

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE MAQUINARÍA AGRÍCOLA**



**Evaluación Hidrodinámica de un Pantano Construido de Flujo  
Subsuperficial**

**Por:**

**Gabriel Sosa Ávila**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial**

**Para Obtener el Título de**

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

**Buenavista, Saltillo Coahuila México. Diciembre 2015**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN PANTANO CONSTRUIDO DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL


POR:  
GABRIEL SOSA ÁVILA

TESIS  
QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA  
Y APROBADA COMO REQUISITO PARCIA PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

COMITÉ PARTICULAR:


  
DR. LUIS SAMANIEGO MORENO  
ASESOR PRINCIPAL

  
MC. HÉCTOR URIEL SERNA  
FERNÁNDEZ  
CO-ASESOR

  
DR. JAVIER DE JESÚS CORTES  
BRACHO  
CO-ASESOR

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

  
DR. LUIS SAMANIEGO MORENO  
COORDINADOR DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA

  
Coordinación de  
Ingeniería

BUENAVISTA, SALTILLO COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE DEL 2015

## ÍNDICE

<b>I .INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 HIPÓTESIS.....	2
<b>II .REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1 AGUAS RESIDUALES.....	3
2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	3
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS USOS DEL AGUA .....	4
2.4 HUMEDALES ARTIFICIALES .....	5
2.5 IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES.....	5
2.6 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	6
2.6.1 Humedales de Flujo Superficial. ....	6
2.6.2 Humedal de flujo subsuperficial .....	6
2.7 PARTES DE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL. ....	7
2.7.1 Agua Residual.....	7
2.7.2 Sustrato (medio granular) .....	8
2.7.3 Vegetación.....	9
2.7.4 Microorganismos.....	9
2.8 EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL .....	10
2.8.1 Obtención de Curvas de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR).....	11
2.9 CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	13
2.10 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA Y LA HIDRODINÁMICA EN LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS. ....	14
2.11 DEFINICIÓN DE TRAZADOR .....	14
2.11.1 Trazadores.....	14
2.12 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) .....	15
2.13 CXTFIT .....	15
<b>III .MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	17
3.2 LISTADO DE MATERIALES .....	21
3.3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	22
3.3.1 Propósito.....	22
3.4 OBTENCIÓN DE DATOS EN LOS HUMEDALES CON LA SOLUCIÓN SALINA (TRAZADOR).....	22
3.5 ANALISIS DE LA CURVA DE TENDENCIA DE CONCENTRACION DEL TRAZADOR..	23
<b>IV RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	33
<b>V CONCLUSIÓN.....</b>	<b>42</b>
<b>VL LITERATURA CITADA.....</b>	<b>44</b>

## **Dedicatorias**

### ***A mi Dios:***

*Le agradezco a dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.*

### ***A mi madre Helitania Ávila Téllez***

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

### ***A mi padre Tomas Sosa Hernández***

*Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

### ***A mis hermanos***

*A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar, por comprenderme y apoyándome incondicionalmente, compartiendo logros y tropiezos, alegrías y tristezas, por sus esfuerzos y sacrificios que me han permitido crecer como persona y superarme cada día.*

## **Agradecimientos**

A mi gloriosa “**ALMA TERRA MATER**” Por brindarme la oportunidad de realizar mi formación profesional en sus aulas.

*Al **Dr. Luis Samaniego Moreno** Por su asesoría y por compartir sus conocimientos, por su apoyo incondicional en la realización de este proyecto por su amistad y sus sabios consejos que siempre tendré presente.*

*A **mis maestros** por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional.*

*A **todos mis compañeros de la carrera** Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional. Gracias por todos los momentos compartidos, nunca los olvidaré.*

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS; A, CON FLUJO SUPERFICIAL, Y B, CON FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL.....	7
FIGURA 2. CURVA C IMPULSO .....	11
FIGURA 3. TRANSFORMACIÓN DE LA CURVA C EN CURVA E.....	12
FIGURA 4. CURVA E PARA VARIOS PATRONES DE FLUJO .....	13
FIGURA 5. LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA NATURAL DE TRATAMIENTO SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	16
FIGURA 6. SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	17
FIGURA 7. LLANTA TRITURADA.....	18
FIGURA 8. GRAVA .....	18
FIGURA 9. LLAVE TIPO GLOBO .....	19
FIGURA 10. VÁLVULA PARA REALIZAR LA INYECCIÓN DE LA SOLUCIÓN SALINA (TRAZADOR).....	19
FIGURA 11. TANQUE IMHOFF.....	20
FIGURA 12. CONCENTRACIÓN DEL TRAZADOR EN EL EFLUENTE DE UN REACTOR....	24
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA LLANTA PRUEBA 1 ..	33
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA LLANTA PRUEBA 2 ..	33
FIGURA 15. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA GRAVA PRUEBA 1 ...	34
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA GRAVA PRUEBA 2 ...	34
FIGURA 17. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA CARRIZO PRUEBA 1. ....	35
FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA CARRIZO PRUEBA 2 .....	35
FIGURA 19. CURVA AJUSTADA CON EL PROGRAMA CXTFIT, GRAVA PRUEBA 1 .....	37
FIGURA 20. CURVA AJUSTADA CON LOS PARÁMETROS DE TRANSPORTE, GRAVA PRUEBA 2 .....	38
FIGURA 21. CURVA AJUSTADA CON EL PROGRAMA CXTFIT, LLANTA PRUEBA 1 .....	38
FIGURA 22. CURVA AJUSTADA CON EL PROGRAMA CXTFIT, LLANTA PRUEBA 2 .....	39
FIGURA 23. CURVA AJUSTADA CON EL PROGRAMA CXTFIT, LLANTA PRUEBA 2 .....	39
FIGURA 24. CURVA AJUSTADA CON EL PROGRAMA CXTFIT, CARRIZO PRUEBA 1 ...	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

CUADRO 1. ACCESORIOS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL HUMEDAL.....	22
CUADRO 2. CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 1 CON LLANTA TRITURADA .....	28
CUADRO 3 CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 2 CON LLANTA TRITURADA .....	29
CUADRO 4 CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 1 CON GRAVA.....	30
CUADRO 5 CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 2 CON GRAVA.....	31
CUADRO 6 CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 1 CON CARRIZO .....	32
CUADRO 7 CONCENTRACIONES EN LA PRUEBA 2 CON CARRIZO .....	33
CUADRO 8. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE CONCENTRACIÓN.....	37
CUADRO 9. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ANÁLISIS DE CURVAS .....	37
CUADRO 10. ANÁLISIS DE $T_0/T_I$ DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS.....	37
CUADRO 11. ANÁLISIS DE $T_M/T_I$ DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS.....	38
CUADRO 12. ANÁLISIS DE $T_P/T_I$ DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS .....	38
CUADRO 13. VELOCIDADES Y TDR.....	41
CUADRO 14. COMPARACIÓN DE $T_0$ Y $T_R$ .....	41

## RESUMEN

En términos generales existen diversos procesos físicos, químicos y biológicos, para el tratamiento de las aguas residuales, que con una adecuada selección y combinación, pueden resolver la mayoría de las necesidades de disposición final o reaprovechamiento de las aguas residuales.

Los pantanos construidos son una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales, por su bajo costo de instalación y mantenimiento. Pero 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 mejorar su eficiencia. El presente trabajo consiste en evaluar el comportamiento hidrodinámico de un pantano construido de flujo subsuperficial horizontal, mediante el análisis de la Distribución de Tiempos de Residencia (DTR) obtenido con cloruro de sodio como sustancia trazadora, construido en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). El sistema fue diseñado con tres tubos PVC de 1.50 m de largo y 0.1524 m de diámetro cada uno, y rellenos con diferente material, el primero con grava, el segundo con carrizo picado y el tercer con llanta triturada. El sistema de abastecimiento utilizado es un tanque imhoff ubicado aproximadamente a 80 m de distancia del humedal, en el que se tratan las aguas provenientes del Laboratorio de Calidad de Semillas, y del Departamento de Producción las cuales son aguas residuales con una mínima cantidad de carga orgánica. La carga hidráulica es de 4 m a favor lo que permitirá un buen funcionamiento del sistema.

Palabras clave: **Tiempos de residencia, aguas residuales, trazadores.**



## I. INTRODUCCIÓN

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 de las aguas residuales debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento (Romero *et al.*, 2009).

Actualmente, los pantanos construidos o humedales, como frecuentemente se les denomina en México, representan una tecnología emergente de bajo costo para tratar aguas residuales de origen municipal, industrial o agrícola. El pantano construido es un canal artificial, ligeramente inclinado, y frecuentemente impermeabilizado para evitar la contaminación de mantos acuíferos y, en ciertas ocasiones, rellenos de grava, formando un substrato de filtración (Vidales-Contreras *et al.*, 2004).

A pesar de que en otros países los pantanos construidos han mostrado ser una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales de diferente origen, en México los pantanos construidos son una tecnología poco aplicada, tratan el 0.61 por ciento del efluente total que se produce. En estos ecosistemas es posible remover sólidos suspendidos totales y demandas químicas de oxígeno, entre otros, a niveles superiores al 80 por ciento (CONAGUA, 2008).

Es importante mencionar que los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, tiene diversas formas: existen humedales de flujo libre, humedales de flujo subsuperficial, que a su vez se divide en humedales

subsuperficiales de flujo vertical, y humedales subsuperficiales de flujo horizontal (Peña, 2012).

Un humedal artificial de flujo subsuperficial es un sistema que consiste en zanjas o canales construidos y rellenos de material granular, generalmente grava, en donde el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie de la grava cuya función es la remoción de materia orgánica. Se utilizan varias especies vegetales cuya función básica es la remoción de nutrientes presentes en las aguas (García *et al.*, 2011).

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 mejorar su eficiencia (Giacoman y Aguilar, 2006).

