de la presencia de biomasa en el medio filtrante, diferentes relaciones geométricas y configuraciones en los reactores. En presencia de biomasa, el tiempo de residencia real se disminuyó en un 34% respecto al tiempo de residencia teórico, y aunque la tendencia hacia la disminución de los tiempos reales se presentó con los dos trazadores, el LiCl reportó mayores (23.45 minutos) que la RWT (17.62 minutos). Se recomendó utilizar LiCl como trazador en este tipo de humedales construidos. Se concluyó que la geometría y la presencia de baffles no presentaron diferencias significativas en el desempeño hidrodinámico.

## 5 JUSTIFICACIÓN

Los humedales proporcionan recursos naturales de gran importancia para la sociedad. A fin de conservarlos, su aprovechamiento debe enmarcarse en el uso sostenible. Este concepto implica el uso que produzca mayor beneficio continuo para las generaciones presentes, manteniendo al mismo tiempo su potencial para satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras.

Los humedales además de desempeñar un papel fundamental en el ciclo del agua, sustentan una diversidad biológica de crucial importancia y en muchos casos constituyen hábitats críticos para especies que se encuentran amenazadas de extinción. Así mismo, dada su alta productividad, pueden albergar poblaciones de animales muy numerosas. Muchas especies están asociadas a los humedales ya sea en una etapa de su ciclo de vida, para nidificar, descansar o alimentarse. El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida. Los humedales artificiales son una alternativa de tratamiento debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento.

La mejora en la calidad del agua en humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para duplicar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales.

Dentro de los sistemas artificiales se destacan los humedales de flujo sub-superficial (SSF), diseñados específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que contienen un medio apropiado. La grava es el medio más utilizado en este tipo de humedales, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de

materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel sub-superficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

El presente proyecto, plantea introducir elementos granulares más porosos, de mayor permeabilidad y buena dureza como el carbón activado, la antracita y el coque a fin de evaluar el comportamiento hidrodinámico en este tipo de humedales. Adicionalmente, dado que estos materiales son utilizados ampliamente en el proceso de remoción de contaminantes, sería oportuno evaluar el comportamiento del humedal artificial con estos sustratos mediante el análisis de algunos parámetros físicos químicos en un agua residual. Una evaluación de este tipo permitirá optimizar el diseño hidráulico de un humedal artificial de manera que se asegure el éxito de su operación, ya que la mayoría, por no decir todos, los sistemas diseñados actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y utilizan como medios soportes la grava y arena. Estos sistemas adicionalmente no presentan restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

El diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se ha centrado fundamentalmente en el proceso bioquímico dejando en segundo plano aspectos hidrodinámicos como las características de flujo, régimen de mezcla, tiempos de residencia, geometría del reactor, estado de agregación de elementos del fluido, entre otros, los cuales influyen en el desempeño de los procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento. Por tanto, el conocimiento de la hidrodinámica del sistema permitirá conocer el régimen de flujo del humedal, a fin de garantizar una mayor eficiencia operativa.

## 6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es menester citar textualmente a García en su libro Hidrodinámica Ambiental: “la ingeniería hidráulica y quienes la practican enfrentan hoy una amplia gama de problemas en las cuales la preservación y mejoramiento del medio ambiente juegan un papel importante. El grado de desarrollo industrial de una región o un país es el principal determinante de tipo de problemas de hidráulica ambiental que pueden esperarse”.

Son muchas las investigaciones realizadas en las que se emplean humedales artificiales tanto superficiales como subsuperficiales. Dichos trabajos están centrados principalmente en el uso de diversas macrófitas tradicionales o endémicas y la evaluación de su eficiencia de remoción en contaminantes como materia orgánica, nitrógeno, fósforo y metales pesados. Sin embargo, predecir el comportamiento hidrodinámico de elementos contaminantes en aguas residuales al interior de un humedal construido, así como la distribución de tiempos de residencia del conjunto de partículas que ingresan a éste y la distribución espacio-temporal de la concentración, son escasas, y asumen en el diseño un sistema de patrón de flujo tipo pistón. Las investigaciones que se han hecho con humedales construidos han utilizado materiales de lecho filtrante como la grava, arena, roca triturada en zonas templadas mas no en zonas tropicales como Colombia y como se dijo previamente apuntan a encontrar el porcentaje de remoción ligado a la eficiencia de los medios filtrantes, descuidando el comportamiento hidrodinámico, factor preponderante en el diseño, operación y eficiencia de los humedales construidos.

El presente trabajo pretende abordar una investigación que estudie dicho comportamiento para materiales granulares específicos como coque, carbón antracita y carbón activado en humedales construidos de flujo sub-superficial y su evaluación de algunos parámetros físico-químicos en el proceso de tratamiento en un agua residual. Además, con una característica física fundamental, su mayor porosidad con respecto a los convencionales, siendo más efectivos en el proceso de filtración y depuración de

aguas. Por otro lado, este proyecto es base fundamental para próximos estudios que involucren el porcentaje de eficiencia de remoción. Por lo anteriormente expuesto se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿cuál es el tipo de patrón de flujo de un humedal construido de flujo sub-superficial que utilice como lechos filtrantes el carbón activado, la antracita y el coque de manera individual o en mezcla? y ¿qué efectos tendrá sobre algunos parámetros físico-químicos de un agua residual el uso de estos lechos filtrantes?

## **7 OBJETIVOS**

### **7.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial de flujo sub-superficial a escala piloto utilizando como medios filtrantes antracita, carbón activado y coque de manera individual o mezclados y valorar su efecto en el tratamiento de un agua residual, mediante algunos parámetros físico-químicos.

#### **7.1.1 Objetivos Específicos**

7.1.1.1 Calcular la porosidad y tiempo de retención hidráulico teórico de los materiales granulares utilizados como lechos filtrantes, propuestos en la investigación.

7.1.1.2 Diseñar y construir un humedal artificial a escala piloto.

7.1.1.3 Determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) real para cada uno de los tres medios filtrantes en forma individual o mezclado utilizando un trazador químico.

7.1.1.4 Evaluar el comportamiento hidrodinámico del humedal construido a escala de piloto utilizando tres lechos filtrantes en forma individual y una mezcla de ellos en un solo lecho.

7.1.1.5 Evaluar el cambio de algunos parámetros físico-químicos de un agua residual al ser alimentado en el humedal artificial con los lechos en estudio.

#### **7.1.2 Objetivo Pedagógico**

Desarrollar un protocolo de operación y funcionamiento del sistema construido para poner en práctica con los educandos del Colegio Delia Zapata Olivella, algunos conceptos de las ciencias naturales y de la educación ambiental.

## **8 HIPÓTESIS**

Al emplear materiales granulares y carbonosos tales como, el carbón activado, el carbón antracita y el coque, como lechos filtrantes en los humedales artificiales de flujo sub-superficial, es válido aceptar que el comportamiento hidrodinámico de este sistema tendrá un patrón de flujo tipo pistón de manera que se afecten algunas propiedades físico-químicas de las aguas a tratar.

## **9 MATERIALES Y MÉTODOS**

En este acápite se describen las características llevadas a cabo durante la práctica experimental para cumplir con los objetivos del proyecto, de tal manera que incorpore tanto los elementos desde el punto de vista de la cinética del proceso de tratamiento, como los elementos geométricos e hidráulicos con la comprobación del tipo de flujo a esperar dentro el humedal y la operación del humedal artificial en un agua contaminada, utilizando como lechos de soporte el carbón antracita, el carbón activado y el coque y una mezcla de los tres.

### **9.1 Cálculos Previos**

#### **9.1.1 Volumen Útil del Humedal**

Corresponde a las dimensiones del humedal ancho: 0.28 m, longitud: 0.58 m y su altura efectiva: 0.35 m.

$$V_T = 0.58 \text{ m} \times 0.28 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} = 0.0568 \text{ m}^3$$

#### **9.1.2 Concentración del Trazador**

El trazador empleado en la investigación es cloruro de sodio, NaCl, con un 98 % de pureza según información de la casa comercializadora. Sus propiedades físicas como solubilidad permiten un fácil y sencillo seguimiento en la concentración de la solución en la corriente de salida. Además, cabe resaltar la facilidad de la logística empleada al realizar la práctica con el trazador mencionado.

El cálculo de la concentración de la solución del cloruro de sodio, en iones cloruro, en mg/l parte de datos de la literatura técnica, donde dicha concentración debe estar entre

30 y 50 mg/l de iones Cl<sup>-</sup> (CEPIS, 2004). Para el caso particular se empleó el promedio entre estas dos concentraciones (40 mg/l), de manera que, la cantidad requerida de cloruro de sodio se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \cdot K \cdot Co}{L} \quad (14)$$

donde P es la cantidad de cloruro de sodio en g, V es el volumen útil del humedal en m<sup>3</sup>, K es una constante de la relación estequiométrica, cloruro de sodio/ión cloruro= 1.65, Co es la concentración de iones cloruro (40 mg/l) y L es el porcentaje de pureza de la sal.

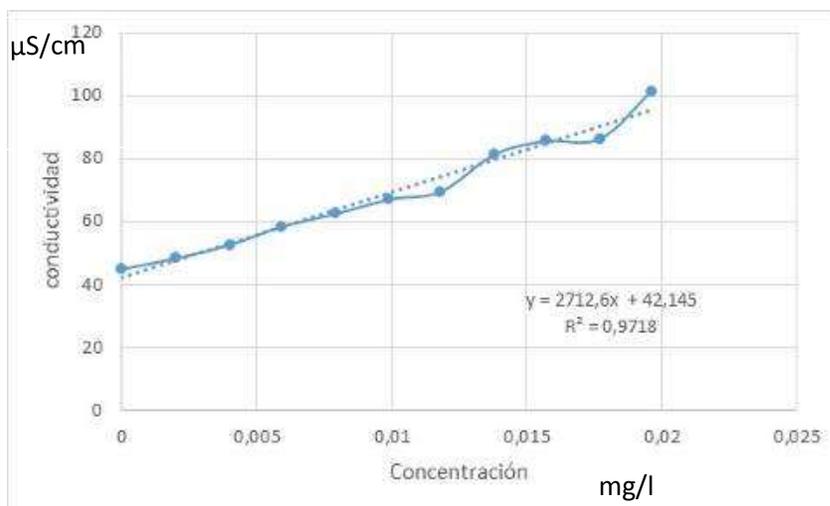
$$P = \frac{0.0568 \text{ m}^3 \times 0.598 \times 1.65 \times 40 \text{ mg/l} \times 1000}{0.98 \times 1000}$$

P= 2.0 g

La solución de la sal se preparó en 1000 ml agua destilada obteniéndose una concentración de 2.0 g/l.

### 9.1.2.1 Curva de Calibración Conductividad versus Concentración de NaCl

Se tomaron muestras del agua en un matraz de Erlenmeyer de 1000 ml (1 l) en el sitio de alimentación al humedal construido y se les agregó una masa específica de cloruro de sodio de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5 y 2.0 gramos agitando vigorosamente y luego se procedió a hacer la lectura de la conductividad a cada una de ellas. Es de anotar, que antes de agregársele la cantidad predicha de sal, se tomó la lectura de la conductividad del agua que se recoge en el matraz, dado que la conductividad del agua puede variar. Con los cálculos de la conductividad neta y la concentración de cloruro de sodio se realizó una gráfica en la cual en el eje “Y” se ubicaron las lecturas de conductividad y en el eje “X” la concentración de la sal. Se correlacionó la curva obtenida a fin de verificar el mejor ajuste. En la Figura 9 se puede apreciar la curva.



**Figura 9.** Curva de calibración conductividad versus concentración

### 9.1.3 Porosidad del Lecho

La porosidad del lecho se determinó tanto a nivel de laboratorio como a nivel piloto. A nivel de laboratorio, se determinó la porosidad ( $\epsilon$ ) del medio soporte llenando un recipiente (vaso de precipitados) de volumen conocido ( $V_1 = 1000$  ml) con el lecho seleccionado para la práctica (carbón activado, carbón antracita o coque) y se le adicionó un volumen de agua ( $V_2$ ) hasta alcanzar la capacidad total del vaso de precipitados. El volumen  $V_2$  se obtiene mediante un proceso de filtración de tal manera que se recoja el filtrado (agua) libre de sedimentos y se mide en una probeta.

Para determinar esta propiedad física a nivel piloto, se llenó el humedal con cada material de soporte a experimentar en la práctica, hasta su altura efectiva de trabajo. Seguidamente, se agregó agua hasta dicho nivel y se midió el volumen gastado (Kadlec y Knight, 1996). La porosidad se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{V}{VT} \tag{15}$$

Donde  $\epsilon$  es la porosidad del lecho, V es el volumen gastado en ml y  $V_T$  es la capacidad total del recipiente en ml. Para el cálculo del volumen del humedal se parte de las dimensiones ya mencionadas anteriormente.

Se aclara, que los porcentajes de lecho fueron 35% de antracita, 30% de coque y 35% de carbón activado para el caso de la evaluación de mezcla de materiales.

La Tabla 5 resume las porosidades calculadas para cada uno de los materiales a utilizar como lechos soportes, según la metodología descrita previamente.

**Tabla 5.** Porosidad del Lecho

Material	Carbón Activado	Carbón Antracita	Coque	Mezcla
Porosidad $\epsilon$	0.385	0.448	0.590	0.465

#### 9.1.4 Tiempo de Retención Hidráulico Teórico

El tiempo de retención hidráulico teórico (TRH) está definido por la ecuación 16, (Kadlec y Wallace, 2009):

$$TRH=V/Q = \epsilon(L W h)*1000 /Q \quad (16)$$

donde, V representa el volumen efectivo en l, L es el largo del humedal en m, h es la altura en m y Q el caudal en l/min. Cabe aclarar que el valor de Q recomendado es 0.454 l/min de acuerdo con estudios previos de humedales artificiales (Cano y Luz, 2010). Los datos obtenidos empleado la ecuación mencionada se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Tiempo de Retención Hidráulica Teórico

Material	Carbón Activado	Carbón Antracita	Coque	Mezcla
TRH min	28.72	56.49	74.52	58.73

## 9.2 Fase Experimental de Laboratorio

### 9.2.1 Lugar de Trabajo

Esta fase se llevó a cabo en el laboratorio de química del Colegio Delia Zapata Olivella, ubicado en la calle 144 C N 141 A 51, localidad 11 de Suba. Las razones fundamentales de selección de este sitio de trabajo, fueron: 1) el componente pedagógico que tiene el proyecto y 2) la cercanía del canal de Afidro (lugar donde se tomaron las muestras de agua para ser alimentadas al humedal artificial) con el colegio. Y de esta forma, facilitarle a los educandos de la mencionada institución su presencia en la participación del proyecto en lo concerniente a la parte experimental.

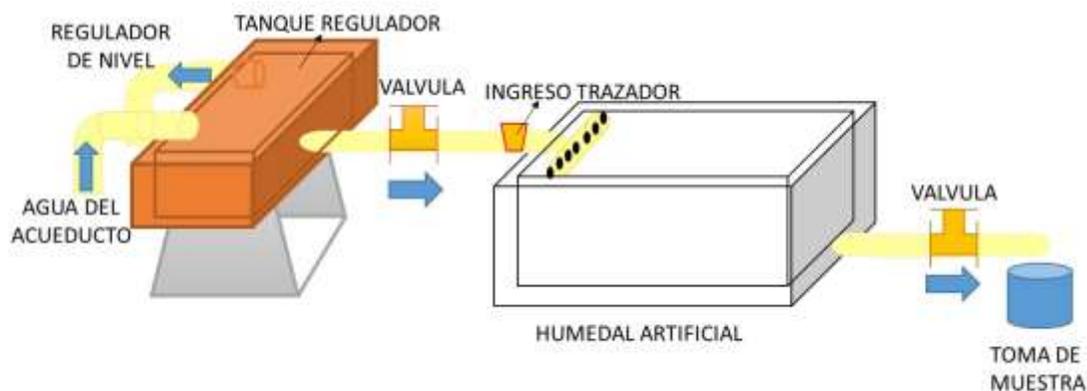
El procedimiento experimental se dividió en tres etapas. La primera etapa, previa a las etapas experimentales en cuanto a la evaluación hidrodinámica y la valoración de algunos parámetros físicos-químicos en el agua a tratar, se realizó en el mes de noviembre de 2014, y consistió en: a) la búsqueda de los materiales granulares empleados como lechos filtrantes, b) realizar los ajustes a los tamaños de grano adecuados para fase experimental, c) la construcción del humedal según la literatura consultada (Sabas, 2011; Cano, 2010), d) el alistamiento de materiales para manejo y control de fluidos, e) el cálculo de la porosidad a nivel de laboratorio y su puesta a punto. La segunda etapa operativa y experimental se realizó durante todo el mes de diciembre de 2014 y los primeros días de enero de 2015, donde se determinaron y evaluaron las características hidrodinámicas del humedal. En la etapa final se realizó una parte práctica que consistió en alimentar al humedal artificial con agua contaminada procedente del canal Afidro (que descarga sus aguas al humedal de la Conejera), y

evaluar el cambio de algunos parámetros físico-químicos. Esta etapa se realizó en el mes de Julio de 2015. El procedimiento se describe a continuación.

### 9.2.2 Montaje del Humedal

El humedal artificial seleccionado es de flujo horizontal sub-superficial, dada las ventajas desde el punto de vista de proceso que presenta este sistema con respecto al de flujo superficial. Por otra parte, el proyecto investigativo, utiliza como materiales de soporte el carbón antracita, el carbón activado, el coque y un lecho mixto entre estos tres materiales.

El humedal seleccionado se construyó con las siguientes especificaciones técnicas basado en literatura previamente consultada (Sabas, 2011): material acrílico de 1 cm de espesor, relación largo:ancho de 2:1, longitud: 58 cm, ancho: 28 cm, altura: 40 cm y pendiente longitudinal del fondo del lecho del 1%. Para garantizar una distribución uniforme de la corriente de alimentación a lo largo de humedal se instaló una flauta con aberturas de 2 mm y separación entre cada una de ellas de 1 cm. La corriente de salida del humedal consistió en un orificio de 5 mm ubicado en la parte central del fondo (costado opuesto de la corriente de entrada). Adicionalmente, para los ensayos realizados con carbón activado y lecho mezclado, se instaló una malla plástica de tamaño de abertura pequeña. Un esquema que representa este montaje se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Montaje de humedal

### 9.2.3 Materiales Granulares empleados como Lechos Filtrantes

Los materiales de soporte utilizados fueron carbón activado, carbón antracita, coque y una mezcla entre estos tres, procedentes de la región cundiboyacense.

#### 9.2.3.1 Carbón Activado

Se utilizó carbón activado producido en Boyacá con un tamaño de grano de 3 mm. Este es el mayor tamaño que se consiguió en el mercado, comercializado por la empresa Antracitas de Cundinamarca.

#### 9.2.3.2 Carbón Antracita

Material procedente de la zona carbonífera de Tierra Negra en Cundinamarca. El tamaño del grano fue del orden de los 50 mm.

#### 9.2.3.3 Coque

Material carbonoso proveniente de la región de Samacá (Boyacá), comercializado por la empresa Antracitas de Cundinamarca. El tamaño de grano empleado para la investigación fue del orden de los 20 mm. En la Figura 11, se observan los materiales empleados en el trabajo.



**Figura 11.** Materiales granulares empleados en los ensayos

#### **9.2.3.4 Lecho Mezclado**

Compuesto por la mezcla de los tres materiales antes mencionados en la siguiente proporción: 35% carbón antracita, 30% coque y 35% carbón activado, según el orden de distribución de flujo en el humedal.

### **9.3 Evaluación Hidrodinámica**

El comportamiento hidrodinámico del flujo puede evaluarse conociendo la distribución de los tiempos de retención del fluido dentro del humedal para lo cual se empleó el método estímulo-respuesta, aplicando cloruro de sodio (NaCl) en solución como trazador a la entrada del humedal (estímulo) y midiendo la conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a la salida (respuesta) con un conductivímetro, modelo 105 A, marca Thermo Orion y con un rango de medición de 0.001 a 3000 mS/cm. Las mediciones de la concentración del trazador se realizaron a la salida del humedal determinando la conductividad durante tiempos previamente establecidos ya que existe una relación directa entre la concentración del ión cloruro en el agua y la conductividad. Una de las razones por las cuales se escogió como parámetro de seguimiento la conductividad fue su fácil y rápida medición en comparación con las del ión cloruro.

El trazador se dosificó instantáneamente, en forma de impulso, en un intervalo de tiempo inferior a 1/30 veces del tiempo teórico de retención, con una concentración de 2 g/l. El volumen del trazador aplicado fue de 10 ml, empleándose para tal operación una pipeta con capacidad volumétrica de 10 mililitros (Figura 12).



**Figura 12.** Adición instantánea de trazador

En la evaluación hidráulica se empleó agua del acueducto con un caudal promedio de 0.45 l/min, controlado mediante aforos volumétricos cada 15 min tanto a la entrada como a la salida del humedal, además, garantizando en el lecho una altura constante. La toma de muestras para el análisis de la conductividad durante la fase experimental se realizó recolectando en un vaso de precipitado muestras del afluente y del efluente, como lo muestra la Figura 13, con la particularidad, que en el afluente la periodicidad fue de 15 min mientras que, en el efluente el intervalo fue de 1 ó 2 minutos.



**Figura 13.** Recolección de Muestras

La duración de la evaluación hidrodinámica fue de tres veces el tiempo de retención hidráulico teórico del humedal, lapso en el cual la concentración del trazador debía aproximarse a cero (CEPIS, 1992). Se efectuaron cinco repeticiones para cada uno de

los lechos propuestos, iniciando en primera instancia con el coque (por la facilidad en la consecución de este material), después con el carbón antracita, luego con el carbón activado y finalmente se evaluó la combinación de los tres materiales en una sola cama.

### **9.3.1 Modelos**

La evaluación de las características hidráulicas del humedal se realizó mediante dos métodos: uno cualitativo y el otro cuantitativo. En el cualitativo, se empleó una metodología que corresponde al análisis de tendencia de la curva de concentración para el trazador. En el análisis cuantitativo se ajustaron tres modelos matemáticos para flujo no ideal: 1) Wolf-Resnick, 2) dispersión y 3) taques en serie. Estos dos últimos modelos son muy similares, y queda a criterio del diseñador (Levenspiel, 2004)

#### **9.3.1.1 Método de la Curva de Tendencia del Trazador.**

Esta metodología emplea la curva de concentración del trazador contra tiempo transcurrido, que permite determinar los parámetros mencionados en el numeral 2.7.2. Estos parámetros establecen una serie de relaciones cualitativas que indican la presencia de corto circuitos hidráulicos, zonas muertas, zonas de retención entre otros y a su vez permiten determinar la tendencia del tipo de flujo en el humedal.

#### **9.3.1.2 Modelo Simplificado de Wolf-Resnick**

Para la aplicación de este modelo los datos experimentales de cada uno de los ensayos (concentración y tiempo), se graficaron los valores de la fracción remanente experimental  $[1-F(t)]$  versus  $t/t_0$ , en escala semi-logarítmica. Los valores de la fracción remanente están en forma logarítmica, mientras que, los de tiempo adimensional,  $t/t_0$ , en forma aritmética. Se ajustó una línea tangente a la curva obtenida. La pendiente de esta línea es la  $\tan \alpha$  y sus intersecciones con los valores de 100 y 10 en las ordenadas permitió calcular los valores de  $\Theta (t_1/t_0)$  y de  $t_2/t_0$ , respectivamente. Finalmente, se obtuvieron las fracciones que caracterizaban el flujo y la identificación de las zonas muertas si las había. Este modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo

pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m), en el proceso operativo del humedal (CEPIS, 2004).

### 9.3.1.3 Modelo de Dispersión

Con los datos experimentales se calculó Q (Levenspiel, 2004), según la ecuación:

$$Q = \sum C \Delta t \quad (17)$$

El cálculo de la edad se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$E = C/Q \quad (18)$$

El cálculo de  $E(\Theta)$  se realizó de la siguiente manera:

Se determinó el tiempo medio según ecuación 19 del anexo B (Levenspiel, 2004), seguidamente se calculó la varianza utilizando las ecuaciones 20 y 21 del mismo anexo (Levenspiel, 2004) y con base en estos parámetros se determina  $E(\Theta)$ , para lo cual se multiplica  $E$  por el tiempo medio obtenido en la ecuación 19. Se continúa con el cálculo de  $\Theta$ , que se realiza mediante la expresión  $\Theta = t/t_m$  (Levenspiel, 2004), y se realiza la gráfica  $E(\Theta)$  versus  $\Theta$ .

Dado que el sistema es de un recipiente abierto se aplica la ecuación 24 del anexo B (Levenspiel, 2004), para hallar el módulo de dispersión  $D/uL$ , mediante iteraciones. Se utilizó la ecuación 23 (Levenspiel, 2004) y se grafica  $C(\Theta)$  versus  $\Theta$ , para obtener el modelo.

### 9.3.1.4 Modelos de Tanques en Serie

La metodología seguida es la descrita por Levenspiel (2004). Es de anotar, que el proceso aplicado para este modelo es el mismo al descrito en el numeral 9.3.1.3 hasta la ecuación 19. La diferencia radica en que se utilizaron las ecuaciones 26 y 25 del

anexo B para calcular  $N$  y  $E(\theta)$  respectivamente. Se graficó  $C(\theta)$  versus  $\theta$ , para obtener el modelo.

## 9.4 Efectos de Algunos Parámetros Físico-químicos en el Agua del Canal Afidro al ser tratada

### 9.4.1 Generalidades del sitio de muestreo

El agua residual evaluada en el humedal artificial con los lechos soportes propuestos en el trabajo investigativo, fue tomada del canal Afidro, localizado en las coordenadas  $4^{\circ} 45' 42.9''$  N y  $74^{\circ} 6' 13.7''$  O a 2547 msnm, paralelo al humedal de la Conejera y a aproximadamente 800 metros del colegio Delia Zapata Olivella. La figura 14A, muestra los sitios de interés mencionados.



**Figura 14.** A. Localización de Canal Afidro, colegio Delia Zapata y Humedal la Conejera B. Localización de Canal Afidro. Fundación humedales Bogotá, (2014)

El Canal Afidro hace parte de la estructura hídrica del humedal la Conejera, recoge aguas lluvias de los barrios aledaños: Fontanar, Ciudadela Cafam, Afidro, entre otros. Cuenta con conexiones erradas de aguas residuales domésticas del sector para luego conectarse con el humedal de la Conejera (Fundación humedales Bogotá, 2014).

El humedal La Conejera, es uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad en Bogotá, donde habitan alrededor de 115 especies de aves, algunas son propias del ecosistema como: la Tingua Bogotana, Cucarachero de Pantano, el Chamicero y el Pato Pico Rufo, quienes conviven con 8 especies de mamíferos, anfibios y una gran cantidad de vegetación acuática y terrestre, haciendo de este lugar una maravilla natural que se ha conservado por años, resistiendo las dinámicas de crecimiento de Bogotá (Fundación humedales Bogotá, 2010).

#### **9.4.2 Toma de muestras**

Se tomaron mediciones de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, alcalinidad y DBO in situ. La evaluación del agua residual, consistió en alimentar agua del canal Afidro, al humedal artificial con el lecho correspondiente (ya fuese individual o mezclado), con un caudal promedio de 0.45 l/min, controlado mediante aforos volumétricos cada 15 min tanto a la entrada como a la salida del humedal, garantizando siempre en el lecho una altura constante. Los parámetros a analizar fueron pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y la alcalinidad. La toma de muestras en el efluente se realizó a la descarga del humedal mediante un vaso de precipitados y con una periodicidad de 10 minutos hasta llegar al tiempo de retención hidráulico real de cada lecho. Se efectuaron tres repeticiones para cada uno de los lechos propuestos.

El pH y el oxígeno fueron medidos en un equipo multiparámetro de marca METTER TOLEDO, mientras que, la conductividad fue medida en un conductímetro de la misma marca. Las mediciones con estos equipos se muestran en la Figura 15.

La alcalinidad se determinó por titulación con una solución de ácido sulfúrico 0.02 N para los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico (pH  $\approx$  4.5 - 4.3) siguiendo los procedimientos de standar methods. Por el pH del agua tratada se encontró que sólo existían bicarbonatos, luego las titulaciones se realizaron a viraje de metilnaranja.



A



B

**Figura 15.** A. Medidores de calidad de agua. B. Titulación de alcalinidad

La toma de muestras para la determinación de los análisis de la DBO, se efectuaron de una forma acumulativa durante los ensayos en cada lecho. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio Analquim acreditado por el IDEAM.

#### **9.4.3 Análisis estadístico de datos**

Con los datos obtenidos durante la práctica experimental del agua a tratar, se realizó un análisis estadístico de la siguiente manera: i) análisis exploratorio de la información recolectada; ii) se calcularon las diferencias entre las lecturas de las muestras recogidas al final de cada ensayo y la lectura en el tiempo cero para cada una de las repeticiones. Con estos resultados se efectuó un análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis para determinar la existencia de diferencias entre los tratamientos (lechos) para cada una de las variables consideradas; iii) se realizó la prueba no pareada de Mann-Whitney (prueba no paramétrica) con el fin de hallar las diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

## 10 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describen los resultados y el análisis relacionado con las metodologías seleccionadas desde el punto de vista cualitativo como es el análisis de tendencia a la curva y desde el punto de vista cuantitativo, en lo concerniente a los modelos matemáticos: Wolf-Resnick, dispersión y tanques en serie para cada uno de los materiales utilizados como lechos soporte. Estos dos últimos modelos son muy similares, y queda a criterio del diseñador la decisión sobre su aplicación (Levenspiel, 2004). Razón por la cual se discuten estos modelos dentro de un mismo literal a fin de evaluar cuál tiene mejor comportamiento. También, se relacionan los cambios físico-químicos obtenidos en el agua tratada.

### 10.1 Coque

#### 10.1.1 Análisis de la Curva de Tendencia

Según los datos obtenidos en la Tabla 7, para un tiempo  $t_i$  de 2 minutos, se detectó la presencia del trazador a la salida de humedal y el tiempo a la máxima concentración del trazador en el sistema fue a los 30 minutos.

De acuerdo con la Tabla 8, que especifica los valores de las relaciones paramétricas y su interpretación del comportamiento en la curva de tendencia, se puede analizar lo siguiente: el valor de 0.463 para la relación  $t_p/t_o$ , y el valor de 0.0308 (cercano a cero) de la relación  $t_i/t_o$  reflejó el predominio de flujo mezclado. Adicionalmente, esta última relación paramétrica menor a 0.3 en conjunto con la relación  $t_m/t_o$ , inferior a uno, indicaron la presencia de cortocircuitos.

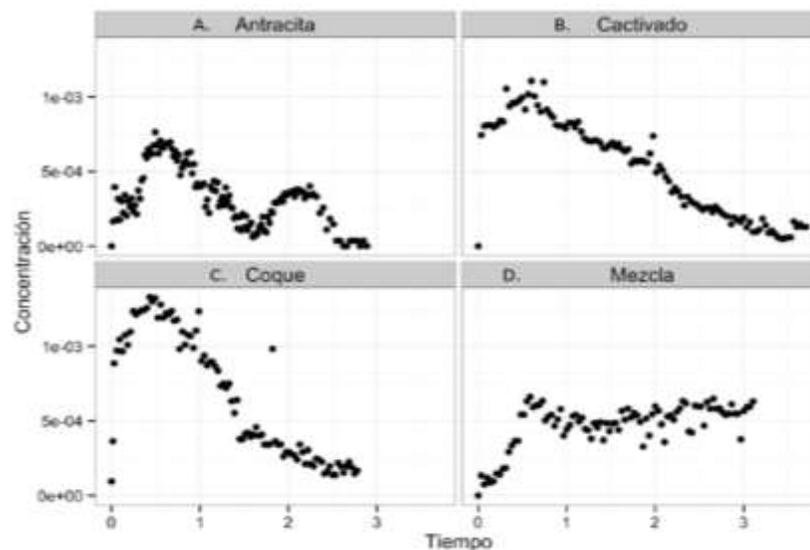
Las relaciones paramétricas  $t_o/t_o$  y  $t_b/t_o$ , evidenciaron igualmente la tendencia de flujo con mezcla completa, y la presencia de procesos de difusión debidos a la turbulencia y recirculación en el humedal (CEPIS, 2004). El valor de la excentricidad de 1.79, por

debajo del valor de mezcla completa y por encima al de flujo pistón, indica la existencia de flujo dual con el predominio del flujo de mezcla completa.