### **1.1 Objetivo General**

- Determinar los parámetros hidrodinámicos, (Tiempos De Residencia) de un pantano de flujo subsuperficial.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Medir la concentración específica de un trazador (NaCl)
- Determinar tiempos de residencia en las columnas de grava, carrizo y llanta triturada

### **1.3 Hipótesis**

- Los tiempos de residencia pueden ser obtenidos por medio de un trazador

## **II .REVISIÓN DE LITERATURA**

El agua ha sido, desde su formación un elemento indispensable para los seres vivos, fuente y sustento de vida, base del desarrollo de muchas actividades importantes para los seres humanos. A medida que la población ha ido en aumento, la demanda y el uso de este recurso se han vuelto desordenados e insostenibles. Aunque la cantidad de agua existente ha sido la misma desde su origen, el que sea destinado a múltiples actividades trae como consecuencia su contaminación con diversas sustancias lo que provoca la pérdida de sus propiedades que la hacían utilizable, a estas aguas se les denomina aguas residuales. Es por eso que la cantidad de agua disponible para consumo va en disminución.

### **2.1 Aguas Residuales**

Aguas residuales, son las aguas que desecha el ser humano una vez que estas han sufrido un cambio en su composición por la incorporación de de materias extrañas como microorganismos, residuos químicos, residuos industriales, entre otros (Pérez, 2013).

### **2.2 Tratamiento de aguas residuales**

Los procesos para el Tratamiento de aguas residuales se basan en la eliminación de los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales. En virtud de la diversidad de contaminantes que se pueden presentar en las aguas residuales, el número de procesos existentes es también muy amplio, no

obstante estos procesos se pueden agrupar de acuerdo al tipo de fenómeno o principio en el cual basan su operación (Varila y Díaz, 2008).

Para el tratamiento de las aguas residuales existen diversos procesos y operaciones unitarias, que con una adecuada selección y combinación, pueden resolver la mayoría de las necesidades de disposición final o reaprovechamiento de los vertimientos. En términos generales existen procesos físicos, químicos y biológicos. Los primeros hacen uso de las diferencias en ciertas propiedades entre el contaminante y el agua (sedimentación y flotación) o mediante la adición de reactivos empleados para variar la forma del contaminante buscando condiciones de separación del líquido (Pérez, 2013).

### **2.3 Clasificación de los usos del agua**

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se registran los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, a saber, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad, y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

En el periodo del 2001 al 2009, el 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). En el periodo

reportado, el agua superficial concesionada creció 15%, en tanto que la subterránea se incrementó en 21%.

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde al uso agrupado agrícola. En este caso, se está considerando principalmente el agua empleada para riego. Cabe destacar que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo.

En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas, que representan un uso no consuntivo del recurso, se utilizaron en el país 136.1 miles de millones de metros cúbicos de agua (km<sup>3</sup>) en el 2009. Debe aclararse que para este uso la misma agua se turбина y se contabiliza varias veces, en todas las centrales del país (CONAGUA, 2011).

#### **2.4 Humedales artificiales**

Actualmente, los pantanos construidos o humedales, como frecuentemente se les denomina en México, representan una tecnología emergente de bajo costo para tratar aguas residuales de origen municipal, industrial o agrícola. El pantano construido es un canal artificial, ligeramente inclinado, muy frecuentemente impermeabilizado para evitar la contaminación de mantos acuíferos y, en ciertas ocasiones, rellenos de grava, formando un substrato de filtración (Vidales *et al.*, 2004).

#### **2.5 Importancia de los humedales**

Los humedales figuran entre los ecosistemas más productivos de la tierra, y son fuentes de diversidad biológica, pues aportan el agua y la productividad primaria de la que innumerables especies vegetales y animales dependen para su supervivencia.

Además los humedales sustentan elevadas concentraciones de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces y especies invertebradas. De las veinte mil especies de peces que hay en el mundo, más del cuarenta por ciento vive en aguas dulces. Los humedales son asimismo importantes lugares de almacenamiento de material genético vegetal. El arroz, por ejemplo, una planta común de los humedales, es el alimento básico de más de la mitad de la humanidad (Cea, s/a).

## **2.6 Tipos de humedales artificiales**

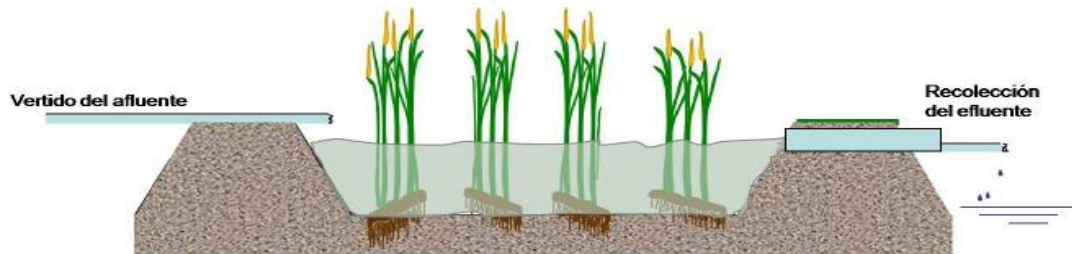
Atendiendo el tipo de circulación del agua, los humedales construidos se clasifican en flujo superficial o en flujo subsuperficial.

### **2.6.1 Humedales de flujo superficial**

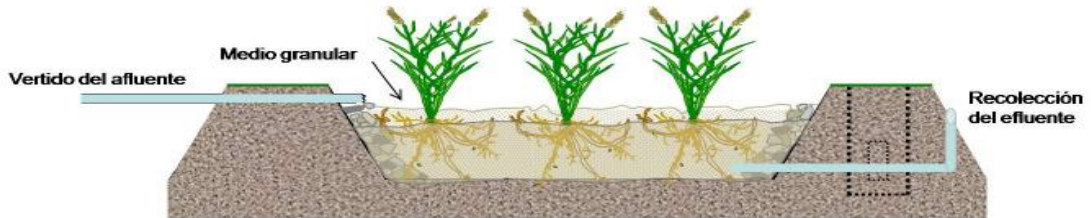
En los sistemas de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0.3 y 0.4 m, y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora.

### **2.6.2 Humedal de flujo subsuperficial**

En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0.3 y 0.9 m.



A.



B.

**Figura 1. Tipos de humedales construidos; A, con flujo superficial, y B, con flujo subsuperficial horizontal.**

Una de las características de este sistema es que su hidráulica es influenciada por el suelo, esto para su mejor operación del humedal el agua residual debe tener bajas relaciones de sólidos suspendidos y el flujo debe de estar bajo condiciones uniformes.

## **2.7 Partes de los Humedales de flujo subsuperficial**

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

### **2.7.1 Agua residual**

Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal.

## **2.7.2 Sustrato (medio granular)**

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con poros finos.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal.

La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.



### **2.7.3 Vegetación**

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

### **2.7.4 Microorganismos**

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los

microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes (Delgadillo, *et al.*, 2010).

## **2.8 Evaluación hidrodinámica de humedales de flujo subsuperficial**

Generalmente los humedales de flujo subsuperficial se diseñan, como reactores que siguen un modelo de flujo ideal (en pistón).

En realidad el comportamiento del flujo dentro del humedal es incierto, porque dentro de este se pueden generar zonas de estancamiento o de recirculación.

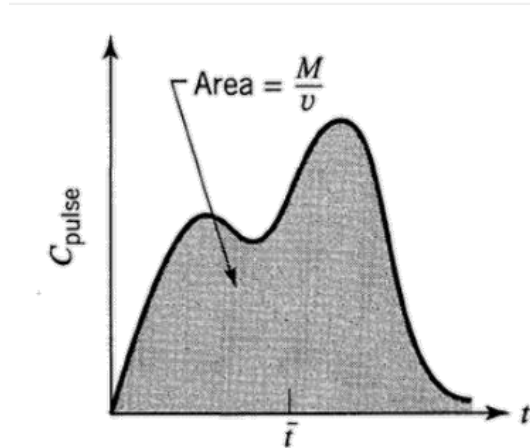
Cuando una sustancia inerte a reaccionar dentro del reactor, se introduce al proceso, esta sale con el tiempo de tal forma que se pueda dar un vistazo al comportamiento del flujo dentro del reactor, esto se conoce como evaluación hidrodinámica.

Los elementos dentro del fluido siguen diferentes caminos dentro del reactor, por lo tanto tienen tiempos distintos para pasar a lo largo de él, la distribución de estos tiempos de residencia del fluido, se conoce como distribución de la edad de la salida, comúnmente esta distribución se grafica y estas graficas se conocen como curvas DTR (Distribución de Tiempos de Residencia) (Hincapié, 2007).

La curva, se obtiene dependiendo de cómo es inyectada la sustancia inerte dentro del reactor.

### 2.8.1 Obtención de curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR)

Inicialmente se estimula el sistema con una sustancia inerte a él, esta sustancia se conoce como trazador, posteriormente se espera la respuesta del sistema al estímulo, los datos obtenidos son la concentración de la sustancia respecto al tiempo. Si esta relación se grafica se obtiene la curva C impulso (Figura 2).



**Figura 2. Curva C impulso (Hincapié, 2007).**

(Área bajo la curva)  
C impulso):  $A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum C_i \Delta t_i = \frac{M}{v} \quad \left[ \frac{kg \cdot s}{m^3} \right] \dots\dots\dots 1$

Donde

C: concentración del trazador en el tiempo

M: masa del trazador inyectada

V: flujo volumétrico de entrada al humedal

La curva E se crea multiplicando cada valor C impulso por v/M y graficando cada resultado contra el tiempo. El área bajo la curva E es igual 1.

$E = \frac{C_{pulse}}{M/v} \dots\dots\dots 2$

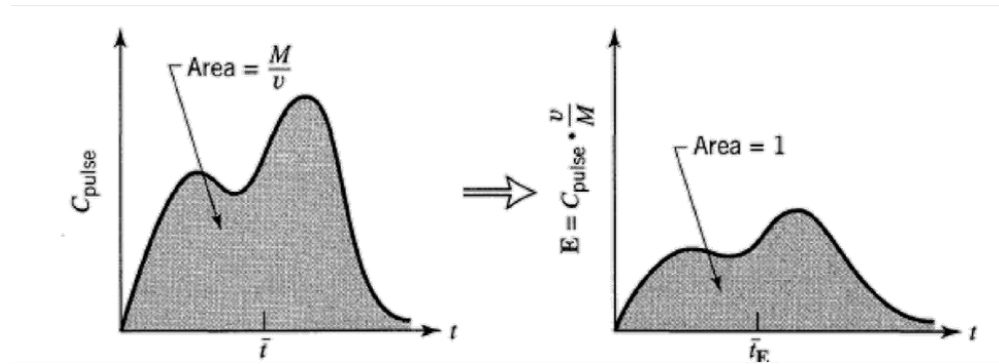


Figura 3. Transformación de la curva C en curva E (Hincapié, 2007).