**Tabla 7.** Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el coque

Tiempo (min)	Resultado Experimental	Concentración (g/l)	Resultado Experimental
$t_i$	2.00	$C_o$	0.000677
$t_{10}$	11.78	$C_p$	0.0012044
$t_p$	30.00	$C_b$	0.0001203
$t_m$	48.00	$C_p/10$	0.0001203
$t_o$	64.80	$C_p/2$	0.0006021
$t_{90}$	114.00		
$t_f$	174.00		
$T_c$	84.00		
$T_b$	130.00		

La Figura 16C representa el comportamiento de la concentración del trazador a través del tiempo, descrita como una campana de Gauss sesgada a la derecha, indicando que el fluido es retenido en el espacio muerto. Además, se observa un segundo pico en el sesgo, lo que refleja la presencia de cortocircuitos en el sistema (Himmelblau et al., 2004).



**Figura 16.** Comportamiento de la concentración del trazador a través del tiempo

**Tabla 8.** Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el coque

Relación Paramétrica	Criterio relación paramétrica	Resultado Experimental	Interpretación
$t_i/t_o$	$t_i/t_o=0$ (flujo mezcla completa) $t_i/t_o=1$ (flujo pistón) $t_i/t_o < 0,3$ (cortos circuitos)	0.0308	Predominio de flujo mezclado y existencia de cortos circuitos hidráulicos
$t_m/t_o$	$t_m/t_o < 1$ (cortos circuitos) $t_m/t_o > 1$ (zona muertas)	0.740	Presencia de cortos circuitos
$t_p/t_o$	$t_p/t_o=0$ (predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_o=1$ y $t_i/t_o > 0.5$ (predominio flujo pistón)	0.463	Predominio de flujo de mezcla completa
$t_c/t_o$	$t_c/t_o=0.693$ (flujo mezcla completa)	1.296	Predominio de flujo mezclado
$t_b/t_o$	$t_b/t_o=2.3$ (flujo mezcla completa)	2.006	Predomina el flujo mezclado
$E$	$e > 2.3$ (flujo mezcla completa) $e=0$ (flujo pistón)	1.790	Existencia de flujo de mezcla completa
Índice de Morril	$MDI > 2$ (flujo mezcla completa) $MDI < 2$ (flujo pistón)	9.677	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

### 10.1.2 Modelo Wolf-Resnick

Los resultados de la aplicación del modelo de Wolf-Resnick utilizando como lecho soporte el coque, se observan en la Tabla 9. En ellas puede observarse que el humedal presentó un comportamiento de flujo dual: mezcla completa (76%) y flujo a pistón (24%), con predominio del primero, ratificando lo discutido en el análisis del ajuste de tendencia de la curva del trazador. El porcentaje de zonas muertas fue del 14.2%.

**Tabla 9.** Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el coque

Parámetros	Valores	Criterio
$t_1/t_0 = \theta$	0.206	Anexo B
$t_2/t_0$	1.645	Figura 2
$Tan \alpha$	0.695	Anexo B
$P$	0.240	Ecuaciones
$m$	0.142	15, 16, 17 y
$M$	0.760	18

### 10.1.3 Modelos de Dispersión y Tanques en serie

La representación gráfica de estos dos modelos se representa en un solo gráfico, a fin de determinar cuál de los dos modelos presenta una mejor aplicación.

#### 10.1.3.1 Modelo de Dispersión

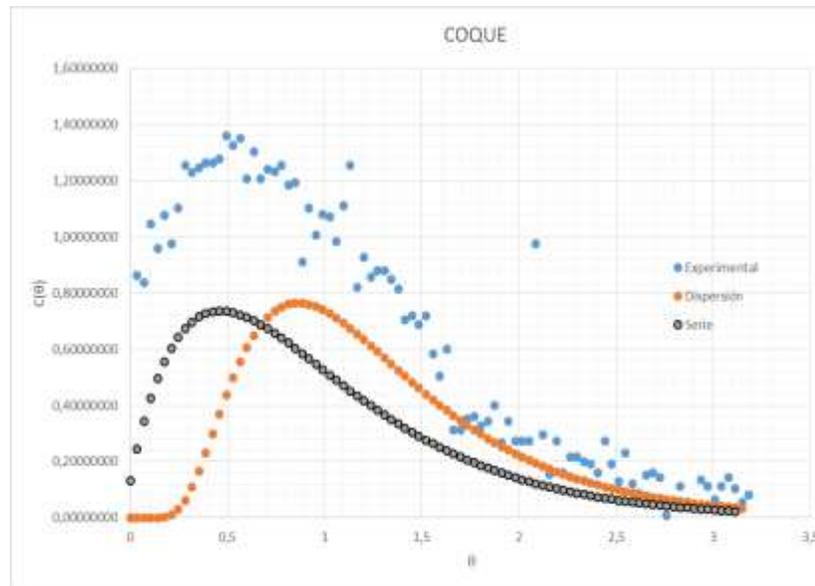
Los datos de la aplicación de este modelo y el número de dispersión calculado, se presentan en la Tabla 10. Valores de número de dispersión de 0.2 indican grado de dispersión grande, valores de 0.025 dispersión intermedia y de 0.002 dispersión pequeña (Levespiel, 2004). Según lo anterior, el valor obtenido de 0.15 refleja un alto grado de dispersión que lo aleja de un régimen de flujo pistón ideal y que también confirma la existencia combinada de flujo pistón y mezcla completa.

**Tabla10.** Resultados del modelo de dispersión para coque

TRH experimental (minutos)	$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	Numero de Dispersión D/uL
56.53	1487.71	0.46	0.15

En la Figura 17 se representan a nivel de comparación las curvas experimental y del modelo ajustado. En ellas se puede observar que existe una diferencia entre las dos, probablemente, debido a la acumulación de lodos ocasionado por el desprendimiento

de extra finos de material carbonoso durante las prácticas experimentales. Este material crea turbulencias a través del seno del humedal repercutiendo en la dispersión del flujo.



**Figura 17.** Curvas de datos experimentales, modelos de dispersión y tanques en serie para el sustrato coque.

### 10.1.3.2 Modelo de Tanques en Serie

En la Tabla 11 se registran los resultados de la aplicación del modelo en mención. El parámetro a interpretar es el número de tanques cuyo valor calculado fue 2, ratificando un régimen de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio del primero.

**Tabla 11** Resultados del Modelo de tanques en serie. Coque

$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	N
1487.71	0.46	2.0

En la Figura 17 se representa la curva experimental y la curva del modelo aplicado. Se observa que la curva del modelo predicho se ajusta un poco mejor a la experimental.

Según esto el modelo de tanques en serie es más aplicable para el coque como lecho filtrante en lugar del modelo de dispersión.

## 10.2 Carbón Antracita

### 10.2.1 Análisis de la Curva de Tendencia

Analizando los resultados obtenidos en las Tablas 12 y 13, se puede interpretar que en un tiempo de un minuto el trazador comienza a salir del humedal y alcanza su máxima concentración en un tiempo de 27 minutos. La relación paramétrica  $t_i/t_o$  de 0.019, inferior al parámetro de 0.3, indica que hay un predominio de flujo de mezcla completa y paso directo del trazador por el lecho filtrante, es decir, presencia de cortocircuitos hidráulicos.

**Tabla 12.** Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para la antracita.

Tiempo (min)	Resultado Experimental	Concentración (g/l)	Resultado Experimental
$t_i$	1.00	$C_o$	0.000833
$t_{10}$	15.90	$C_p$	0.000872
$t_p$	27.00	$C_b$	8.72E-05
$t_m$	16.30	$C_p/10$	8.72E-05
$t_o$	52.63	$C_p/2$	0.0004360
$t_{90}$	108.30		
$t_f$	174.00		
$T_c$	59.00		
$T_b$			

La relación paramétrica  $t_m/t_o$  fue de 0.31, valor menor al parámetro establecido de 1, lo que confirma la presencia de cortos circuitos hidráulicos, acelerando de esta forma el tiempo de retención hidráulico teórico. El resto de relaciones paramétricas  $t_p/t_o$  igual a 0.513,  $t_o/t_o$  de 1.121, la excentricidad de 2.30, y el índice de Morril de 6.811 proporcionan una clara tendencia de flujo mezclado del sistema.

En la Figura 16A se puede observar que no solamente existe el pico de máxima concentración a los 27 minutos, sino otro pico ocurrido dos horas después de éste, que teóricamente evidencia la presencia de zonas muertas estancadas. Estos fenómenos pueden ser explicados por la presencia de zonas dentro del sistema que retienen el trazador y luego lo liberan lentamente. (Morgan et al, 2008)

**Tabla 13.** Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para la antracita.

Relación paramétrica	Criterio relación paramétrica	Resultado experimental	Interpretación
$t_i/t_o$	$t_i/t_o=0$ (flujo mezcla completa) $t_i/t_o=1$ (flujo pistón) $t_i/t_o <0,3$ (cortos circuitos)	0.0190	Predominio de flujo mezclado hidráulicos y existencia de cortos circuitos
$t_m/t_o$	$t_m/t_o <1$ (cortos circuitos) $t_m/t_o >1$ (zona muertas)	0.3097	Presencia de cortos circuitos
$t_p/t_o$	$t_p/t_o=0$ (predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_o=1$ y $t_i/t_o >0.5$ (predominio flujo pistón)	0.5130	Predominio de flujo de mezcla completa
$t_c/t_o$	$t_c/t_o=0.693$ (flujo mezcla completa)	1.1210	Predominio de flujo mezclado
$t_b/t_o$	$t_b/t_o=2.3$ (flujo mezcla completa)	0	No es posible calcular el valor
$E$	$e >2.3$ (flujo mezcla completa) $e=0$ (flujo pistón)	2.299	Existencia de flujo de mezcla completa
Indice de Morril	$MDI >2$ (flujo mezcla completa) $MDI <2$ (flujo pistón)	6.811	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

### 10.2.2 Modelo Wolf-Resnick

Según los resultados indicados en la Tabla 14, el Modelo de Wolf- Resnick obtenido para la antracita presenta un régimen de flujo dual: flujo mezclado (68.6 %) y flujo pistón (31.4%) con predominio del primero, lo cual coincide con el análisis de la tendencia de

la curva del trazador. En cuanto al cálculo del volumen de espacios muertos, se obtiene un valor negativo  $m = -0.039$ , es decir, un  $-3.9\%$ , lo que se atribuye a la presencia de zonas muertas estancadas y algunos fenómenos de recirculación interna.

**Tabla 14.** Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el carbón antracita

Parámetros	Valores	Criterio
$t_1/t_0 = \theta$	0.326	Anexo B
$t_2/t_0$	1.902	Figura 2
$Tan \alpha$	0.635	Anexo B
$P$	0.314	Ecuaciones
$m$	-0.039	15, 16, 17 y
$M$	0.686	18

### 10.2.3 Modelos de Dispersión y tanques en serie

#### 10.2.3.1. Modelos de Dispersión

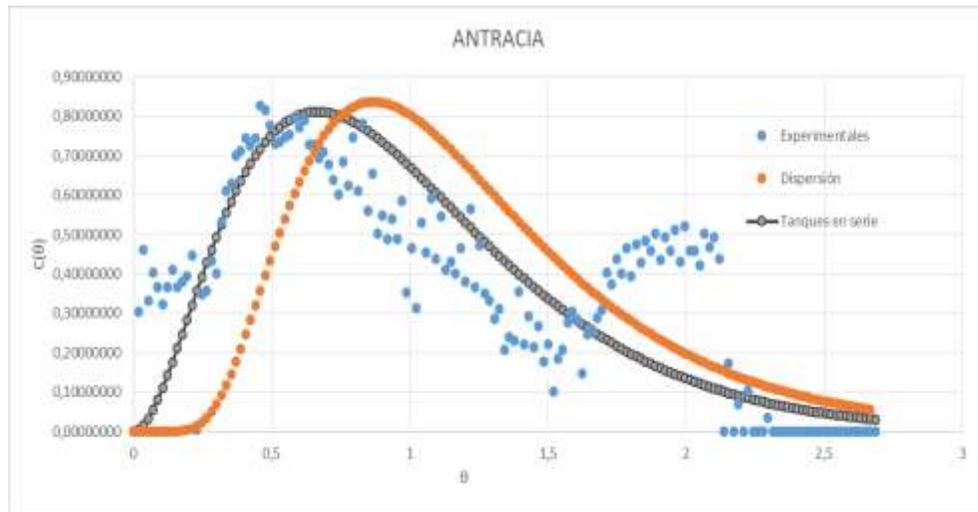
El modelo de dispersión obtenido describe un comportamiento altamente disperso, número de dispersión 0.12, lo que también confirma la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio de flujo de mezcla completa. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con antracita

TRH experimental (minutos)	$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	Número de Dispersión D/uL
56.63	1147.72	0.36	0.12

En la Figura 18 se muestra la distribución de edades del trazador en el efluente del modelo de dispersión aplicado y los valores experimentales. Se observa que la curva experimental (real), presenta una mayor dispersión que la predicha por el modelo, sobre todo después de haber alcanzado la concentración máxima del trazador apareciendo

otro segundo pico. Lo anterior, refleja la existencia de zonas de recirculación interna, es decir, la presencia de corto circuitos hidráulicos, ya mencionado en los análisis de los modelos anteriores.



**Figura 18.** Curvas de datos experimentales, modelo dispersión y tanques en serie para antracita

### 10.2.3.2 Modelo de Tanques en serie

Según los datos reportados en la Tabla 16 en la aplicación del modelo de tanques en serie, el número de tanques calculado fue de 3, valor que demuestra la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio del régimen hidráulico del flujo de mezcla completa.

**Tabla 16.** Resultados del modelo de Tanques en serie para antracita

$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(t)}^2$	N
1147.72	0.36	3.00

De acuerdo con la Figura 19 se observa: i) el modelo se ajusta mejor a la curva experimental hasta el pico de máxima concentración y ii) la curva real, presenta una mayor dispersión que la predicha por el modelo cuando aparece el segundo pico. Según

lo anterior se refleja la existencia de zonas de recirculación interna y canalizaciones en el sistema.

En síntesis, la evaluación del comportamiento hidrodinámico mostró que el humedal utilizando como lecho soporte la antracita presentó un alto grado de dispersión que lo aleja del flujo pistón, su comportamiento es tendiente a un reactor de mezcla completa en serie de tres unidades, el régimen de flujo es dual, con predominio de mezcla completa, 68.6 %, y flujo pistón, 31.4%, y presencia de zonas muertas estancadas en un 3.9 %. Adicionalmente, se presentaron algunos fenómenos de recirculación interna. Comparando los modelos de dispersión y el de tanques en serie, se observa que el mayor ajuste es el de tanques en serie.

**Tabla 17.** Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el carbón activado

Tiempo (min)	Resultado Experimental	Concentración (g/l)	Resultado Experimental
$t_i$	1.00	$C_o$	0.001547
$t_{10}$	6.90	$C_p$	0.001160
$t_p$	16.00	$C_b$	1.16E-04
$t_m$	30.10	$C_p/10$	1.16E-04
$t_o$	28.33	$C_p/2$	0.000580
$t_{90}$	68.20		
$t_f$	105.00		
$T_c$	86.00		
$T_b$			

### 10.3 Carbón Activado

#### 10.3.1 Análisis de la Curva de Tendencia

Los valores de algunos parámetros que permitieron evaluar el comportamiento de la curva de tendencia para el lecho con carbón activado, se indican en las Tablas 17 y 18. Cabe destacar, la relación  $t_m/t_o$  de 1.06, valor mayor al criterio establecido de 1, lo que indica la presencia de zonas muertas. El resto de relaciones  $t_i/t_o$  de 0.035,  $t_c/t_o$  de 1.694,

el valor de la excentricidad, 2.30, y el índice de Morril de 9.884 confirman el predominio de flujo de mezcla completa. En la Figura 16B, se puede apreciar una cola larga decreciente después de alcanzada la concentración máxima pero con tendencia lenta y poca simetría en la curva, lo que conlleva a inferir que el tiempo de residencia hidráulico real en el sistema es mayor que el teórico calculado, debido a factores de flujo como cortocircuitos y zonas muertas que lo alejan de la idealidad.