Para realizar la comparación de la curva E obtenida del comportamiento del reactor real, con las curvas E de comportamientos de patrones de flujo ideal, esta se debe normalizar respecto al tiempo es decir:

$$E_{\theta} = \bar{t}E = \frac{V}{v} \cdot \frac{C_{pulse}}{M/v} = \frac{V}{M} C_{pulse} \dots \dots \dots 3$$

Donde

t: tiempo de retención hidráulica y se obtiene

$$\left( \begin{array}{l} \text{De la curva } C \\ \text{se obtiene} \end{array} \right): \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC dt}{\int_0^{\infty} C dt} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{v} \quad [s] \dots \dots \dots 4$$

Y E normalizada se grafica respecto al tiempo normalizado  $\theta$ :

$$\theta = t/\bar{t} \dots \dots \dots 5$$

Dependiendo del flujo dentro del reactor la curva E normalizada adoptará las siguientes formas:

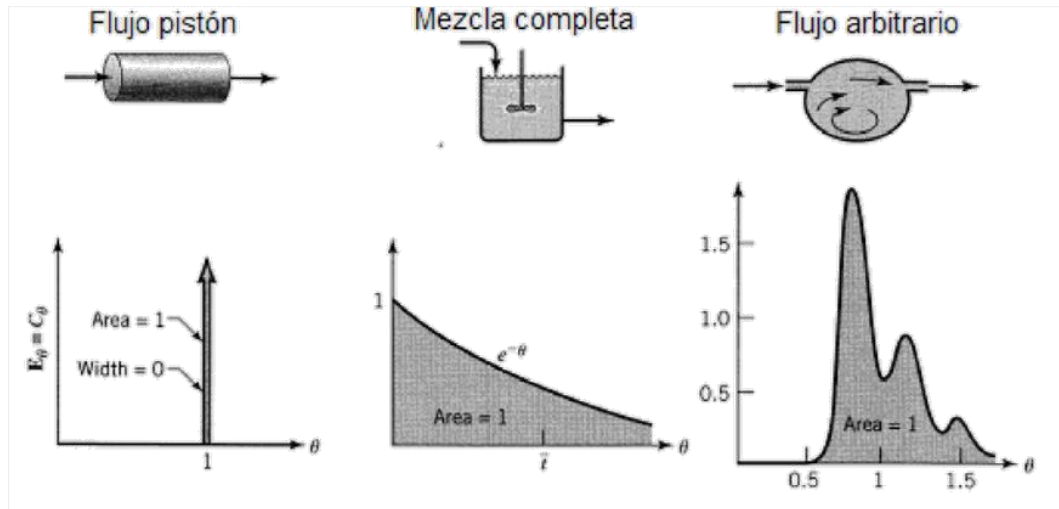


Figura 4. Curva E para varios patrones de flujo (Hincapié, 2007).

## 2.9 Curva de distribución de tiempos de residencia

Para determinar el comportamiento hidrodinámico de un sistema ó reactor, se debe conocer cuánto tiempo permanece cada una de las partículas o moléculas dentro del sistema, o más exactamente su Distribución de Tiempos de Residencia (DTR). La información de la DTR se determina de manera fácil y directa por métodos experimentales conocidos como estímulo-respuesta o estudios de dispersión utilizando trazadores. En estas prácticas, el sistema objeto de estudio es perturbado en algún instante de tiempo por la adición de un compuesto con una propiedad de fácil detección (color, absorción de luz, radioactividad, conductividad, entre otros), conservativo e inerte denominado trazador. La representación gráfica de la curva DTR, obtenida como respuesta del trazador, es un reflejo del comportamiento del flujo en el interior del reactor y representa el tiempo que las partículas de agua permanecen en el (Sabas, 2011).

## **2.10 Factores que afectan la eficiencia hidráulica y la hidrodinámica en los humedales construidos.**

Las zonas de mezcla reducida o nula en el interior de los humedales, conocidas como zonas muertas, influyen significativamente en bajas eficiencias hidráulicas. De la misma manera, los flujos preferenciales causan reducción del tiempo de retención real y por ende afectan la eficiencia hidráulica (Sabas, 2011).

## **2.11 Definición de trazador**

Puede definirse como trazador a toda sustancia que incorporada a un proceso físico o químico permite estudiar su comportamiento y evolución. Se tienen desde los más sencillos, como hojas de árboles, fragmentos de madera y paja, colorantes que se han utilizado para observar la dirección y la velocidad del agua hasta el empleo de trazadores químicos y radioactivos.

### **2.11.1 Trazadores**

Los trazadores más comunes en estudios hidrodinámicos por su fácil manejo y su bajo costo son los compuestos fluorescentes (Rodamina WT, fluorescencia) y las sales Na, Br, K y Li. Las sales tienden a incrementar la densidad del fluido en proporción a la sal disuelta, y si se aplican en altas concentraciones tienden a irse al fondo ocasionando menor recuperación del trazador. Las curvas DTR generadas a partir de esta información pueden presentar gran distorsión respecto al comportamiento real.

La selección de un trazador a utilizar en un estudio hidrodinámico depende en gran parte a las características del sistema, de los equipos de los que se dispone para la determinación de las concentraciones y por supuesto de la accesibilidad del trazador mismo en términos del costo y manejo. El trazador debe tener propiedades físicas similares a la de la mezcla de reacción debe ser

totalmente soluble en la mezcla. Además, no debe de absorberse en las paredes ni en otras superficies del reactor, así como en ninguna sustancia que contenga la mezcla (Font, 2014).

## **2.12 Conductividad eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. En general, las soluciones, bases y sales son buenas conductoras, pero la de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente. Se puede evaluar con ella el contenido de sólidos disueltos en forma rápida si se conoce el factor de conversión, el cual oscila, para agua potable, entre 0.55 y 0.09 (Alvaro, 2013).

## **2.13 CXTFIT**

CXTFIT 2.0 es un programa que estima los parámetros de transporte de solutos usando un método de optimización de parámetros por medio de mínimos cuadrados. El programa también puede ser usado para resolver el problema directo de la determinación de concentraciones como una función del tiempo y/o la posición.

El programa puede ser utilizado para estimar la velocidad del agua ( $v$ ), el coeficiente de dispersión ( $D$ ), el factor de retardo ( $R$ ), el coeficiente de degradación de primer orden ( $u$ ), y/o el coeficiente de producción de orden cero ( $r$ ) a partir de haber observado la distribución de las concentraciones en función del tiempo y/o distancia (Toride y Genuchten, 1995).

### III .MATERIALES Y MÉTODOS

La instalación del sistema de tratamiento se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila México, ubicada entre las coordenadas geográficas  $25^{\circ} 21'18''$  latitud Norte y  $101^{\circ} 25'$  longitud Oeste, con 1767 metros sobre el nivel del mar (msnm). El clima de la región es seco desértico. La temperatura media anual fluctúa entre  $11.28$  y  $15.29$  °C, siendo frecuente los frentes fríos en invierno. El sistema de tratamiento se encuentra ubicado a un extremo de la laguna de oxidación, entre prácticas de emprendedores y el jardín botánico (Figura 5).



**Figura 5. Localización del Sistema Natural de Tratamiento Sistema de tratamiento.**



### 3.1 Características del sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento consta de los siguientes elementos.

- 1) Se utilizaron tres tubos iguales con medidas de 1.5 m de largo y 0.1524 m de diámetro (Figura 6), con un volumen de  $0.0273 m^3$  de capacidad por cada tubo. Los cuales se conectaron mediante tubos de policloruro de vinilo (PVC) con un diámetro de 0.0254 m.
- 2) Se relleno cada tubo con material diferente, carrizo, llanta triturada (Figura 7) y grava (Figura 8), los tubos están conectados a una fuente de alimentación de agua proveniente de un tanque imhoff.



Figura 6. Sistema de tratamiento.



**Figura 7. Llanta triturada.**



**Figura 8. Grava con un tamaño de 2 a 3 cm.**

- 3) Se le colocó una llave de paso tipo globo (Figura 9) en la entrada de cada tubo para poder controlar el flujo de cada uno de ellos.



**Figura 9. Llave tipo globo.**

- 4) Se colocó una válvula (Figura 10) para facilitar la inyección de la solución salina (trazador) a los tubos.



**Figura 10. Válvula para realizar la inyección de la solución salina (trazador).**



5) El sistema de abastecimiento es un tanque imhoff (Figura 11) que se ubica aproximadamente a 80 m de distancia, son aguas provenientes del Laboratorio de Calidad de Semillas, y del Departamento de Producción las cuales son aguas residuales con una mínima cantidad de carga orgánica. La carga hidráulica es de 4 m a favor lo que permitirá un buen funcionamiento del sistema.

El tanque imhoff es una unidad de tratamiento primario que consta de las siguientes medidas 7.75 m de largo y 4.45 m de ancho. Es un sistema de tratamiento primario que utiliza la fuerza de gravedad para separar sólidos del agua residual en un proceso conocido como sedimentación primario (Guzmán, 2013).