**Tabla 18.** Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el carbón activado

Relación paramétrica	Criterio relación paramétrica	Resultado experimental	Interpretación
$t_i/t_o$	$t_i/t_o=0$ (flujo mezcla completa) $t_i/t_o=1$ (flujo pistón) $t_i/t_o < 0.3$ (cortos circuitos)	0.0352	Predominio de flujo mezclado y existencia de cortos circuitos hidráulicos
$t_m/t_o$	$t_m/t_o < 1$ (cortos circuitos) $t_m/t_o > 1$ (zona muertas) $t_p/t_o=0$ (predominio flujo mezcla completa)	1.062	Presencia de zonas muertas
$t_p/t_o$	$t_p/t_o=1$ y $t_i/t_o > 0.5$ (predominio flujo pistón)	0.564	Predominio de flujo de mezcla completa
$t_c/t_o$	$t_c/t_o=0.693$ (flujo mezcla completa)	1.694	Predominio de flujo mezclado
$t_b/t_o$	$t_b/t_o=2.3$ (flujo mezcla completa)	2.612	Predomina el flujo mezclado
$E$	$e > 2.3$ (flujo mezcla completa) $e=0$ (flujo pistón)	2.299	Existencia de flujo de mezcla Completa
<i>Indice de Morril</i>	MDI > 2 (flujo mezcla completa) MDI < 2 (flujo pistón)	9.884	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

### 10.3.2 Modelo Wolf-Resnick

Los resultados reportados en la Tabla 19 corresponden a la aplicación del modelo de Wolf-Resnick. El sistema evaluado presentó un comportamiento hidrodinámico de flujo dual: flujo de mezcla completa (63.1%) y flujo pistón (36.9%). Adicionalmente, según el modelo, se presenta un -19.1% de zonas muertas.

**Tabla 19.** Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el carbón activado

Parámetros	Valores	Criterio
$t_1/t_0 = \theta$	0.439	Anexo B
$t_2/t_0$	2.097	Figura 2
$Tan \alpha$	0.603	Anexo B:
$P$	0.369	Ecuaciones 15,
$m$	-0.191	16, 17 y 18
$M$	0.631	

### 10.3.3 Análisis modelos de Dispersión y Tanques en serie

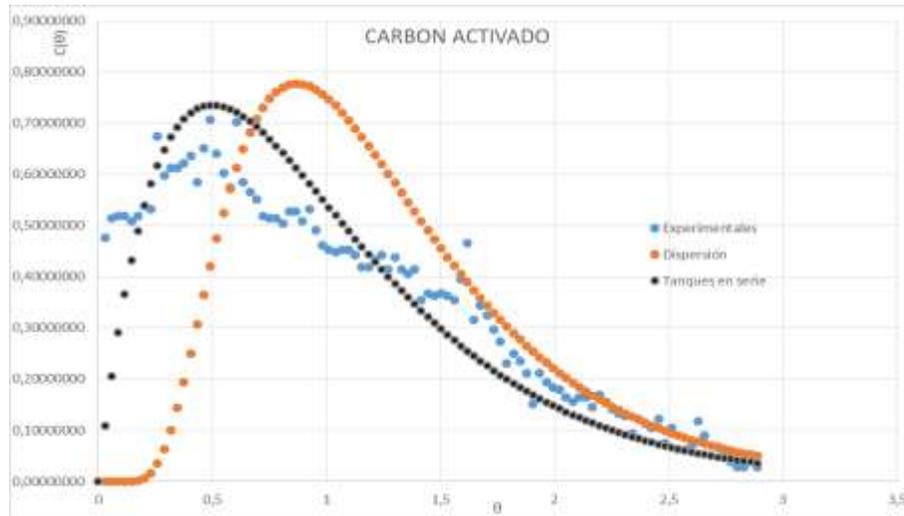
#### 10.3.3.1 Modelo de Dispersión

Para el caso del modelo de dispersión, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 20, cuyo parámetro a destacar es el número de dispersión con un valor de 0.1411, concluyendo que el sistema presenta un grado de dispersión grande, lo que representa la existencia de un flujo combinado de mezcla completa y a flujo pistón, con predominio del primero.

**Tabla 20.** Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con carbón activado

TRH experimental (minutos)	$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	Número de Dispersión D/uL
34.63	529.50	0.44	0.1411

La Figura 19 muestra el comportamiento predicho por el modelo y los datos experimentales, apreciándose que la curva experimental se ajusta en buena medida sobre todo al finalizar el sesgo.



**Figura 19.** Curvas de datos experimentales, modelo de dispersión y tanques en serie para carbón activado

### 10.3.3.2 Modelo tanques en serie

El parámetro a analizar en este modelo es el número de tanques en serie mezclados que para el caso del carbón activado es 3, lo que confirma la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio de flujo de mezcla completa. Los parámetros encontrados para éste modelo se reportan en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Resultados del modelo de tanques en serie para el lecho de soporte con carbón activado

$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	N
529.50	0.44	3.00

En la Figura 19 el modelo de tanques en serie es más parecido a la curva experimental lo que hace pensar que este modelo es aplicable para el uso de carbón activado como lecho soporte.

En resumen el comportamiento hidrodinámico del humedal utilizando como lecho soporte el carbón activado presentó un alto grado de dispersión que lo aleja de la idealidad. Al ajustar su comportamiento a modelos matemáticos como dispersión y tanques en serie, este último predice en mayor medida su régimen de flujo. Según el modelo de Wolf Resnick se encontró que este sistema tiene un 63.1% de mezcla completa y un 36.9% de flujo pistón. En cuanto a zonas muertas su porcentaje de existencia es de -19.1.

## **10.4. Lecho Mezclado**

### **10.4.1 Análisis de la curva de tendencia**

Según los datos registrados en las Tablas 22 y 23, se observa que en un tiempo  $t_i$  de 2 minutos, que es el tiempo en el cual el trazador comienza a salir del humedal, se obtuvo una relación paramétrica  $t_i/t_o$  de 0.035, inferior al parámetro de 0.3, indicando predominio de flujo de mezcla completa y la existencia de cortocircuitos hidráulicos. El tiempo de la máxima concentración del trazador aplicado, se detectó a los 34 minutos. La relación paramétrica  $t_m/t_o$  fue de 1.76, superior al parámetro establecido de 1, lo que indica la presencia de zonas muertas.

El tiempo modal o tiempo en el cual aparece la máxima concentración del trazador, presentó una relación paramétrica  $t_p/t_o$  igual a 0.587 y el valor de  $t_i/t_o$  fue de 0.035, por lo que se deduce que a un tiempo de 34 minutos el humedal presentó flujo mezclado. La relación paramétrica  $t_c/t_o$  de 0.207, por debajo del valor de mezcla completa (0.693), y la excentricidad de 0.673, indicaron la existencia de flujo dual. El resultado para el índice de Morril fue de 4.04 ratifica la presencia en mayor medida de flujo de mezcla completa.

**Tabla 22.** Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el lecho mezclado

Tiempo (min)	Resultado Experimental	Concentración (g/l)	Resultado Experimental
$t_i$	2.00	$C_o$	0.00154
$t_{10}$	33.10	$C_p$	0.00116
$t_p$	34.00	$C_b$	1.6E-04
$t_m$	102.00	$C_p/10$	1.16E-04
$t_o$	57.96	$C_p/2$	0.00058
$t_{90}$	134.00		
$t_f$	105.00		
$T_c$	12.00		
$T_b$	0		

La Figura 16D presenta un comportamiento totalmente atípico a los anteriormente analizados. Según la tendencia de la curva parece indicar que el tiempo de retención del trazador fuera infinito, lo que implica la presencia de un gran volumen de espacios muertos, en el seno del humedal, esto conduce a que las partículas del trazador, permanezcan un tiempo mucho mayor que el teórico en el sistema.

#### 10.4.2 Modelo simplificado de Wolf-Resnick

En la Tabla 24 se consignan los resultados del modelo de Wolf-Resnick. Según estos resultados se puede deducir un régimen de flujo caracterizado por: un sistema totalmente mezclado del 69.3% y flujo pistón del 30.7% y un volumen de espacios muertos, de -71.5%, lo que se atribuye a la presencia de grandes zonas muertas.

**Tabla 23.** Parámetros principales para el análisis de la tendencia de la curva de distribución del trazador para el lecho mezclado

Relación paramétrica	Criterio relación paramétrica	Resultado experimental	Interpretación
$t_i/t_o$	$t_i/t_o=0$ (flujo mezcla completa) $t_i/t_o=1$ (flujo pistón) $t_i/t_o < 0.3$ (cortos circuitos)	0.0345	Predominio de flujo mezclado y existencia de cortos circuitos hidráulicos
$t_m/t_o$	$t_m/t_o < 1$ (cortos circuitos) $t_m/t_o > 1$ (zona muertas)	1.759	Presencia de zonas muertas
$t_p/t_o$	$t_p/t_o=0$ (predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_o=1$ y $t_i/t_o > 0.5$ (predominio flujo pistón)	0.586	Predominio de flujo de mezcla completa
$t_c/t_o$	$t_c/t_o=0.693$ (flujo mezcla completa)	0.207	Existencia de flujos mezclado y de pistón
$t_b/t_o$	$t_b/t_o=2.3$ (flujo mezcla completa)	0	No es posible calcular el valor
$e$	$e > 2.3$ (flujo mezcla completa) $e=0$ (flujo pistón))	0.728	Existencia de flujos de mezcla completa y de pistón
<i>Índice de Morril</i>	$MDI > 2$ (flujo mezcla completa) $MDI < 2$ (flujo pistón)	4.048	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

Es de anotar, que un valor negativo indica que en promedio las partículas del trazador en el sistema, han permanecido realmente un mayor tiempo que el teórico. Precisamente, respecto a este punto se transcribe textualmente lo argumentado por Morgan et al (1997) y citado por Rojas et al. (2008), acerca de valores de fracción de volumen muerto negativos. Los autores explicaron que un valor negativo indica que en promedio las partículas del trazador han permanecido más tiempo que el teórico y que este hecho representa una violación al balance de masa y que el trazador en estos casos no representa adecuadamente el comportamiento hidráulico de las partículas, aunque es más importante poner atención a los cambios en magnitud y a sus tendencias y no a las magnitudes absolutas de los datos numéricos obtenidos.

**Tabla 24.** Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick para el lecho mezclado

Parámetros	Valores	Criterio
$t_1/t_0 = \theta$	0.527	Anexo B
$t_2/t_0$	3.144	Figura 2
$Tan \alpha$	0.382	Anexo B:
$P$	0.307	Ecuaciones
$m$	-0.715	15, 16, 17, y
$M$	0.693	18

### 10.4.3 Modelos de Flujo de Dispersión y Tanques en serie.

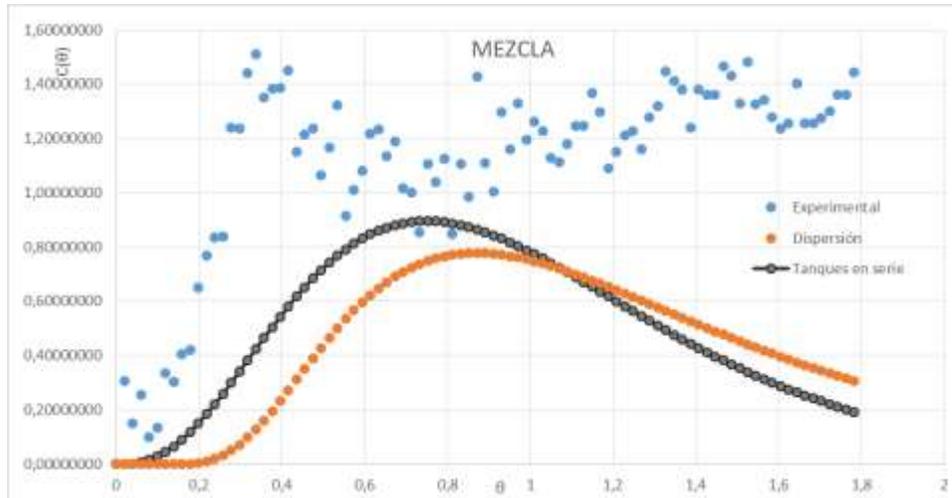
#### 10.4.3.1 Modelo de Flujo de Dispersión

Los datos de la aplicación de este modelo se muestran en la Tabla 25. Los resultados de la aplicación del modelo presentaron un grado de dispersión grande ( $>0.01$ ), lo que también confirma la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio de flujo de mezcla completa.

**Tabla 25.** Resultados del modelo de dispersión para el lecho de soporte con la mezcla de materiales

TRH experimental (minutos)	$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	Número de Dispersión D/uL
100.98	2344.49	0.23	0.086

En la Figura 20 se muestra la distribución de edades del trazador en el efluente entre el modelo de dispersión aplicado y los valores experimentales. Se observa que la curva experimental (real), presenta una gran dispersión en comparación con la predicha por el modelo. El sólo hecho de observar el comportamiento de la curva experimental se infiere que el tiempo de retención es infinito, y por consiguiente una velocidad con tendencia a cero, como consecuencia del alto porcentaje de espacios muertos, que finalmente aumentan el volumen útil del humedal.



**Figura 20.** Curvas de datos experimentales y modelo dispersión y tanques en serie para el lecho mezclado

### 10.4.3.2 Modelo de Tanques en Serie

En la Tabla 26 se registran los resultados de la aplicación del modelo de tanques en serie para el humedal utilizando como lecho soporte una mezcla de los tres componentes. El número de tanques fue de 5, lo que confirma la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio de flujo de mezcla completa.

**Tabla 26.** Resultados del modelo de tanques en serie para el lecho de soporte con los materiales en mezcla

$\sigma^2$ (minutos) <sup>2</sup>	$\sigma_{(\theta)}^2$	N
2344.49	0.23	5.00

En la Figura 20 se muestra la distribución de edades del trazador en el efluente entre el modelo de tanques en serie y los valores experimentales. En lo que respecta a la curva predicha por el modelo, se aprecia una gran dispersión de la curva experimental (real).

En forma general, se puede decir que el análisis del comportamiento hidrodinámico para el humedal utilizando una mezcla de los tres componentes se caracteriza por un régimen

de flujo dual con predominio de la mezcla completa, el comportamiento del sistema fue completamente atípico y los modelos matemáticos no alcanzaron a predecir el comportamiento real del sistema.

La Tabla 27 sintetiza los resultados obtenidos al aplicar los modelos para los cuatro lechos filtrantes empleados, proporcionando una idea de comportamiento hidrodinámico comparativo del sistema de depuración.

La porosidad del lecho tiene gran importancia en el comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial, por ello se escogieron en principio materiales carbonosos como los evaluados en el presente trabajo. Los valores obtenidos para esta propiedad, se presentan en forma comparativa en la Tabla 27. El coque presentó una mayor porosidad comparada con los otros materiales empleados en los ensayos, e incluso su valor es superior a los materiales convencionales, (grava, arena entre otros) reportados en la tabla 1.

Según Kadlec et al (1996) citado por Villaroel (2012), el material de soporte utilizado como lecho filtrante es definitivo en la eficiencia del tratamiento y en el tamaño del humedal. Materiales porosos, resistentes al desgaste mecánico y químico proporcionan un flujo continuo al agua tratada por tanto poseen una mayor conductividad hidráulica y han demostrado proporcionar una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, reduciendo al mismo tiempo el área requerida para la construcción del humedal. Según lo anterior el material que mejor se ajusta a estas condiciones es el coque.