**Figura 11. Tanque imhoff. (Pérez, 2013)**

### 3.2 Listado de Materiales

Para la construcción del humedal artificial fueron necesarios diferentes materiales como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Accesorios utilizados para la construcción del humedal.**

Descripción	Unidad	Cantidad
Válvula de globo 1"	PZA	5
Codo 1"	PZA	12
Adaptador macho 1"	PZA	6
Adaptador hembra 1"	PZA	5
Tubos de 6" x 1.5 m de largo	PZA	3
	M	10
Manguera polietileno 1"		
Grava	m <sup>3</sup>	1/2
Cinta teflón	PZA	1
Pegamento	LT	1
Tee. Rozca 1" x 1/2"	PZA	3
Cuartón de madera 55 x 55mm largo 3 m	PZA	5
Silicón industrial	PZA	5
Llanta triturada	kg	25
Carrizo	Kg	10

### **3.3. Funcionamiento del sistema**

Las aguas residuales que se tratan en los humedales son aguas provenientes del Laboratorio de Calidad de Semillas, y del Departamento de Producción. Las cuales se someten a un tratamiento secundario en un tanque imhoff, lo que permite una reducción de materia orgánica y sólidos suspendidos.

El agua que entra en los humedales fluye lentamente pasando por todo el sustrato para ser filtrada, reduce la cantidad de sólidos suspendidos.

#### **3.3.1 Propósito**

Un sistema de tratamiento de aguas residuales puede hacer las siguientes funciones:

- Proporcionar una manera sanitaria para desechar las aguas residuales.
- Previene los olores desagradables de las aguas grises estancadas.
- Previenen la contaminación de agua subterránea y superficial.

### **3.4 Obtención de datos en los humedales con la solución salina (trazador)**

Los datos para la realización de las graficas se obtuvieron de la siguiente manera:

- 1) Verificar que la manquera procedente del tanque imhoff no esté tapada y que tenga buen flujo de agua, ya que es la principal fuente de alimentación de los humedales.
- 2) Abrir la primera llave de paso que conecta a la manquera proveniente del tanque imhoff a la tubería de los humedales, y cerrar la llave de paso de los toneles, para evitar que el flujo de agua se vaya hacia los toneles.

- 3) Abrir la llave de paso de cada uno de los humedales (tubos) y dejar que se llenen por completo.
- 4) Verificar que no haya fugas en ninguno de los humedales.
- 5) Cerrar dos llaves de los humedales y dejar abierta solo una para regular el flujo de agua.
- 6) Regular el flujo de agua del humedal y calcular el gasto por lo menos 3 veces para asegurarse que sea el mismo.
- 7) Cerrar la llave de paso principal de los humedales (tubos), quitar el tapón de la válvula e inyectar la solución salina (trazador).
- 8) Una vez que se haya terminado de inyectar el trazador, colocar el tapón a la válvula y abrir la llave de paso.
- 9) Una vez que se abre la llave de paso empezar a medir el tiempo y conductividad eléctrica a la salida del humedal.
- 10) Este proceso se repite para los tres humedales (tubos).

### **3.5 Analisis de la curva de tendencia de concentracion del trazador.**

Ha sido practica comun establecer la eficiencia hidraulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentracion del trazador y relacionar sus diferentes parametros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida se obtiene una serie de valores de concentracion que aumenta con el tiempo hasta llegar a un maximo y luego disminuyen progresivamente, originando una curva tal como se muestra en la Figura 12 (Perez, 1992).

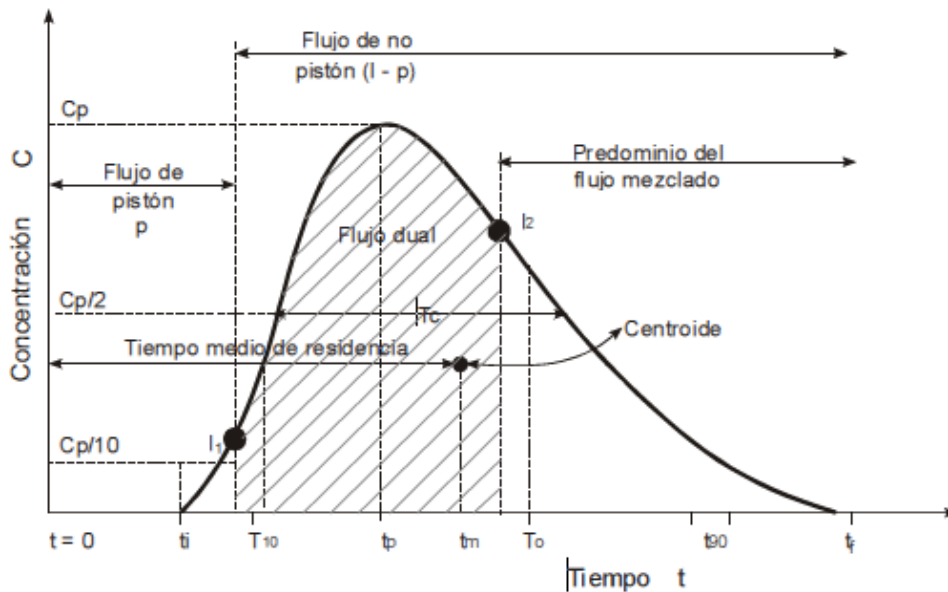


Figura 12. Concentración del trazador en el efluente de un reactor (Perez, 1992).

Existiendo los siguientes parámetros principales

$t_i$  = 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 medio, correspondiente al paso del 50% del total de trazador.

$T_o$  = tiempo medio teórico o de retención =  $V/Q$

$t_{90}$  = tiempo correspondiente al paso del 90% del 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 de la salida.

Para un análisis del comportamiento de los flujos de agua dentro de un reactor se pueden utilizar los siguientes criterios:



a)  $\frac{t_o}{t_i}$  Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado.

Si el valor de la relación es ( $< 0.3$ ), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).

b)  $\frac{t_m}{t_o}$  Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de  $t_m$ , haciendo  $t_m > t_o$ .

c)  $\frac{t_p}{t_o}$  Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado.

Cuando la relación  $t_p/t_o$  se aproxima a 1 y  $t_i/t_o > 0,5$ , se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.

d)  $\frac{t_c}{t_o}$  Está relacionado en general con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia). Es igual al cociente  $(\Delta t_o/t_o)$  (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y aproximadamente del orden de 0,7 para flujo mezclado.

e)  $\frac{t_b}{t_o}$  Está relacionado con las características de inercia turbulentas y de recirculación grande. Es igual al cociente  $\Delta t_o/t_o$  (razón de tiempo de

inyección) para el flujo estable ideal y del orden de 2,3 para flujo mezclado ideal.

- f)  $e = \frac{((t_f - t_p) - (t_p - t_i))}{t_0}$  Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.

## IV RESULTADOS

En agosto del 2015 se realizaron las pruebas para obtener las concentraciones del trazador, se utilizaron 60 g de NaCl en 200 ml de agua destilada obteniendo una solución de 300 g por litro de NaCl.

En los Cuadros 2, al 7 se muestran las concentraciones de NaCl (sal común) en g L<sup>-1</sup> contra el tiempo. La concentración ajustada es la obtenida de las pruebas realizadas con el trazador, la concentración simulada es la concentración obtenida con el programa CXTFIT.

Al final de cada cuadro se muestra el coeficiente de determinación, el modelo utilizado es el siguiente.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

Donde,

SSR representa la suma de cuadrados debido a la regresión y

SST representa la suma de cuadrados del total.

**Cuadro 2. Concentraciones en la prueba 1 con llanta triturada.**

Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	47	0,544	0,6365
5	0,214	0,5256	48	0,520	0,6283
10	0,495	0,9048	49	0,489	0,6201
15	1,009	0,9553	50	0,477	0,6122
20	0,960	0,9204	51	0,440	0,6044
22	0,917	0,8991	52	0,428	0,5968
23	0,923	0,8877	53	0,397	0,5893
24	0,935	0,8761	54	0,373	0,5820
25	0,954	0,8644	55	0,348	0,5748
26	0,978	0,8526	56	0,330	0,5678
27	1,027	0,8408	57	0,306	0,5609

28	1,082	0,8291	58	0,293	0,5541
29	1,088	0,8174	59	0,275	0,5475
30	1,094	0,8058	60	0,263	0,5410
31	1,094	0,7944	65	0,196	0,5103
32	1,070	0,7831	70	0,147	0,4824
33	1,045	0,7720	75	0,116	0,4568
34	1,003	0,7611	80	0,079	0,4334
35	0,978	0,7504	85	0,067	0,4119
36	0,935	0,7398	90	0,061	0,3921
37	0,905	0,7294	95	0,049	0,3737
38	0,880	0,7193	100	0,043	0,3567
39	0,844	0,7093	105	0,037	0,3408
40	0,807	0,6996	110	0,018	0,3260
41	0,770	0,6900	115	0,024	0,3122
42	0,715	0,6806	120	0,018	0,2993
43	0,666	0,6714	125	0,006	0,2872
44	0,648	0,6624	130	0,000	0,2758
45	0,605	0,6536	135	-0,018	0,2651
46	0,575	0,6450	140	-0,024	0,2550

$r^2 = 0.63$

**Cuadro 3 Concentraciones en la prueba 2 con llanta triturada.**

Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	45	0,501	0,5246
5	0	0,0013	46	0,495	0,5129
10	0,287	0,0972	47	0,477	0,5012
15	0,569	0,3250	48	0,471	0,4894
20	0,550	0,5160	49	0,446	0,4777
22	0,556	0,5668	50	0,428	0,4660
23	0,562	0,5868	51	0,403	0,4543
24	0,581	0,6033	52	0,403	0,4428
25	0,587	0,6167	53	0,385	0,4314
26	0,611	0,6271	54	0,361	0,4201
27	0,636	0,6348	55	0,348	0,4090
28	0,654	0,6400	56	0,336	0,3980
29	0,813	0,6429	57	0,324	0,3872
30	0,385	0,6438	58	0,312	0,3766
31	0,666	0,6429	59	0,300	0,3662
32	0,666	0,6403	60	0,300	0,3560
33	0,666	0,6363	65	0,232	0,3081
34	0,660	0,6310	70	0,208	0,2656
35	0,654	0,6246	75	0,171	0,2282
36	0,648	0,6172	80	0,141	0,1958

37	0,617	0,6089	85	0,122	0,1677
38	0,611	0,5999	90	0,110	0,1435
39	0,605	0,5903	95	0,098	0,1227
40	0,587	0,5802	100	0,086	0,1049
41	0,581	0,5697	105	0,073	0,0896
42	0,556	0,5588	110	0,073	0,0766
43	0,538	0,5476	115	0,061	0,0655
44	0,520	0,5362	120	-0,031	0,0560