La antracita y el carbón activado presentaron unos valores de porosidad muy similares a los de grava media y roca triturada, lo que lleva a suponer que van a generar una eficiencia de remoción parecida a la de estos materiales en la depuración de aguas residuales. La mezcla de los tres materiales utilizados como un solo lecho evidenció una porosidad mayor a los materiales convencionales, lo que implica que este arreglo podrá proporcionar una mejor eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas.

Los tiempos de retención hidráulico teórico de los materiales en estudio, para el diseño de este humedal y mostrados en la Tabla 27, hacen ver que el trazador empleado estaría mayor tiempo en el sistema cuando el humedal trabaja con coque y en menor medida al emplear carbón activado durante el ensayo. No obstante, al determinar el tiempo de retención hidráulico experimental, el lecho compuesto por los tres materiales presentó un valor 1.8 veces mayor que el del coque o al de la antracita, y 2.8 veces mayor al utilizar carbón activado como lecho.

El incremento en el tiempo de retención hidráulico experimental con respecto al teórico de la mezcla de materiales, se debió a la gran presencia de zonas muertas en el sistema, que se producen en las esquinas y paredes del humedal, a la instalación de una malla a la salida y a la tortuosidad del lecho ocasionada por los cambios de tamaño en el arreglo de los materiales. Factores que influyeron en la disminución de la velocidad de fluido.

En forma comparativa el TRH teórico del lecho con coque es menor que el experimental por la presencia de cortocircuitos hidráulicos lo que implica el paso muy rápido del fluido en el sistema. Ahora, al comparar los TRH teóricos y experimentales al usar antracita y carbón activado como medio soporte, el trazador empleado permanece en el sistema durante el tiempo previsto, lo que significa, que la presencia de cortocircuitos y zonas muertas no afectaron el tiempo de residencia en gran medida.

	Coque	Antracita	Carbón Activado	Mezcla
Porosidad	0.590	0.448	0.385	0.465
Tiempo de retención hidráulico teórico minutos	74.52	56.49	28.72	58.73
Tiempo de retención hidráulico Experimental minutos	56.53	56.63	34.63	100.98
Zonas muertas y/o cortocircuitos Curva tendencia	Mayor presencia de cortocircuitos y poca presencia de zonas muertas	Predomina la presencia de cortocircuitos y zonas muertas y recirculación	Predominio de zonas muertas, presencia de cortocircuitos	Gran presencia de Zonas muertas
Tipo de flujo Wolf Resnick	Dual Mezcla completa: 76% Pistón: 24%	Dual Mezcla completa: 69% Pistón: 31%	Dual Mezcla completa: 63% Pistón: 37 %	Dual Mezcla completa: 69% Pistón: 30 %
Numero de dispersión Modelo de dispersión	0.15	0.12	0.14	0.086
Modelo con mayor ajuste	Tanques en serie	Al Inicio de la curva tanques en serie	Tanques en serie	Ninguno
N (Tanques en serie)	2 (Mezcla completa)	3	3	5 (Flujo piston)

**Tabla 27.** Comparación de los resultados del comportamiento hidrodinámico evaluado para cada lecho soporte.

El cumplimiento del TRH teórico durante la operación del humedal es fundamental porque sirve para asegurar: el contacto adecuado del fluido en el material poroso, la creación de la biopelícula en la superficie del material y los procesos biológicos, físicos y químicos de degradación. Tan es así que si el TRH experimental es mayor que el teórico, significa que el sistema se colmatará en un tiempo menor debido a la cantidad de material en el interior del humedal. Entonces, para el lecho conformado por los tres medios granulares, es probable que el fenómeno de colmatación ocurra. Ahora, para el medio soporte con el coque, que tuvo un tiempo menor al diseñado, los procesos degradativos no se completarán correctamente y por consiguiente no se obtendrá una eficiencia de remoción representativa. En cuanto a la antracita y al carbón activado, por el contrario, ofrecen una alternativa viable en el diseño del humedal teniendo en cuenta la porosidad del lecho y el cumplimiento del tiempo de retención hidráulico teórico.

En cuanto al análisis del tipo de flujo que prevaleció en el sistema durante los ensayos para determinar la conveniencia de alguno de los lechos evaluados se tiene lo siguiente.

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento, como se dijo previamente. Un humedal se considera un reactor biológico, por lo que los modelos de diseño que se usan en la actualidad asumen condiciones uniformes de flujo a pistón, además, no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento. Los materiales usados para la evaluación del trabajo investigativo, presentaron un comportamiento de flujo dual, es decir un porcentaje asociado a reactores de tanques de mezcla completa y un porcentaje perteneciente a reactores de flujo pistón, como se reporta la Tabla 27. El uso del coque como lecho filtrante disminuye hasta en un 13% el comportamiento de flujo pistón comparado con los demás lechos, es decir, que su condición es desfavorable en el proceso de degradación. Por el contrario, en el humedal con carbón activado se obtuvo el mayor porcentaje de flujo pistón que repercute en un mejor funcionamiento del humedal pues en esa porción de flujo el TRH es el mismo en todos sus elementos.

Estudios previos empleando como trazador NaCl (Cano, 2010) en los cuales se evaluó también el comportamiento hidrodinámico de humedales subsuperficiales pero con medios convencionales, en particular grava y con arreglos de diseño con o sin baffles o cambio en geometría, (aumento del largo o del ancho) revelan también un comportamiento desviado de la idealidad de un flujo en pistón teórico debido a la presencia de factores como zonas muertas, cortocircuitos o canalizaciones descritos previamente.

En estudios como el de Gómez et al. (2010) reportaron en la evaluación de un reactor UASB un flujo pistón de 17.20% y un 31.26% de mezcla completa. Vargas et al. (2008), en un reactor biológico lograron obtener un 24.12% en flujo pistón y 75.88% en mezcla completa. Resultados inferiores a los obtenidos en el presente trabajo utilizando los medios granulares en forma individual y mezclado.

Finalmente, en torno al comportamiento hidrodinámico de los lechos utilizados en el trabajo investigativo, el número de unidades del modelo de tanques en serie estuvo entre 2 y 5 lo que confirma lo descrito por Kadlec y Wallace (2009) que prácticamente en todos los casos reportados el valor del parámetro característico del número de tanques en serie se encuentra en el intervalo  $1 \leq N \leq 8$ .

## **10.5 Efectos de algunos parámetros físico-químicos en el agua del Canal Afidro al ser tratada.**

El numeral está dividido en cuatro secciones, a saber: i) descripción del agua a tratar con base en análisis físico-químicos, ii) los efectos que se obtuvieron para cada lecho, iii) el análisis estadístico de los datos generados y iv) el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la evaluación hidrodinámica con respecto a los efectos del tratamiento en el agua residual.

### **10.5.1. Descripción del agua residual.**

El agua del canal Afidro está contaminada por conexiones erradas provenientes de viviendas cercanas al mismo, y vierte dichas aguas al humedal La Conejera, lugar de conservación de flora y fauna en la localidad de Suba. Las características físico-químicas del agua de este canal, se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Condiciones in situ del agua a tratar

pH	Conductividad microS/cm	OD mg/l de O <sub>2</sub>	DBO <sub>5</sub> mg/l O <sub>2</sub>	Alcalinidad mg/l CaCO <sub>3</sub>	T °C
6.92	457	0.17	134	132	17

De acuerdo con estos datos, se analizó lo siguiente: 1) el pH presentó condiciones aceptables para el uso del agua con fines de preservación de flora y fauna y el desarrollo de vida en los ecosistemas acuáticos (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2013); 2) el oxígeno disuelto evidenció una fuerte disminución, valor que indica un estado crítico para el sostenimiento de la vida y la biodiversidad del ecosistema acuático (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2013); 3) la conductividad eléctrica obtenida, reflejó la presencia de una gran cantidad de material disuelto en el agua; 4) la alcalinidad lograda es debida a la presencia de bicarbonatos. Este valor es considerado de rango intermedio y supera el valor internacionalmente aceptado de 20 mg de CaCO<sub>3</sub>/l como mínimo para mantener la vida acuática (Kevern, 1989); 5) el valor de DBO alcanzado fue superior a 120 mg/l lo que la hacer ver como un agua fuertemente contaminada (CONAGUA, 2006). En resumen el agua proveniente de este canal se cataloga altamente contaminada y no asegura la conservación de la flora y fauna del humedal.

### 10.5.2. Efectos que se obtuvieron para cada lecho

La eficiencia del tratamiento obtenido para cada lecho se presenta en la Tabla 29. La ecuación 19 que sirvió para calcular este rendimiento se presenta a continuación.

$$Eficiencia = \frac{(Condición\ Inicial - Condición\ Final)}{(Condición\ Inicial)} \times 100 \quad (19)$$

De acuerdo con estos valores se evidenció un incremento en el pH para los lechos de antracita, coque y mezcla y una disminución de este parámetro para el carbón activado como medio filtrante. Sin embargo, este parámetro se encuentra dentro del intervalo admisible para la conservación de la flora y fauna.

**Tabla 29.** Efectos de los lechos sobre los parámetros físico-químicos del agua tratada

Tratamiento	Eficiencia %				
	pH	OD	Conductividad	Alcalinidad	DBO <sub>5</sub>
Mezcla	-2.00	-6.01	15.04	31.31	10.4
Carbón Activado	4.34	-5.26	9.09	34.38	53.7
Coque	-5.16	-4.30	26.84	-34.31	16.4
Antracita	-4.01	-6.77	0.82	0.61	7.3

En cuanto a la variación de oxígeno disuelto, el paso del agua residual por el humedal aumenta su concentración en similar proporción en todos los lechos evaluados, probablemente por la forma de alimentación en el humedal (en forma de flauta y la caída del agua al lecho) y el contacto con el oxígeno ambiental. Aunque los valores finales obtenidos, máxima concentración de 2.5 mg/l y mínima de 1.9 mg/l no alcanzan a asegurar las condiciones para la existencia de vida acuática, cuya mínima concentración es de 5 mg/l.

La conductividad eléctrica también se ve afectada luego del tratamiento en el humedal, actuando favorablemente en la calidad del agua reduciendo dicho parámetro, lo que repercute en disminución de las sales disueltas en el agua.

Los valores de alcalinidad reportados presentan un decremento en su valor en la mayoría de los lechos evaluados, con excepción del coque cuya tendencia fue a permanecer invariable.

La eficiencia de remoción del DBO<sub>5</sub>, se reporta en la Tabla 29. Según estos datos, los medios filtrantes en estudio muestran una remoción de materia orgánica biodegradable,

presentado una mayor eficiencia el lecho con carbón activado, seguido del coque y de la mezcla. El sustrato con antracita, presentó una menor eficiencia.

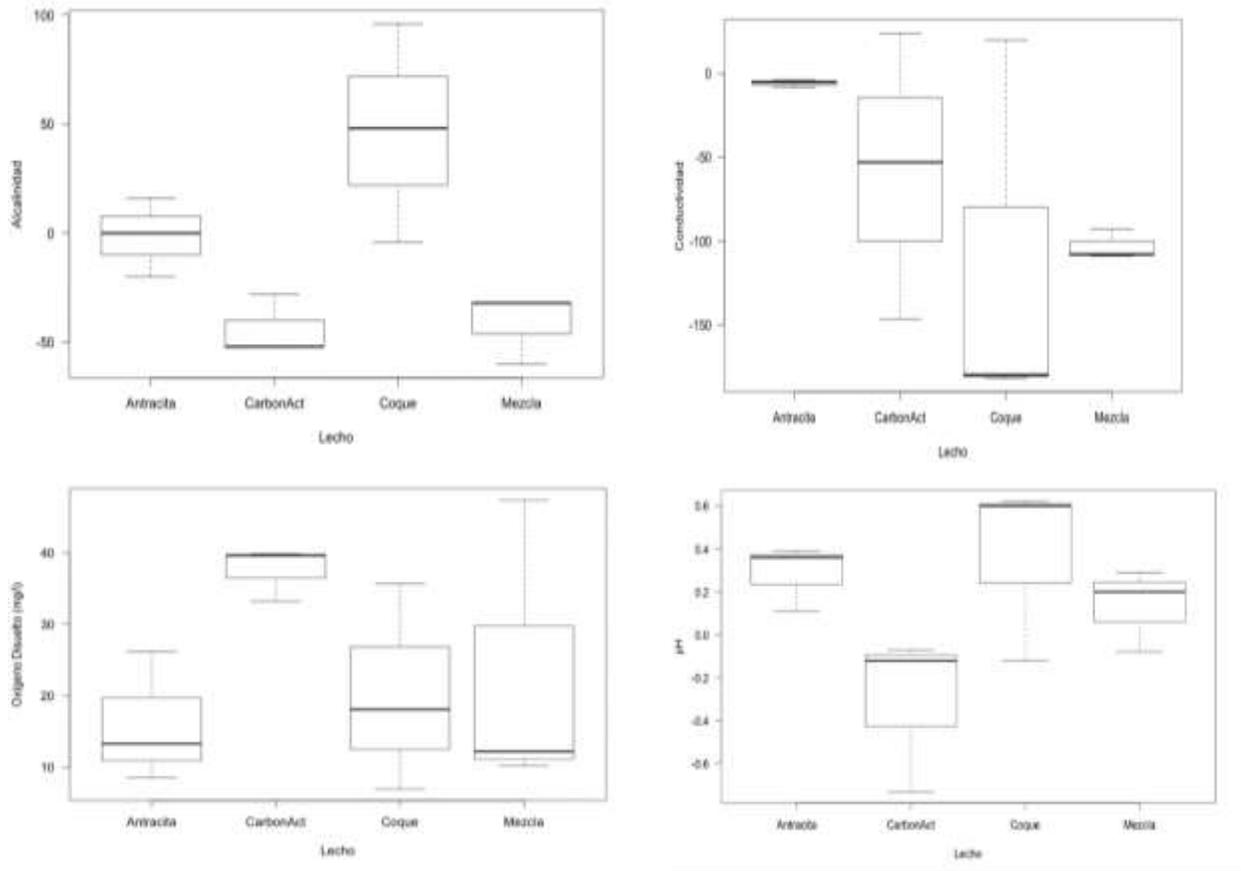
### **10.5.3. Análisis estadístico de los datos generados**

Dentro del análisis exploratorio de los datos se observó que el comportamiento de las variables a través del tiempo no seguía una tendencia consistente, ya que se encontraron comportamientos dispares entre las repeticiones o picos para algunos tiempos.

El diagrama de cajas y bigotes resultado del análisis estadístico se muestra en la figura 21. En él se observan las comparaciones de los tratamientos para cada variable medida. Para el caso de la alcalinidad se encontró que la mayor diferencia significativa en los tratamientos, fue para el coque; mientras que, para el pH las diferencias mostradas por los lechos no son evidentes.

El análisis estadístico no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis determinó que sólo existieron diferencias significativas entre los tratamientos para la variable alcalinidad ( $\chi^2(3) = 8.70$ ,  $p = 0.034$ ). Los resultados obtenidos se representan gráficamente en la Figura 21.

Al comparar la alcalinidad entre pares de tratamientos, mediante la prueba estadística no paramétrica de Mann-Whitney, se encontraron diferencias consideradas como significativas de la antracita con el carbón activado ( $W = 9$ ,  $p = 0.077$ ) y la mezcla ( $W = 9$ ,  $p = 0.077$ ) y del coque con el carbón activado ( $W = 9$ ,  $p = 0.077$ ) y la mezcla ( $W = 9$ ,  $p = 0.077$ ). Por lo que se puede inferir que los lechos con mejores comportamientos en el proceso depurativo son el carbón activado y la mezcla de los dos materiales.



**Figura 21.** Diagramas de caja y bigotes de los parámetros físico-químicos considerados para cada uno de los lechos.

#### 10.5.4. Análisis comparativo de la evaluación hidrodinámica con respecto a los efectos del tratamiento en el agua residual.

La evaluación hidrodinámica en el humedal con carbón activado presentó el mayor porcentaje de flujo pistón infiriendo de esta forma un mejor rendimiento en los procesos de remoción. Al verificar las eficiencias de remoción con el agua residual, se valida la anterior afirmación ya que el sistema que empleó como sustrato este material filtrante, presentó un mejor desempeño al mejorar las condiciones de la calidad de agua tratada.