$r^2 = 0.93$

**Cuadro 4 Concentraciones en la prueba 1 con grava.**

Tiempo min	concentración Ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min	concentración Ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	49	2,152	22,765
5	0,012	0,0082	50	2,109	22,199
10	0,000	0,5703	51	2,066	21,639
15	0,434	17,603	52	2,017	21,084
20	2,665	26,608	53	1,981	20,537
22	3,173	28,823	54	1,932	19,998
23	3,307	29,657	55	1,883	19,467
24	3,417	30,324	56	1,840	18,945
25	3,454	30,838	57	1,803	18,432
26	3,472	31,212	58	1,761	17,929
27	3,448	31,460	59	1,724	17,436
28	3,393	31,593	60	1,687	16,953
29	3,356	31,624	65	1,498	14,695
30	3,283	31,563	70	1,339	12,696
31	3,228	31,422	75	1,186	10,945
32	3,154	31,210	80	1,051	0,9421
33	3,063	30,935	85	0,911	0,8102
34	3,001	30,606	90	0,819	0,6964
35	2,922	30,229	95	0,746	0,5984
36	2,830	29,813	100	0,666	0,5141
37	2,781	29,362	105	0,575	0,4417
38	2,714	28,882	110	0,526	0,3796
39	2,653	28,377	115	0,471	0,3263
40	2,592	27,853	120	0,416	0,2806
41	2,500	27,313	125	0,355	0,2414
42	2,433	26,761	130	0,336	0,2077
43	2,402	26,200	135	0,293	0,1789
44	2,390	25,631	140	0,269	0,1541
45	2,311	25,058	145	0,238	0,1328

46	2,274	24,484	150	0,220	0,1145
47	2,188	23,909	155	0,190	0,0987
48	2,201	23,336	160	0,196	0,0852
			165	0,177	0,0736

$r^2 = 0.95$

**Cuadro 5 Concentraciones en la prueba 2 con grava.**

Tiempo min	concentración Ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min.	concentración Ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	46	0,22	11,781
5	0,073	0,9669	47	0,196	11,009
10	0,086	56,201	48	0,202	10,287
15	5,765	68,008	49	0,165	0,9613
20	4,982	59,125	50	0,171	0,8982
22	4,028	53,888	51	0,159	0,8393
23	3,674	51,206	52	0,159	0,7843
24	3,295	48,537	53	0,141	0,7329
25	2,885	45,911	54	0,141	0,6848
26	2,665	43,350	55	0,141	0,6400
27	11,223	40,868	56	0,134	0,5981
28	6,914	38,479	57	0,122	0,5589
29	3,888	36,188	58	0,073	0,5224
30	2,280	34,000	59	0,122	0,4883
31	1,583	31,918	60	0,122	0,4564
32	1,088	29,942	65	0,092	0,3259
33	0,813	28,071	70	0,079	0,2332
34	0,703	26,303	75	0,092	0,1671
35	0,575	24,634	80	0,055	0,1200
36	0,477	23,062	85	0,043	0,0863
37	0,410	21,584	90	0,037	0,0622
38	0,379	20,194	95	0,024	0,0449
39	0,330	18,888	100	0,000	0,0325
40	0,300	17,664	105	0,012	0,0236
41	0,269	16,516	110	0,012	0,0171
42	0,251	15,440	115	0,012	0,0125
43	0,232	14,432	120	0,006	0,0091
44	0,232	13,489	125	0,012	0,0065
45	0,220	12,607	130	0,006	47,000

$r^2 = 0.38$

**Cuadro 6 Concentraciones en la prueba 1 con carrizo.**

Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	47	0,067	0,1163
5	0,067	0,3112	48	0,067	0,1151
10	1,204	0,2484	49	0,067	0,1139
15	0,465	0,2049	50	0,055	0,1127
20	0,263	0,1780	51	0,061	0,1116
22	0,202	0,1698	52	0,067	0,1105
23	0,183	0,1661	53	0,061	0,1095
24	0,171	0,1627	54	0,067	0,1084
25	0,165	0,1594	55	0,061	0,1074
26	0,153	0,1563	56	0,061	0,1065
27	0,141	0,1534	57	0,061	0,1055
28	0,141	0,1507	58	0,067	0,1046
29	0,134	0,1481	59	0,055	0,1037
30	0,122	0,1456	60	0,055	0,1028
31	0,122	0,1432	65	0,055	0,0988
32	0,110	0,1410	70	0,043	0,0951
33	0,110	0,1388	75	0,043	0,0919
34	0,098	0,1368	80	0,037	0,0889
35	0,092	0,1348	85	0,024	0,0863
36	0,086	0,1329	90	0,037	0,0838
37	0,079	0,1311	95	0,031	0,0815
38	0,073	0,1294	100	0,037	0,0794
39	0,079	0,1277	105	0,024	0,0775
40	0,067	0,1261	110	0,012	0,0757
41	0,067	0,1245	115	0,018	0,0740
42	0,073	0,1230	120	0,012	0,0724
43	0,067	0,1216	125	0,006	0,0709
44	0,067	0,1202	130	0,000	0,0695
45	0,073	0,1188	135	0,012	0,0682
46	0,073	0,1175	140	0,037	0,0670

$r^2 = 0.24$

**Cuadro 7 Concentraciones en la prueba 2 con carrizo**

Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>	Tiempo min.	concentración ajustada g L <sup>-1</sup>	concentración simulada g L <sup>-1</sup>
0	0	0	43	0,079	0,1307
5	0	0,2583	44	0,079	0,1293
10	1,113	0,2478	45	0,067	0,1279
15	0,416	0,2120	46	0,073	0,1265
20	0,251	0,1870	47	0,073	0,1252
22	0,208	0,1791	48	0,073	0,1239
23	0,177	0,1756	49	0,079	0,1227
24	0,159	0,1722	50	0,086	0,1215
25	0,147	0,1690	51	0,079	0,1203
26	0,134	0,1659	52	0,086	0,1192
27	0,134	0,1630	53	0,110	0,1181
28	0,116	0,1603	54	0,116	0,1170
29	0,110	0,1577	55	0,116	0,1160
30	0,104	0,1552	56	0,134	0,1150
31	0,024	0,1528	57	0,128	0,1140
32	-0,037	0,1505	58	0,134	0,1130
33	0,086	0,1484	59	0,141	0,1121
34	0,073	0,1463	60	0,141	0,1112
35	0,079	0,1443	65	0,110	0,1069
36	0,073	0,1423	70	0,079	0,1031
37	0,086	0,1405	75	0,086	0,0996
38	0,079	0,1387	80	0,128	0,0965
39	0,079	0,1370	85	0,159	0,0936
40	0,079	0,1353	90	0,134	0,0910
41	0,073	0,1337	95	0,092	0,0886
42	0,086	0,1322	100	0,086	0,0864
			105	0,079	0,0843

$r^2 = 0.17$



#### 4.1 Distribución de tiempos de residencia

Los datos mencionados en los cuadros anteriores, son mostrados en las Figuras 13, a la 18.

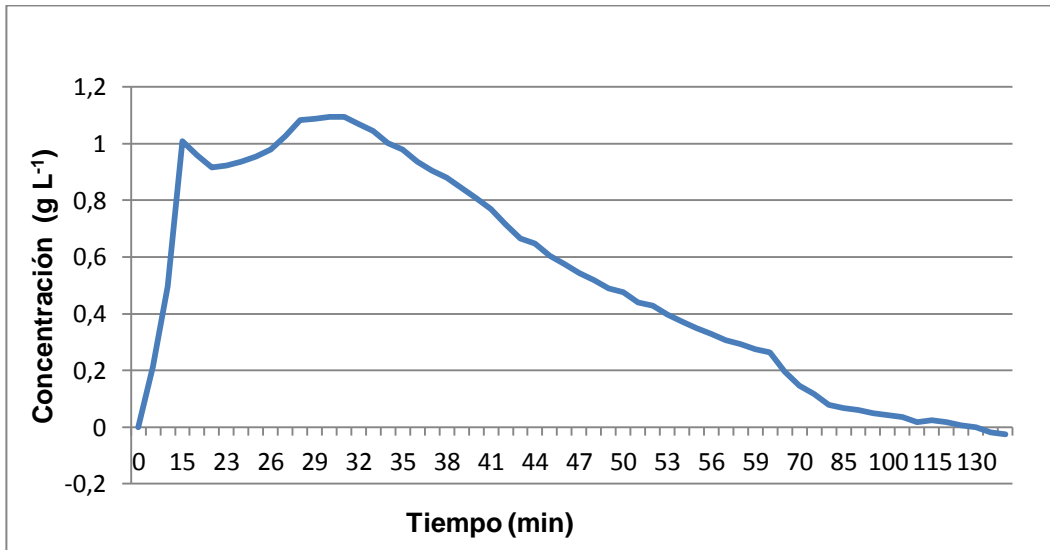


Figura 13. Distribución de Tiempos de Residencia para Llantia prueba 1.