En cuanto al humedal construido cuyo lecho filtrante fue la mezcla de los tres materiales, su evaluación hidrodinámica fue totalmente atípica. No obstante, sus porcentajes de remoción fueron buenos si lo comparamos con los lechos de coque y antracita.

Aunque el uso del coque como lecho filtrante disminuyó hasta en un 13% el comportamiento de flujo pistón comparado con los demás lechos, éste presentó una aceptable eficiencia de remoción siendo el tercero en mejor comportamiento.

El humedal artificial que empleó antracita, según el análisis hidrodinámico puede llegar a favorecer el proceso depurativo. Sin embargo, se encontró que este lecho es el que menos aportó al mejoramiento de las condiciones del agua a tratar.

### **10.6 Componente pedagógico**

En el Anexo C se presenta el componente pedagógico el cual está orientado a desarrollar un protocolo de operación y funcionamiento del sistema construido para poner en práctica con los educandos de la Institución Distrital Delia Zapata Olivella algunos conceptos fundamentales de las ciencias naturales y de la educación ambiental.

## 11 CONCLUSIONES

De los cuatro materiales granulares utilizados como lechos filtrantes en el humedal artificial subsuperficial, el coque presentó la porosidad de más alto valor, lo que implica una permeabilidad y un tiempo de retención hidráulico teórico mucho mayor. Factores estos que influyen de una manera eficaz en el proceso de remoción.

Los lechos soportes con antracita y carbón activado presentaron un tiempo de retención real muy cercano al TRH teórico lo que conlleva a decir que el sistema se comportará hidrodinámicamente más estable y las condiciones de operación en él serán más eficientes. Esto se reflejará en un tiempo más prolongado para que se colmate el humedal.

El comportamiento hidrodinámico de los cuatro lechos utilizados en el trabajo investigativo presentaron de acuerdo con los modelos analizados un comportamiento dual con predominio de mezcla completa. Para cumplir con una buena operación de flujo a pistón en el humedal se requiere asegurar un mejor contacto del lecho y de la realización de los procesos degradativos. El material con mayor cumplimiento de estas condiciones fue el lecho con carbón activado.

El lecho con mejor comportamiento hidrodinámico en el humedal construido lo dio el carbón activado porque el tiempo de residencia real fue equivalente al teórico, su porosidad es mayor comparada con la de otros lechos convencionales y además, presentó un porcentaje de flujo pistón mayor con respecto a los otros sustratos evaluados.

Se pudo validar que el lecho que presentó mejor comportamiento hidrodinámico, el carbón activado, fue el mismo que obtuvo mejores porcentajes de remoción de los contaminantes evaluados, es decir que su mayor comportamiento como flujo pistón influyó de manera significativa en su operación.

## 12 RECOMENDACIONES

Ser más estrictos en el cumplimiento de las características físicas de los materiales carbonosos utilizados como lechos filtrantes, específicamente en la granulometría, y para el caso del coque tener en cuenta la propiedad de la resistencia mecánica MICUN 40 cuyo valor mínimo debe ser del 80% y MICUN 10 con un valor máximo del 8%. Todo lo anterior para buscar una mayor conductividad hidráulica.

Evaluar el comportamiento hidrodinámico del lecho combinado con los tres materiales carbonosos utilizando una mayor relación largo:ancho, que la efectuada en el proceso investigativo a fin de buscar mayor porcentaje de flujo a pistón. La relación largo:ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema.

Evaluar el comportamiento hidrodinámico de un lecho mezclado con alguno de estos materiales carbonosos utilizados en el trabajo investigativo y con alguno de los materiales tradicionales.

Realizar el diseño y control automático del flujo y nivel en el proceso, a fin de garantizar una operación mucho más estabilizada durante las pruebas experimentales.

Evaluar un diseño que elimine los vértices internos del humedal y un sistema de descarga para reducir las zonas muertas.

Adecuar un sistema de muestreo computarizado que permita reducir la frecuencia en el tiempo de toma de muestras para aumentar el número de análisis de conductividad y tener mayor cantidad de datos para la evaluación hidrodinámica.

Realizar un estudio económico en donde se analice la factibilidad del estudio utilizando como lechos soportes estos tres tipos de materiales granulares evaluados y comparados con otros medios filtrantes tradicionales y otros no convencionales.

El lecho que empleó la mezcla de los tres materiales debe ser evaluado con mayor detenimiento en próximas investigaciones ya que su comportamiento hidrodinámico a pesar de ser atípico, presentó el mayor número de tanques en serie con respecto a los otros lechos y se vió reflejado en la eficiencia de remoción del agua tratada.

Realizar una ANOVA, análisis de varianza para los próximos estudios realizados con el fin de hacer comparaciones entre los tratamientos empleados.

## 13 BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE ALEMANIA, GIZ. Programa de saneamiento sostenible ecosan 2011. Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Eschborn. Alemania.

AGUIRRE, M., RAMÍREZ R., DURÁN A. y DURÁN A. 2001. Tratamiento con coque activado de aguas residuales clarificadas. Instituto de Ingeniería, UNAM. Facultad de Química, Coyoacán, México.

ALCALDÍA DE BOGOTÁ. (s.f.). Humedales. Recuperado el 1 de Julio de 2013, de [www.bogota.gov.co/guia/interfaz/usuario/anexos/Humedales.doc](http://www.bogota.gov.co/guia/interfaz/usuario/anexos/Humedales.doc). Bogota. Colombia.

ANGULO, A. y ARIAS, D. 2009. Evaluación de la remoción y el transporte de fenoles en un reactor híbrido entre flujo a pistón y humedal artificial, con guadua y planta macrofita (*polygonum hydropiperoides*) como medio de soporte fijo, para el tratamiento de aguas residuales industriales. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia.

ARROYAVE, D., GONZALEZ, M. y GALLEGO, D. 2004. Evaluación del comportamiento hidráulico un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín. Colombia.

AZNAR, J. 2000. Determinación de los parámetros fisicoquímicos de agua. gestión ambiental. Instituto Tecnológico de Química y Materiales Álvaro Alonso Barba. Universidad Carlos III. Madrid España.

BORRERO, J. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Cataluña. España.

BURNS, R. Fundamentos de Química. 2003. Pearson educación. Cuarta edición. México.

CANO, L. 2010. Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio. Universidad Tecnológica. Facultad de Tecnología. Pereira. Colombia

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL AGUA. – CIDTA. 2010. Características de las aguas residuales. Universidad de Salamanca. España. Recuperado el 20 de Junio de 2015 de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL - CEPIS. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano. Filtración Rápida. Perú.

CORREDOR, D. y CAICEDO, L. 2005. Modelos matemáticos para reactores biológicos de lecho empacado (PBR): una revisión bibliográfica. Revista ingeniería e investigación. Vol. 25.

COMISION NACIONAL DEL AGUA. Estadísticas del Agua en Mexico. 2006.

DAUB, W. y SEESE, W. 1996. Química. Pearson Educación. Séptima edición.

DELGADILLO, O., CAMACHO, A., PÉREZ, L. y ANDRADE, M., 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales Artificiales. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia.

DUONG, D. 2000. Adsorption Science and Tecnology. Proceedings of the Second Pacific Conference on Adsorption Science and Technology.

FENOGLIO, L. 2000. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. Facultad de Ciencias. UNAM. Mexico.

FUNDACION HUMEDALES BOGOTA, 2010. HUMEDAL LA CONEJERA. Recuperado 18 de Junio de 2015 de <http://humedalesbogota.com/humedal-la-conejera/>

FUNDACION HUMEDALES BOGOTA, 2010. Reservar de Fontanar versus Reserva la Conejera Recuperado 18 de Junio de 2015 de <http://humedalesbogota.com/2014/11/04/reserva-fontanar-vs-reserva-la-conejera/>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. OFFICE OF WATER. 2000. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial Washington, D.C. United States.

FAIR, G., GEYER, J., y OKUN, D. 1966. Water and Wastewater Engineering. 2 Volúmenes. Nueva York: John Wiley and Sons.

FRERS, C. 2008. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado el 5 de diciembre de 2014 de [http://www.ecoportal.net/Temas\\_Especiales/Contaminacion/EI\\_uso\\_de\\_plantas\\_acuaticas\\_para\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales](http://www.ecoportal.net/Temas_Especiales/Contaminacion/EI_uso_de_plantas_acuaticas_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales).

GALVIS, G. 1984. Consideraciones sobre la aplicación del modelo simplificado de Wolf Resnick. XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Barranquilla. Colombia.

GARCÍA, J. y CORZO, A. 2006. humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Centro de Investigación y Desarrollo. CSIC .Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. España.

GARCÍA, M. 1996. Hidrodinamica ambiental. Front Cover. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.

GIÁCOMAN G., VALLEJOS, J., FRÍAS, F., HURTADO V., CORONADO R. y MÉNDEZ N. 2003. Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. Ingeniería, Vol. 7, Número 3. Universidad Autónoma. Yucatán. México

GONZÁLEZ, J., FRÍAS, A., EXPÓSITO, E., MONTIEL, V. y ALDAZ, A. 2005. Flujo no ideal: reactor tanque. Universidad autónoma de Madrid. Área de ingeniería química. España.

Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Recuperado 3 de Marzo de 2015. [www.chduero.es/descarga.aspx?fich=/Publicaciones/guiapractica-depuracion aguas](http://www.chduero.es/descarga.aspx?fich=/Publicaciones/guiapractica-depuracion%20aguas).

Grupo de Tratamiento de aguas residuales. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Sevilla. 2010

GRUPO TECNOQUIM. 2010. Antracita. Recuperado el 10 de Noviembre de 2014 de [www.grupotecnoquim.com/productos/ANTRACITA169.php](http://www.grupotecnoquim.com/productos/ANTRACITA169.php).

HERNANDEZ, J. y RANGEL, O. 2009. La vegetación del humedal de Jaboque. Caldasia Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

HIMMELBALU, D. y BISHOFF, K. 2004. Process analysis and simulation: deterministic system análisis y simulación de procesos. John Wiley and Sons Wiley. New York. United States.

HIMMELBALU, D. y BISHOFF, K. 1987. Procesos análisis y simulación de procesos: editorial España. Reverté. Madrid. España.

HIRSCH, A. 1969. Basin tracer curves interpreted by basic analytics. American Society of Civil Engineer. New York.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES DEL PACÍFICO “John Von Neumann”. Análisis fisico-químico y ecológico de las fuentes abastecedoras de agua para comunidades indígenas de ozbescac en la cuenca del rio Saija, Timbiquí – Cauca. Quibdó, Julio de 2013.

LARA, J. 1999. Depuración de aguas residuales municipales artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

LARA, C., DIAZ, J. y BONA, A. 2000. Evaluación hidráulica de un reactor UASP de compartimientos. Universidad del Valle (Colombia) y Universidad de Paraná (Brasil). Publicaciones Facultad de Ciencias e Ingeniería. Seminario Internacional: Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales. Universidad de Boyacá. Tunja. Colombia.

LARA J., ZARRUK, G., ARANGUREN, A., HUERTAS, L., Hidrodinámica del flujo en un humedal artificial de flujo subsuperficial. Universidad Javeriana. ACOPAL. 2007

LEVENSPIEL, O. 2004. Ingeniería de las reacciones químicas. Editorial Reverté S.A. Sexta Edición. New York.

LONDOÑO, L. y MARÍN, C. 2010. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Universidad Tecnológica. Pereira. Colombia.

LUNA, D., GONZÁLEZ D., GORDON, M., y MARTÍN, N. 2007. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. Universidad Autónoma de México. Departamento de Química. Área Termofluidos. Contactos número 69. pp 39-48. México

METCALF y EDDY. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen 2. México.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE CONSEJO NACIONAL AMBIENTAL. 2002. Política Nacional para Humedales interiores de Colombia Estrategias para su conservación y uso sostenible. Primera Edición. Bogotá D.C.

MORENO, V., GARCIA, J. F. y VILLALBA, J. 2000. Descripción General de los Humedales de Bogotá D. C. Sociedad Geográfica de Colombia. Bogotá.

MORGAN, J., JIMÉNEZ, B., Y NOYOLA A. 2008. Un nuevo índice para la interpretación de las curvas de distribución de tiempos de residencias en tanque para tratamiento de agua. Instituto de ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 24 de noviembre de 2014 de <http://unicesar.ambientalex.info/infoCT/Nueindintcurdistierestantraagumx.pdf>

OLSON, D. y STEPAN, J. 2000. Activited carbon from lignite for water treatment. United State Department of Energy National.Energy Technology Laboratory. Pittsburgh.

OTÁLORA, A. 2011. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño Gandúl. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

PEDESCOLL, A. 2010. Colmatación en humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal. Medidas, factores de diseño y estrategias de prevención. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

PEDROZO, J., y TORRENEGRA, R., 2000. Exploremos la Química 10. Pearson Educación de Colombia.

PÉREZ, A. 2008. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. Revista Facultad Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia.

PÉREZ, G. 2008. Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. México.

RAMSAR. The Convention on Wetlands text as originally adopted in 1971. Recuperado el 1 de Julio de 2013, de <http://www.ramsar.org/pdf/sitelist.pdf>

RODRÍGUEZ, T. y OSPINA, I. 2005. Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del rio Bogotá. Ciencias e Ingeniería Neogranadina Número 15 pp 74-84. Bogotá. Colombia.

RODRÍGUEZ, R. y MOLINA, M. 2001. El carbón activado en proceso de descontaminación. Departamento de Química Inorgánica. Universidad de Alicante. España.

ROJO, C. y PÉREZ, M. 2000. Función depuradora de los humedales I. Una revisión bibliográfica sobre papel de los macrófitos. Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología evolutiva Universitat de València. España.

ROMERO, M., COLÍN, A., SÁNCHEZ, E., y ORTIZ, L. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Nacional de la contaminación ambiental. Volumen 25. Numero 3. pp 157- 167. México.

ROY, C. y VOLESKY, B. 1978. Activated carbon adsorption process for purification of textile wastewater. Textile Chemist y Colorist. Volumen 10 Issue 5, pp 26.

SABAS, C. 2011. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. Universidad tecnológica. Pereira.

SANGIACOMO, J., 2007. Manual de carbón activo. Universidad de Sevilla. Recuperado el 10 de diciembre de 2014 de <http://es.scribd.com/doc/55759575/Manual-Del-Carbon-Activado#scribd>.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINEROENERGETICO. 2012. Guías minerales y Rocas. Recuperado el 1 de diciembre de 2014 de [www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/gallery.php?q=318de7fd035](http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/gallery.php?q=318de7fd035)

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1999. Free water surface wetland for wastewater treatment a technology assessment. Washington.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1990. A handbook of constructed wetland. Washington.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1988. Design Manual, Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Washington.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Office of Water Environmental Protection. 2000. Agency Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington.

VARGAS, J. y TORRES, J. 2008. Diseño, implementación y estudio hidrodinámico de un reactor biológico de cargas secuenciales de flujo a pistón para tratar aguas residuales sintéticas. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia.

VILLAROEL, J., 2012. Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales en la comunidad de Rumichaca. Universidad nacional agraria la

molina. Facultad de Ingeniería Agrícola Departamento de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible.

VILLEGAS, M. y RAMÍREZ, R., 1989. Investiguemos Física 10. Editorial Voluntad S.A. Bogotá. Colombia.

## ANEXO A

### Relaciones entre las curvas $F$ , $C$ y $E$

La curva  $C$  representa la concentración del trazador a la salida con respecto al tiempo, lo que indica cuando salen las moléculas, es decir su distribución de edades. De manera similar, como la distribución del tiempo de residencia (RTD), de RTD de cualquier fracción del flujo de entrada ha de ser la misma que la del fluido de salida, representará también la RTD de cualquier fracción del fluido a la salida, por lo que se cumple la ecuación 1 (Levenspiel, 2004).

$$C = E \quad (1)$$

La curva  $C$  da directamente la distribución de edades a la salida. La curva  $F$  representa el aumento de la concentración de un trazador en la corriente de salida, para un tiempo mayor el trazador en la corriente de salida tiene una edad inferior a  $t$ , y se cumple el balance de materia para el trazador en el que la fracción del trazador en la corriente de entrada es igual a la fracción de la corriente de salida.