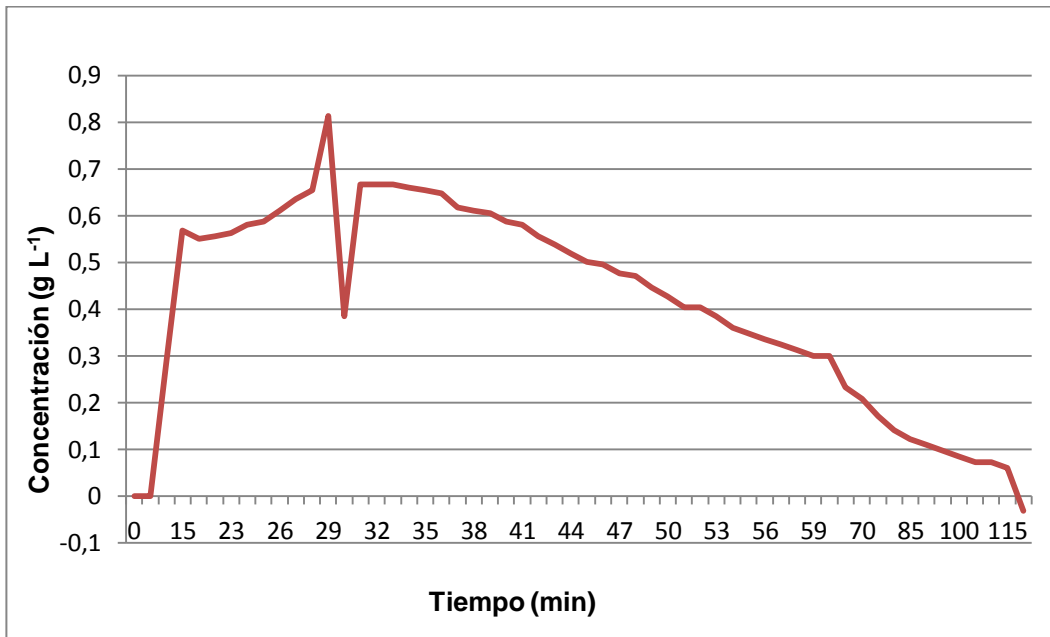


Figura 14. Distribución de Tiempos de Residencia para Llantia prueba 2.

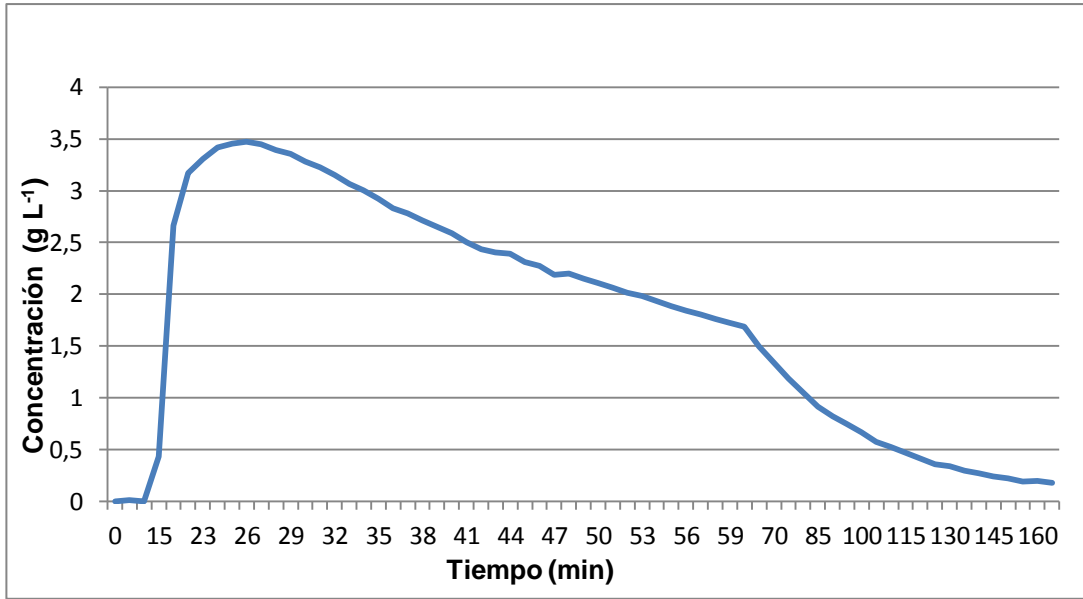


Figura 15. Distribución de Tiempos de Residencia para Grava prueba 1.

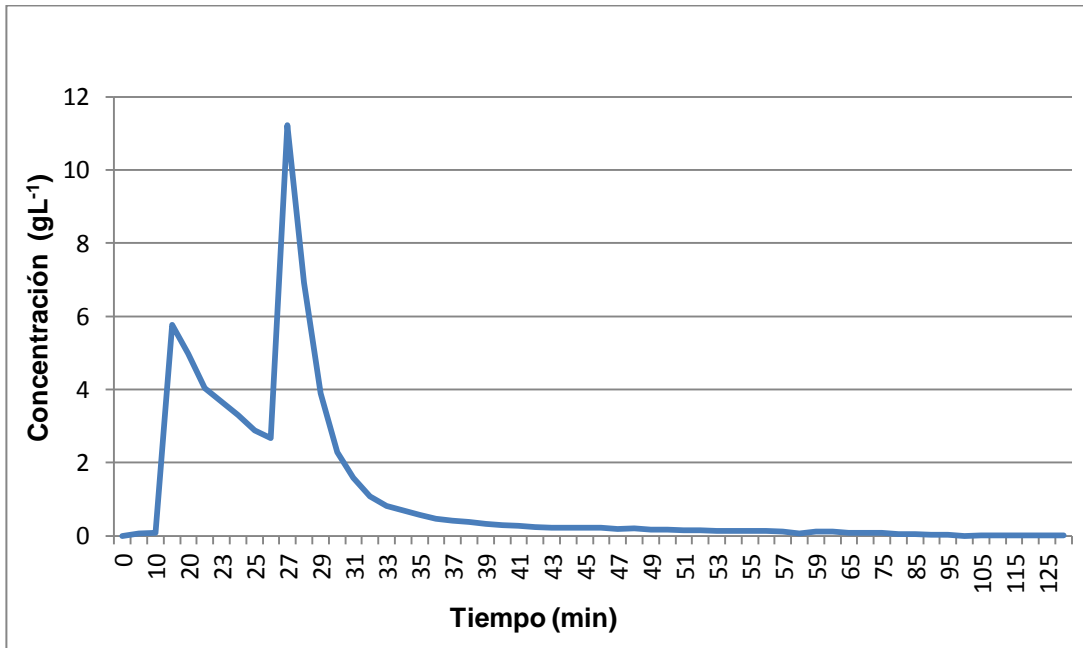


Figura 16. Distribución de Tiempos de Residencia para Grava prueba 2.

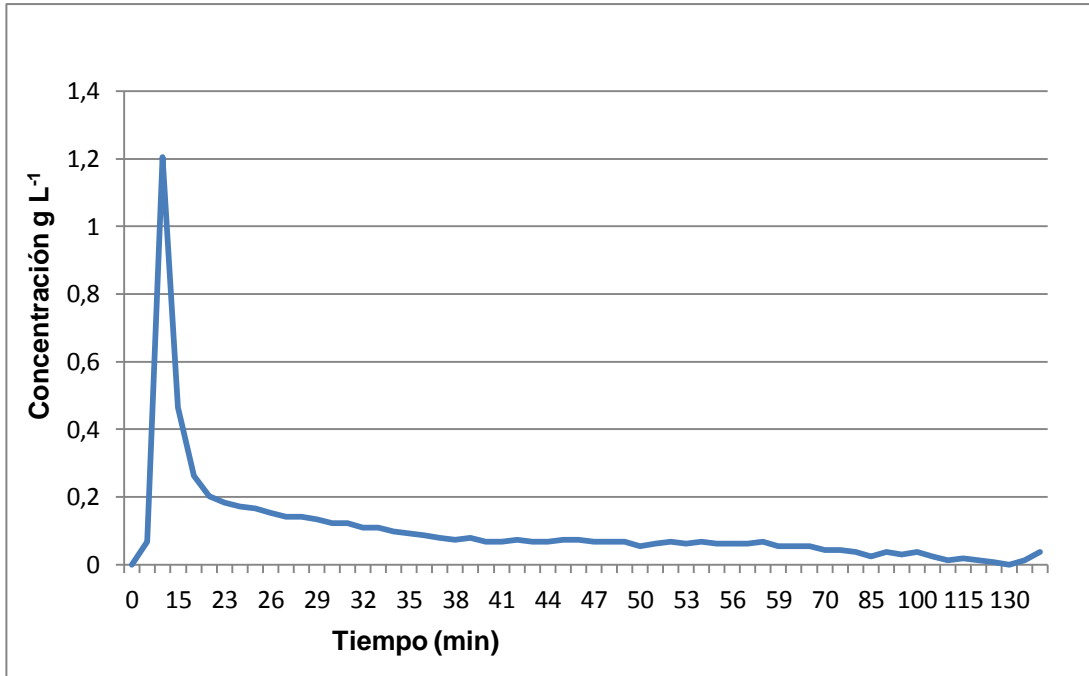


Figura 17. Distribución de Tiempos de Residencia para Carrizo prueba 1.

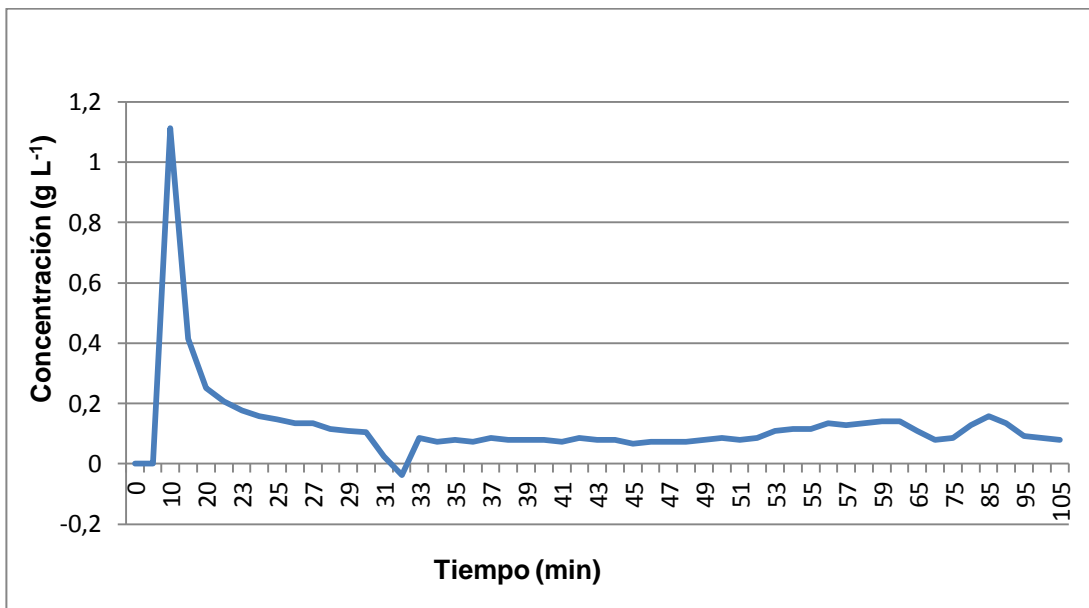


Figura 18. Distribución de Tiempos de Residencia para Carrizo prueba 2.