Es importante definir el tiempo medio denominado también tiempo de permanencia o tiempo espacial del fluido en un recipiente mediante la ecuación:

$$t_m = \frac{V}{v} \quad (2)$$

La relación entre las curvas  $C$ ,  $E$  y  $F$  está dada por (Levenspiel, 2004):

$$E = C = \frac{dF}{dt} \quad (3)$$

$$F = \int_0^t E dt = \int_0^t C dt \quad (4)$$

La relación  $E$  y  $E_\theta$  está representada por la ecuación:

$$\theta E_\theta = t_m E \quad (5)$$

De la misma manera se obtienen relaciones similares para  $F$  y  $F_\theta$ . Las relaciones entre las distribuciones empleando ambas medidas de tiempo se resumen a continuación:

$$E = C = \frac{dF}{dt} \quad (6)$$

$$E_\theta = t_m E \quad (7)$$

$$E_\theta = C_\theta = \frac{dF_\theta}{d\theta} \quad (8)$$

$$C_\theta = t_m C \quad (9)$$

$$F_\theta = F \quad (10)$$

Por otro lado, se puede definir una función adimensional  $E(\theta)$  en función del tiempo adimensional ( $\theta$ ), que por analogía se puede obtener:

$$E(\theta) d(\theta) = E(t) d(t) \quad (11)$$

$$E(\theta) = \frac{E(t) d(t)}{d(\theta)} = \frac{E(t)V}{Q} \quad (12)$$

## ANEXO B

### Modelos Cuantitativos

#### Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick

Es un método cuantitativo muy utilizado en la evaluación hidrodinámica para determinar los porcentajes de flujo pistón, flujo de no pistón y zonas muertas. Las ecuaciones tenidas en cuenta para la aplicación de este método se relacionan a continuación:

La fracción de la totalidad del trazador que sale del reactor es:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (14)$$

Gráficamente se obtiene  $\frac{t_2}{t_0}$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1 - t_2}{t_0} \frac{t_2}{t_0}} \quad (15)$$

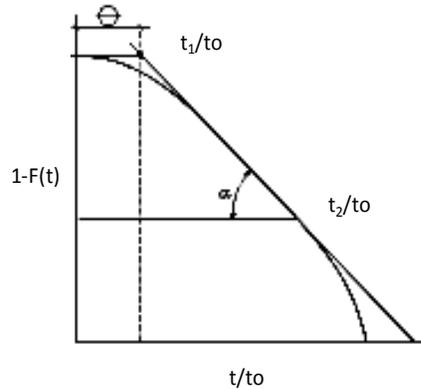
$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad (16)$$

El volumen de espacios muertos es igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (17)$$

El flujo mezclado M es igual a:

$$M = 1 - p \quad (18)$$



**Figura 1.** Curva de  $1-F(t)$  cantidad de trazador que permanece en el reactor. Fuente: Gómez et al. (2013).

### Modelo de Dispersión o flujo Disperso en pistón

Al introducir un trazador que entra a un recipiente mediante un impulso ideal, éste se dispersa conforme pasa a través del recipiente. Para el uso de este modelo es necesario considerar el flujo pistón como forma de difusión longitudinal, cuyo coeficiente de dispersión  $D$  ( $m^2/s$ ) representa este proceso de dispersión (Levenspiel, 2004). El módulo de dispersión está definido como  $D/uL$  y es un grupo adimensional que caracteriza a la dispersión en todo el recipiente.

Se calcula  $D/uL$  registrando la forma de la curva del trazador conforme sale del reactor. De forma experimental se mide el  $t_m$ , tiempo de tránsito y además se determina la varianza  $\delta^2$ , o una medida de la dispersión de la curva. Estas medidas,  $t_m$  y  $\delta^2$ , están directamente relacionadas por la teoría con  $D/uL$ . La media, para datos discretos o continuos, se define según las ecuaciones (Levenspiel, 2004):

$$t_m = \frac{\int_0^t tCdt}{\int_0^\infty Cdt} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (19)$$

La varianza se define como:

$$\delta^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - t_m)^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - t_m^2 \quad (20)$$

o en forma discreta

$$\delta^2 = \frac{\sum (t_i - t_m)^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad (21)$$

La varianza representa el cuadrado de la dispersión de la distribución como pasa por la salida del reactor y sus unidades son (tiempo)<sup>2</sup>. La varianza es útil para ajustar curvas experimentales a una de una familia de curvas teóricas.

Para relacionar  $\delta$  con  $\delta_\theta$  se emplea la ecuación 22 mostrada a continuación:

$$\delta_\theta^2 = \frac{\delta^2}{t_m^2} \quad (22)$$

Este modelo de sistema no ideal tiene dos formas de aplicación, una correspondiente a un recipiente cerrado, y otro correspondiente a un sistema abierto aplicable al caso del presente estudio, para ello el modelo de dispersión emplea la siguiente ecuación (Levenspiel, 2004):

$$C_\theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}\right] \quad (23)$$

La varianza en términos del módulo de dispersión para este caso es:

$$\delta_\theta^2 = 2\frac{D}{uL} + 8\left(\frac{D}{uL}\right)^2 \quad (24)$$

### Modelo de tanques en Serie

Este modelo Emplea  $E$  para encontrar el número de tanques en serie mediante la ecuación:

$$E(\theta) = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (25)$$

El número de tanques puede ser encontrado empleando la expresión correspondiente a la ecuación:

$$\delta_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (26)$$

## ANEXO C

### Componente pedagógico.

El componente pedagógico del proyecto investigativo está orientado a desarrollar un protocolo de operación y funcionamiento del sistema construido para poner en práctica con los educandos de la Institución Educativa Distrital DELIA ZAPATA OLIVELLA algunos conceptos fundamentales de las ciencias naturales y de la educación ambiental. Para ello, se consideró dividirlo en tres secciones: 1) la parte conceptual, donde los estudiantes se fortalecerán en sus conocimientos de las ciencias naturales y de la educación ambiental; 2) la aplicación de estos conceptos en la parte experimental propiamente dicha (sin pretender en ningún momento que los educandos vayan a salir expertos en evaluación hidrodinámica en humedales) y 3) evidencias del trabajo de algunos estudiantes antes y durante las pruebas experimentales.

#### 1. Aspectos conceptuales

Las siguientes definiciones corresponden a conceptos básicos requeridos para que los estudiantes se familiaricen con el tema de los humedales, su hidrodinámica y algunos parámetros físico-químicos que intervienen en la calidad de las aguas.

**Afluente.** Suministro de agua destinado a un sitio: tanque o planta.

**Aforo.** Medida del caudal de un curso de agua en un punto y durante un periodo determinados. (Daub et al, 1996)

**Carbón activado.** Término que encierra a una serie de carbones porosos obtenidos en forma artificial a través de un proceso de carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, que conduce a un producto con alto grado de porosidad y elevada área superficial interna.

**Carbón antracita.** Carbón duro que tiene el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil. La antracita es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico.



**Figura 2.** Materiales para los ensayos

**Caudal.** Cantidad de fluido que atraviesa una sección conocida de una corriente durante una unidad de tiempo concreta. Generalmente se expresa en  $m^3/s$ . También puede expresarse en l/min. (Vanegas et al, 1989)

**Concentración.** Medida de la cantidad de soluto disuelto en un volumen específico de solución. Generalmente, se expresa en g/l. (Pedrozo et al, 2000)

**Conductividad eléctrica.** Expresa la concentración total de sales solubles contenidas en las aguas. Es proporcional al contenido de sales disueltas y por tanto, está directamente relacionada con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente y en general, presenta una estrecha correlación con los sólidos totales disueltos. La medida de la conductividad eléctrica se realiza mediante un conductivímetro provisto de célula de conductividad apropiada. Las unidades más comunes son micro-Siemens por centímetro,  $\mu S/cm$ . (Daub et al, 1996)

**Coque.** Es el residuo sólido que se obtiene a partir de la pirólisis, de determinados carbones minerales, como las hullas (o carbones bituminosos) que tienen la capacidad de transformarse en coque después de haber pasado por una fase plástica.

**Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** Es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente por acción de los microorganismos aerobios en el agua. Normalmente se emplea la  $DBO_5$ , que mide el  $O_2$  consumido por los microorganismos en cinco días (Universidad de Sevilla, 2010).

**Destilación simple.** Técnica que permite separar líquidos de otros ingredientes no volátiles disueltos en él. Consta de tres etapas: hervir la mezcla (colocada en un matraz) para obtener vapor, enfriar éste (con un refrigerante) para condensarlo, y recoger el líquido así condensado. La condensación se obtiene mediante enfriamiento al pasar el vapor a través del condensador (o refrigerante de Liebig), constituido por un tubo por donde pasa el vapor, rodeado por una camisa en la que circula agua fría en contracorriente. (Pedrozo et al, 2000)



**Figura 3.** Destilación Simple

**Efluente.** La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc. Este es el agua producto dada por el sistema.

**Etapas de depuración:** pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario.

**Indicador:** sustancia que se agrega a una solución para indicar por un cambio de color, el punto en el cual el soluto que se le añade ha reaccionado con todo el soluto presente en la solución. (Pedrozo et al, 2000)

**Hidromecánica.** Rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos. (Vanegas et al, 1989)

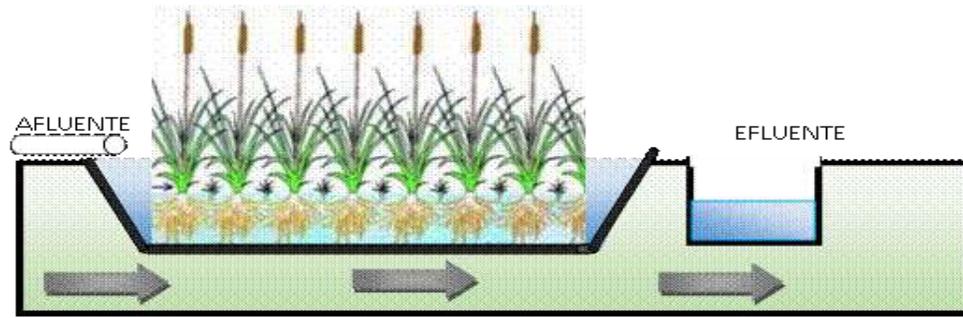
**Hidrodinámica.** Rama de la hidromecánica que estudia el comportamiento de los fluidos en movimiento. (Vanegas et al, 1989)

**Hidráulica.** Rama de la hidromecánica que emplea las leyes de los fluidos en las aplicaciones técnicas. (Vanegas et al, 1989)

**Humedal.** Zona en la que el agua es el principal factor que controla tanto el ambiente como la vida vegetal y animal relacionada con él. Entre sus usos están: la preservación y la conservación de la flora y fauna nativa, la educación ambiental, la investigación científica y la recreación pasiva y sus funciones son: 1) ser reguladores del ciclo hídrico, porque controlan y previenen las inundaciones, retienen sedimentos y nutrientes, contribuyen en la descarga y recarga de acuíferos y funcionan como reservorios de agua; 2) mejorar la calidad del aire, ya que son sumideros del dióxido de carbono, regulan la temperatura, y son productores de oxígeno. Además, presentan los siguientes bienes y servicios: 1) espacios de conservación biofísica en la región, porque son refugio de biodiversidad endémica y hábitat esencial de diversas especies de aves residentes y migratorias; y 2) espacios pedagógicos para disfrutar, pues son aulas vivas para el aprendizaje, funcionan como área de recreación pasiva y son generadores de conocimiento e investigación. (EAAB, 2006)

**Humedal artificial.** Los humedales artificiales son sistemas de depuración en los que se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales. Pedescoll (2010)

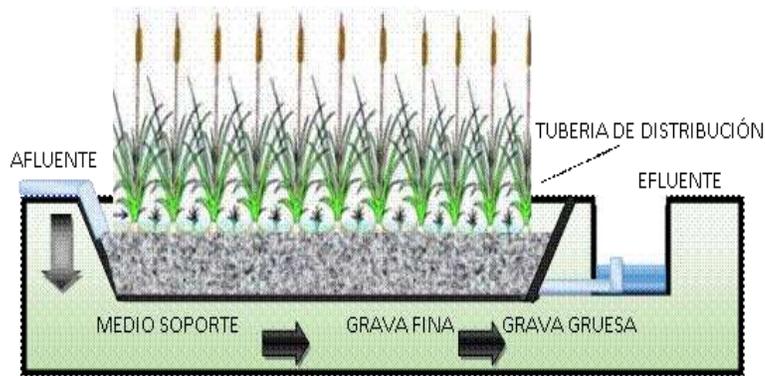
**Humedal de flujo superficial (HAFS).** El agua circula por la superficie a través de tallos, raíces y hojas caídas, donde se desarrolla la película bacteriana encargada de la eliminación de contaminantes. El HAFS ocupa grandes extensiones de terreno y está constituido por canales con vegetación emergente y con un nivel de agua poco profundo. Se emplea principalmente como tratamiento de purificación de metales, recibiendo efluentes de un tratamiento secundario anterior. Pedescoll (2010)



**Figura 4.** Humedal de Flujo Superficial. Fuente: Pedescoll (2010)

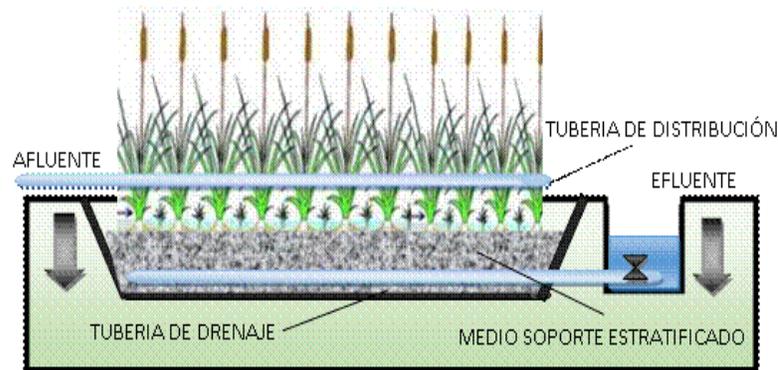
**Humedal de flujo sub-superficial (HAFSs).** El agua circula a través del sustrato de forma subterránea por los espacios intersticiales del lecho filtrante y en contacto con los rizomas y raíces de la vegetación del humedal. Pedescoll (2010). Según la dirección en que circulan las aguas se clasifican a su vez en dos tipos:

- Horizontales (HAFSsH): el agua circula en sentido horizontal a través del lecho. La entrada de agua puede ser continua o intermitente.



**Figura 5.** Humedal de flujo subsuperficial Horizontal. Fuente: Pedescoll (2010)

- Verticales (HAFSsV): el agua circula en sentido vertical a través del lecho. La entrada de agua se realiza de forma intermitente mediante bombeo o sifones de descarga controlada. La aireación del humedal se produce fundamentalmente por la corriente de aire ascendente que se crea al circular en sentido descendente el agua.



**Figura 6.** Humedal de flujo Subsuperficial Vertical. Fuente: Pedescoll (2010)

**Masa molar.** Masa en gramos de una mol de cualquier sustancia (átomos, moléculas); en otras palabras, es la suma de las masas atómicas de todos los átomos representados en la fórmula, expresadas en gramos. (Daub et al, 1996)

**Oxígeno Disuelto (OD).** Es el  $O_2$  libremente disponible en el agua. El déficit de  $O_2$  indica la diferencia del OD en el agua en relación con el máximo teórico que puede estar presente, calculado a partir de los valores de altitud, temperatura, salinidad y OD

medidos en cada punto de monitoreo. En las aguas superficiales de Colombia, el OD varía entre 15 y 8 mg O<sub>2</sub>/l a temperaturas entre 0°C y 25°C (IDEAM, 2000).