Con los tiempos y concentraciones medidas al final de cada tratamiento, se calcularon los parámetros mencionados por Pérez (1992), los que describen el comportamiento del flujo de agua dentro del humedal y son mostrados en el Cuadro 8 y 9. El análisis de los parámetros se muestra en los Cuadros 10, al 12.

**Cuadro 8. Análisis de las curvas de concentración.**

Parámetros	ti (min)	t10 (min)	tp (min)	tm (min)	To (min)	t90 (min)	tf (min)	Co (g L <sup>-1</sup> )	Cp (g L <sup>-1</sup> )
Grava 1	5,00	21,58	26,00	46,00	34,19	104,56	165,00	0,012	3,472
Grava 2	5,00	12,00	27,00	20,50	35,68	31,00	130,00	0,073	11,223
Llanta 1	5,00	10,52	31,00	30,00	30,07	59,00	140,00	0,459	1,094
Llanta 2	5,00	13,60	29,00	37,00	30,07	78,50	120,00	0,000	0,813
Carrizo 1	5,00	6,00	10,00	13,50	34,00	71,27	140,00	0,067	1,204
Carrizo 2	5,00	7,00	10,00	20,00	34,00	86,35	105,00	0,000	1,113

**Cuadro 9. Resultados obtenidos para el análisis de curvas.**

Sustratos	to/ti	tm/to	tp/to
GRAVA 1	6,838	1,316	0,760
GRAVA 2	7,136	0,575	0,757
LLANTA 1	6,014	0,998	1,031
LLANTA 2	6,014	1,230	0,964
CARRIZO 1	6,800	0,397	0,294
CARRIZO 2	6,800	0,588	0,294

**Cuadro 10. Análisis de To/ti de cada una de las columnas.**

Parámetro	Prueba y material	Significado
To/ti	Grava 1	Flujo pistón
To/ti	Grava 2	Flujo pistón
To/ti	Llanta 1	Flujo pistón
To/ti	Llanta 2	Flujo pistón
To/ti	Carrizo 1	Flujo pistón
To/ti	Carrizo 2	Flujo pistón

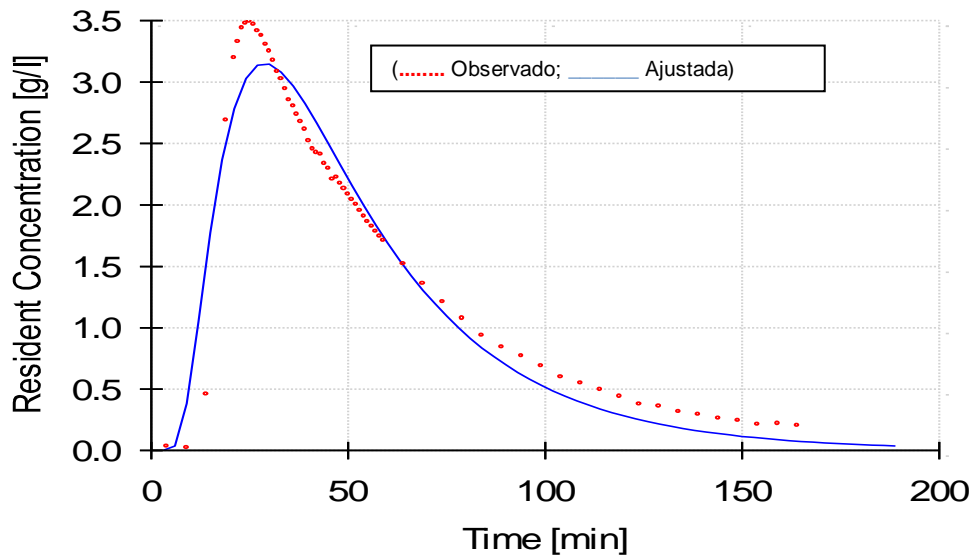
**Cuadro 11. Análisis de tm/ti de cada una de las columnas.**

Parámetro	Prueba y material	Significado
tm/to	Grava 1	Zonas muertas
tm/to	Grava 2	Cortos circuitos hidráulicos
tm/to	Llanta 1	Cortos circuitos hidráulicos
tm/to	Llanta 2	Zonas muertas
tm/to	Carrizo 1	Cortos circuitos hidráulicos
tm/to	Carrizo 2	Cortos circuitos hidráulicos

**Cuadro 12. Análisis de tp/ti de cada una de las columnas.**

Parámetro	Prueba y material	Significado
tp/to	Grava 1	Flujo pistón
tp/to	Grava 2	Flujo pistón
tp/to	Llanta 1	Flujo pistón
tp/to	Llanta 2	Flujo pistón
tp/to	Carrizo 1	Flujo mezclado
tp/to	Carrizo 2	Flujo mezclado

Los datos obtenidos de las pruebas, fueron simulados utilizando el programa CXTFIT, del paquete STANDMOD, para obtener los parámetros de transporte (Figuras 19 a 24).



**Figura 19. Curva ajustada con el programa CXTFIT, grava prueba 1.**

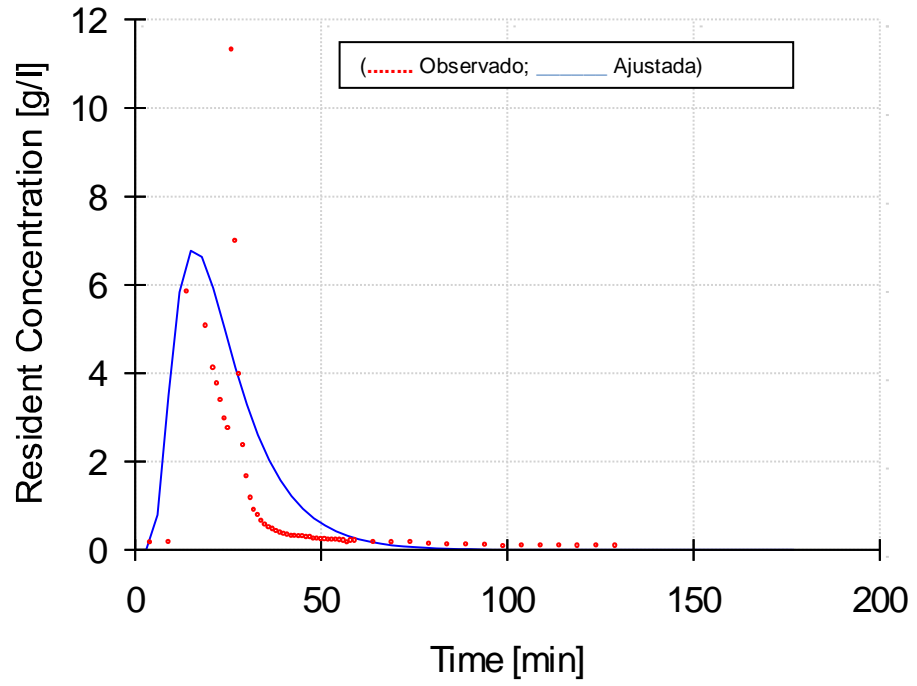


Figura 20. Curva ajustada con los parámetros de transporte, grava prueba 2.

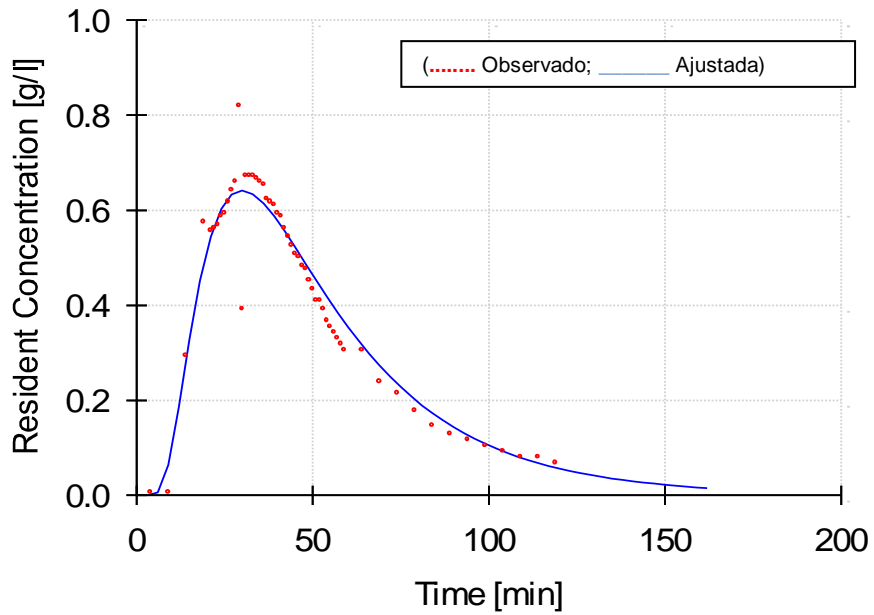
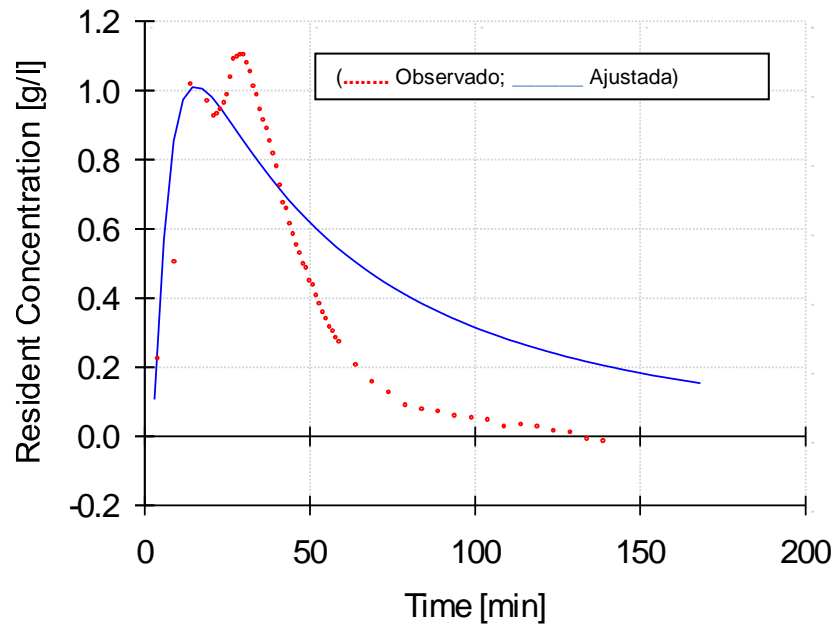
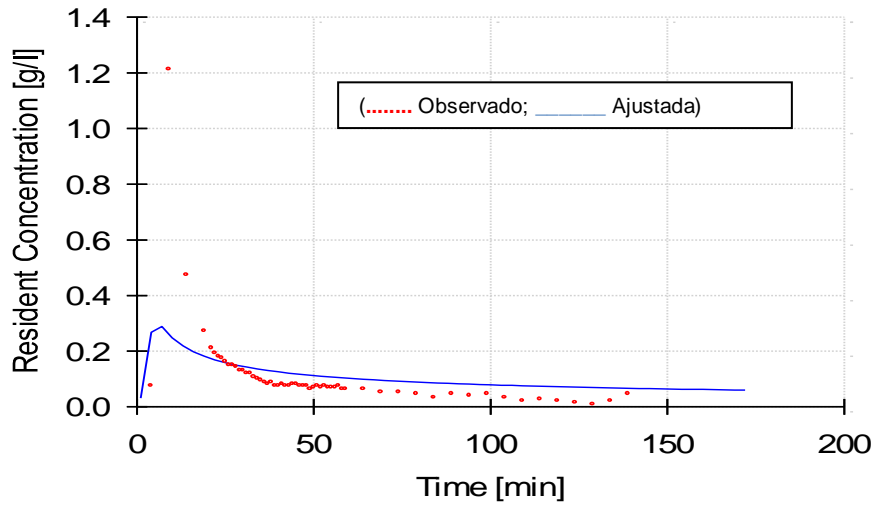