**pH.** Método para expresar la concentración de iones hidrógeno (acidez) de una solución, donde  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ . (Burns, 2003)

**Porosidad.** Es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos que posee una roca y se define como la fracción del volumen total de la roca que corresponde a espacios que pueden almacenar fluidos. Se puede expresar como un porcentaje.

**Pretratamiento.** Separación previa de la mayor cantidad posible de contaminantes que por naturaleza o tamaño puedan dar problemas posteriormente (sólidos gruesos, arenas y flotantes principalmente).

**Solución.** Mezcla homogénea de dos o más sustancias. (Burns et al, 2003)

**Solución acuosa.** Solución que se obtiene disolviendo un soluto (cualquier sustancia química que se disuelve) en agua, que es el disolvente. (Burns et al, 2003)

**Solución diluida.** Solución que contiene una cantidad relativamente pequeña de soluto. (Burns et al, 2003)

**Sustrato filtrante.** Es uno de los elementos principales de un humedal, en conjunto con la vegetación. El agua circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación. El sustrato sirve como soporte de la vegetación y permite la fijación de la población microbiana (en forma de bio-película) encargada de la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes. (Pedescoll, 2010)

**Titulación:** proceso de hacer reaccionar una solución de concentración desconocida con una de concentración conocida (una solución estándar). (Pedrozo et al, 2000).

**Tratamiento primario.** Consiste en la eliminación de sólidos sedimentables y flotantes.

**Tratamiento secundario.** Elimina la materia orgánica biodegradable disuelta o en forma coloidal, el resto de sólidos y parte de los nutrientes presentes en el agua.

**Tratamiento terciario.** Permite obtener efluentes de mayor calidad, para ser vertidos en zonas con requisitos más exigentes. Busca eliminar nutrientes y patógenos.

**Vegetación.** Las plantas emergentes acuáticas (macrófitos) proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan los procesos de filtración y adsorción de constituyentes del agua residual y contribuyen fundamentalmente a la oxigenación del sustrato. También favorecen la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar. (Lara, 1999)

**Volumen.** Es el espacio ocupado por un cuerpo. Propiedad comúnmente utilizada para determinar la cantidad de un líquido. Las unidades de medición más importantes son el metro cúbico, m<sup>3</sup>, litro, L y el mililitro, mL, unidad equivalente al centímetro cúbico, cm<sup>3</sup>. (Vanegas et al, 1989)

## **2. Etapa Experimental-Operativa**

Esta sección del componente pedagógico consta de las siguientes partes: alistamiento de materiales y equipos, cálculos previos, puesta en marcha y control de la operación.

### **2.1 Alistamiento de materiales y equipos**

Los materiales requeridos para la evaluación incluyen los lechos soporte: carbón activado, carbón antracita o coque; cloruro de sodio, NaCl, 98% de pureza, agua destilada, balanza analítica, cronómetro, conductivímetro, vasos de precipitados de 100, 250 y 1000 ml probetas de 100, 250, 500 y 1000 ml, pipeta graduada de 10 ml, succionador y descargador entre otros; vidriería y demás recipientes necesarios para

la operación. Materiales de aseo y limpieza: jabón detergente, bayetillas, cepillos y traperos. Elementos protectores de seguridad: bata, guantes y gafas. Otros elementos: computador portátil, calculadora y un equipo multiparámetro.

## **2.2 Cálculos previos**

### **2.2.1 Volumen útil del humedal**

Se calcula de acuerdo con las dimensiones del humedal: ancho 0.28 m, longitud 0.58 m y altura efectiva 0.35 m.

$$V_T = 0.58 \text{ m} \times 0,28 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} = 0.0568 \text{ m}^3$$

donde,  $V_T$ : volumen útil del humedal en  $\text{m}^3$ .

### **2.2.2 Aforos volumétricos**

Se toman los volúmenes en el afluente y efluente en un tiempo indicado por el docente. Como los volúmenes se toman en recipientes con capacidades registradas en mililitros y los tiempos registrados son en segundos y los caudales requeridos son en l/min, se procede a aplicar la siguiente expresión matemática

$$Q_m = (V/t) * 0.06 \tag{27}$$

donde  $Q_m$ : es el caudal medido mediante aforo volumétrico, l/min

t: tiempo medido en segundos durante la toma del volumen en el recipiente

0.06: factor de conversión

### **2.2.3 Porosidad del lecho soporte**

Se determina la porosidad ( $\epsilon$ ) del medio soporte a nivel de laboratorio, que consiste en llenar un recipiente (vaso de precipitados) de volumen conocido ( $V_1 = 1000$  ml) con el lecho seleccionado para la práctica (carbón activado, carbón antracita o coque) y se le adiciona un volumen de agua ( $V_2$ ) hasta alcanzar la capacidad total del vaso de precipitados. El volumen  $V_2$  se obtiene mediante un proceso de filtración de tal manera que se recoja el filtrado (agua) libre de sedimentos y se mide en una probeta. La porosidad del medio soporte,  $\epsilon$ , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = V_1/V_2 \quad (28)$$



**Figura 7.** Medición de la porosidad

#### **2.2.4 Curva de relación (calibración) concentración de NaCl versus la conductividad**

Se toman muestras del agua en un matraz de Erlenmeyer de 1000 ml (1 l) en el sitio de alimentación al humedal artificial o construido y se les agrega una masa específica de cloruro de sodio de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5 y 2.0 gramos agitando vigorosamente y se procede hacer lectura de la conductividad a cada una de ellas. Antes de agregársele la cantidad predicha de sal, se debe tomar lectura de la conductividad del agua alimentada (la conductividad del agua puede variar). Se recomienda ver la tabla de concentración NaCl versus conductividad. Se realiza la Tabla 4 en programa Excel, con la siguiente

información: concentración de la solución salina (dividiendo la masa de NaCl en 1 l), conductividad de la concentración salina, conductividad de la alimentación y conductividad neta (diferencia entre la conductividad de la concentración salina y la conductividad de la alimentación). Se grafica en Excel, concentración salina (Y) versus conductividad neta (X). Luego se obtiene la ecuación de la recta:  $Y = mX + b$  con su respectiva correlación y/o ajustes a la recta. (La ecuación de la recta y su correlación la realiza el profesor).

**Tabla 4.** Concentración NaCl versus conductividad

Concentración de NaCl g/l	Conductividad		
	Solución salina $\mu\text{S/cm}$	Alimentación $\mu\text{S/cm}$	Neta $\mu\text{S/cm}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

### 2.2.5 Cálculo de la cantidad total del trazador, NaCl

El trazador de cloruro de sodio está relacionado al ión cloruro. Para determinar la cantidad de trazador, se recurre a las siguientes ecuaciones que se basan en este ión.

La cantidad requerida de cloruro de sodio se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P = V_T \times \epsilon \times K \times C_o / L \tag{29}$$

Donde

P: es la cantidad de cloruro de sodio en g

$V_T$ : Volumen útil del humedal,  $\text{m}^3 = 0.0568 \text{ m}^3$

K: Constante obtenida mediante relación estequiométrica entre la masa molar del NaCl (58.5) y la del ión cloruro (35.5)=  $58.5/35.5 = 1.65$

Co: Concentración de iones cloruro,  $\text{Cl}^-$ , mg/l= 40 mg/l

L: Porcentaje de pureza de la sal, 98% = 0.98

$\epsilon$ : Porosidad del lecho = 0.58

La solución de cloruro de sodio se prepara adicionando la cantidad de sal requerida a una cantidad (volumen) de agua destilada hasta completar los 1000 ml de capacidad del balón aforado, agitando vigorosamente. La concentración del trazador se calcula dividiendo la masa del NaCl requerido sobre el volumen de la solución, que es la capacidad del balón aforado, y se expresa en g/ml. La solución salina se mantiene almacenada en este balón aforado y siempre que se vaya a utilizar deberá agitarse fuertemente a fin de garantizar la homogeneidad de la solución del trazador suministrado durante las pruebas experimentales. La siguiente figura muestra al estudiante realizando soluciones de cloruro de sodio.

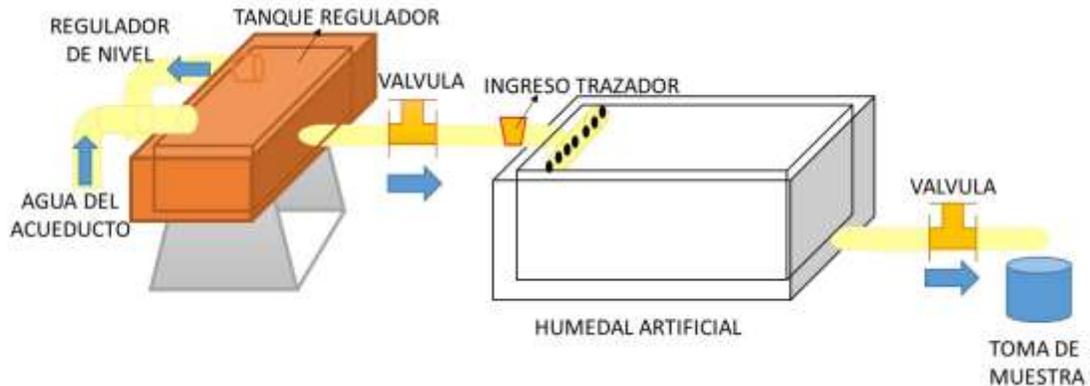


**Figura 8.** Realización de Solución salina por el estudiante

### 3. Puesta en marcha

Antes de ponerse en marcha el sistema para las pruebas experimentales, los educandos deben tener en cuenta lo siguiente:

3.1 Conocimiento previo del equipo y los accesorios que lo componen y que no estén averiados, El esquema del sistema se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Esquema del sistema empleado

3.2 Depositar en el humedal, el lecho soporte a experimentar durante la prueba, hasta una altura efectiva de 35 cm; En la Figura 10 la estudiante escoge el material apropiado para depositarlo en el humedal.



**Figura 10.** Selección de material soporte para el humedal

3.3 Abrir las válvulas de alimentación de agua que proviene directamente del acueducto con destino al tanque regulador y de éste al humedal y abrir la válvula de descarga del humedal para verificar que no existen obstrucciones ni fugas;

3.4 Se cierra la válvula de descarga del humedal a fin de proceder a llenar el humedal en hasta una altura máxima efectiva de 35 cm;

3.5 Se efectúan los aforos existentes tanto a la entrada (afluente) del humedal como a la salida (efluente) a fin de que el caudal de entrada sea igual al caudal de salida y trabajar a un flujo constante en forma promedio, garantizando la efectividad de la evaluación de la prueba experimental y de esta forma poner a punto el sistema. Es de anotar, que antes de comenzar la prueba deben tomarse las lecturas de las conductividades de la alimentación al tanque regulador y de la descarga del humedal y se registran como datos cero (0) en la planilla de control (que aparece) en la sección de control de operación; tener listos todos los materiales para la puesta en marcha, como los 10 vasos de precipitados de 100 ml de capacidad, el balde con agua del acueducto para el lavado previo de los vasos de precipitados después de las tomas de las muestras, el cronómetro digital, el conductímetro, la probeta de 100 ml con agua destilada, para tener el electrodo en dicho recipiente mientras se llega el momento oportuno de tomar las muestras y hacer las lecturas en los tiempos indicados y la pipeta de una alícuota de 10 cm del trazador, solución de cloruro de sodio. La prueba se inicia cuando se inyecta en forma instantánea el trazador en un tiempo inferior a los 10 segundos, registrando este tiempo en la planilla de control. En la Figura 11 se presenta el aforo de caudal realizado por la estudiante a la entrada el sistema.

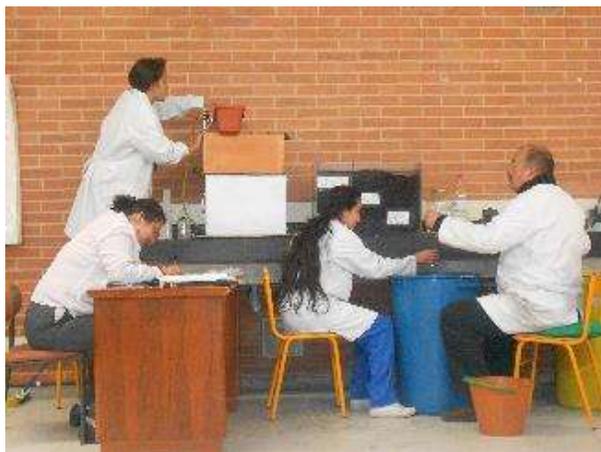


**Figura 11.** Aforo de caudal al inicio del sistema

#### **4. Control de operación**

Se lleva a cabo mediante una planilla de control como la presentada a continuación en la cual se registran los datos tomados durante el el proceso de la prueba así: en la

descarga del humedal (efluente) se toman conductividades cada dos minutos y caudales (mediante aforos) cada 15 minutos. En el afluente, se toman conductividades y caudales cada 15 minutos. Las alturas en el humedal y tanque regulador se reportan cada 15 minutos. El tiempo total de la operación es tres (3) veces el tiempo de retención teórico, calculado por el (la) profesor(a), que dirige la prueba.



**Figura 12.** Seguimiento y control del proceso

Terminada la prueba se procede a cerrar válvula de alimentación del agua del acueducto al tanque regulador y se abre totalmente la válvula de descarga del humedal. Finalizada la salida del agua del humedal artificial, se extrae todo el material utilizado como lecho soporte para lavarlo totalmente con agua del acueducto y también se procede a lavar con agua y jabón el humedal a fin de dejarlo listo para la siguiente corrida experimental. La Figura 12 muestra la forma la cual se controla el sistema.

<b>Tabla 5</b> Planilla de control de operación prueba experimental utilizando lecho soporte
--

Día                      mes                      año							
AFLUENTE				EFLUENTE			
muestra número	intervalo de tiempo minutos	conductividad $\mu\text{S/cm}$	Caudal l/min	muestra número	intervalo de tiempo minutos	conductividad $\mu\text{S/cm}$	Caudal L/min
0	0			0	0		
1	15			1	2		
2	30			2	4		
3	45			3	6		
4	60			4	8		
5	75			5	10		
6	90			6	12		
7	105			7	14		
8	120			8	16		
9	135			9	18		
10	150			10	20		
11	165			11	22		
12	180			12	24		
<b>alturas recipientes en cm</b>				13	26		
<b>intervalo</b>	<b>regulador</b>	<b>humedal</b>	<b>Variación</b>	14	28		
15				15	30		
30				16	32		
45				17	34		
60				18	36		
75				19	38		
90				20	40		
<b>OBSERVACIONES Y OTROS DATOS</b> Tiempo descarga trazador (seg):				21	42		
				22	44		
				23	46		
				24	48		
				25	50		
				26	52		
				27	54		
				28	56		
				29	58		
				30	60		

## 5. Evidencias pedagógicas

El trabajo operativo, se realizó en el laboratorio de química del Colegio Delia Zapata Olivella, ubicado en la calle 144 C N 141 A 51, localidad 11 de Suba. Los estudiantes<sup>1</sup> participantes en la parte experimental con autorización de sus acudientes fueron: Ronal Sanchez, Diego Guerrero, Diana y Angie León, Danna Triviño y Olman Chacón. Se presentan algunas fotografías que evidencian el trabajo de los estudiantes durante el proceso experimental explicando la función de cada uno en el proceso.



Los estudiantes realizan el seguimiento del trazador a la salida tomando muestras y leyendo la conductividad



La estudiante realiza el control manual del nivel de entrada al sistema para garantizar el caudal constante.



los estudiantes toman los resultados del seguimiento del sistema en los formatos diseñados.



Se lava el material filtrante y el humedal luego de realizado un ensayo. Se garantiza que no existan interferencias en el ensayo siguiente

---

<sup>1</sup> Las fotografías tomadas a los estudiantes y mostradas en este documento fueron autorizadas por los padres o acudientes de los menores.



Lavado y selección del material poroso con el fin de evitar la presencia de lodos en el siguiente material.



Las estudiantes realizan la toma de la muestra durante el ensayo y además el seguimiento del tiempo de la toma y del ensayo.



La estudiante verifica el nivel de agua dentro del humedal con el fin de asegurar el caudal dentro del mismo



La estudiante agrega el material granular para realizar un nuevo ensayo en el sistema