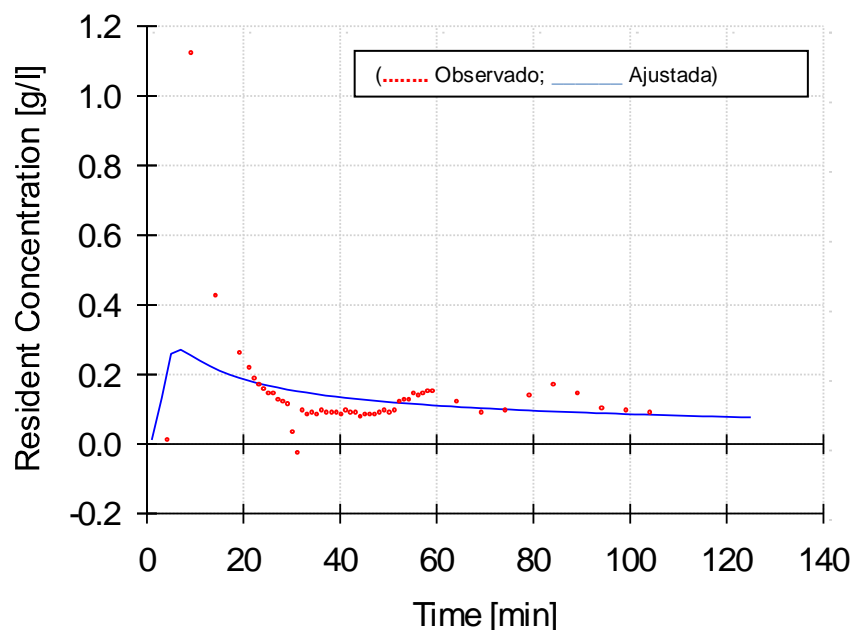
Figura 21. Curva ajustada con el programa CXTFIT, llanta prueba 1.



**Figura 22. Curva ajustada con el programa CXTFIT, llanta prueba 2.**



**Figura 23. Curva ajustada con el programa CXTFIT, llanta prueba 2.**



**Figura 24. Curva ajustada con el programa CXTFIT, carrizo prueba 1.**

El resultado de la ejecución del programa CXTFIT, es la velocidad convectiva, la cual es aquella que considera únicamente el espacio poroso. La velocidad calculada, es la que considera el área total del filtro y la velocidad estimada, que es la calculada con el gasto y el área real por donde circula el agua, y así calcular los TDR de cada velocidad como se muestra en el Cuadro 13.

**Cuadro 13. Velocidades y TDR.**

Material y prueba	Vel. Convectiva (cm/min)	TDR (min)	Vel. Calculada (cm/min)	TDR (min)	Vel. Estimada (cm/min)	TDR (min)
Grava 1	3,533	42,450	1,973	76,140	4,380	34,240
Grava 2	4,386	34,190	1,970	76,140	7,400	20,270
Carrizo 1	0,127	1180,170	2,960	50,670	4,410	34,013
Carrizo 2	0,072	2074,680	3,190	47,020	4,760	31,512
Llanta 1	2,266	66,190	3,026	49,570	4,960	30,240
Llanta 2	3,448	43,500	3,026	49,570	4,961	30,230



Se determinó el tiempo de residencia teórico ( $T_o$ ), aplicando cloruro de sodio como sustancia trazadora en el sistema de tratamiento de aguas residuales para cada una de las columnas, y se calculó el tiempo de residencia real ( $T_r$ ) con el programa CXTFIT (Cuadro 14).

**Cuadro 14. Comparación de  $T_o$  y  $T_r$ .**

Material	$T_o$ min.	$T_r$ min.
Grava prueba 1	34,19	42,45
Grava prueba 2	35,68	20,24
Llanta prueba 1	30,07	43,5
Llanta prueba 2	30,07	66,0
Carrizo prueba 1	34,00	11,8
Carrizo prueba 2	34,00	20,74

Las diferencias encontradas entre el tiempo teórico de residencia ( $T_o$ ) y el tiempo real ( $T_r$ ) se deben principalmente al cambio en el área convectiva de flujo. Ya que al aumentar esta última, el flujo se hace más lento y por consiguiente la velocidad también.

Por otro lado el taponamiento del espacio poroso, hace que la velocidad convectiva aumente, así como la pérdida de energía dentro del sistema, y la combinación de estos factores hace que en general la velocidad del sistema disminuya.

## V CONCLUSIONES

Como conclusión, se lograron cumplir los objetivos mencionados al inicio de este trabajo. Se determinó la concentración específica del trazador en cada una de las columnas, con lo cual se pudo determinar el tiempo de residencia de los humedales.

Los tiempos de residencia si pueden ser determinados por medio de trazadores. En el Cuadro 13, se muestran diferentes velocidades, velocidad convectiva, velocidad calculada y velocidad estimada, con las cuales se calcularon los Tiempos de Residencia comprobando la hipótesis mencionada al inicio del trabajo. La velocidad calculada es menor que la velocidad estimada y la velocidad convectiva porque se utilizó el área total de las columnas para calcular esa velocidad, al calcular la velocidad estimada se utilizó el área real de la columna tomando en cuenta la porosidad del material (sustrato). Y la velocidad convectiva es la velocidad obtenida con el programa CXTFIT.

Al observar el cuadro 10 y comparar los tiempos de residencia reales de la prueba 1 y la prueba 2 de grava, se puede apreciar una gran diferencia de tiempos, este comportamiento pudo haber sido causa de los diferentes gastos de agua utilizados en las 2 pruebas, el gasto de agua que se utilizó en la prueba 2 fue más pequeño, aunque la diferencia de gastos era muy poca provocó que el trazador no se distribuyera debidamente en la columna de grava, pasando solamente por una parte de la columna y quedándose poco tiempo dentro de ella.

Al analizar los parámetros de flujo mencionados por Pérez (1992),

nos indican que las columnas de grava, llanta y carrizo tienen un comportamiento de flujo tipo pistón, y se observaron zonas muertas en la prueba 1 de la grava y la prueba 2 de la llanta.

En la prueba 1 de la grava se observaron cortos circuitos hidráulicos al igual que en las dos pruebas del carrizo y en la prueba 1 de la llanta.

Lo que causó que en el sistema hubiera zonas muertas, fue el diseño del humedal porque solo tiene un punto de entrada de agua y un punto de salida, el cual está situado en el centro del diámetro del tubo, lo que provocó que el agua se quedara estancada en el interior del humedal.

## VI LITERATURA CITADA

- Álvaro A., L.Y., 2013. Eficiencia de un Sistema Natural de Tratamiento para la Remoción de Materia Orgánica. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo México.
- Cea B., J Cabezas., L Zamora., L Hidalgo de Quintanilla, s/a, Humedales y Medio Ambiente. En línea [http://www.csj.gob.sv/ambiente/images/HUMEDALES\\_Y\\_MEDIO\\_AMBIENTE.pdf](http://www.csj.gob.sv/ambiente/images/HUMEDALES_Y_MEDIO_AMBIENTE.pdf) (9, Septiembre, 2015).
- CONAGUA, 2008. Estadísticas del Agua en México, 1a. edición 2008., Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 53-64. México.
- CONAGUA, 2011. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. Capitulo 3, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 44-56. México.
- Delgadillo O., A. Camacho., L.F. Pérez., M. Andrade., 2010. Depuración de Aguas Residuales por Medio de Humedales Artificiales. Serie técnica, Edición Nelson Antequera Durán, Bolivia.
- Font-Vicent, E., 2014. Estudio del Comportamiento Hidrodinámico de un Reactor Biológico con Sistema de Aireación Superficial con Turbinas de eje Vertical. Proyecto final de Maestría, Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales.
- García, F.D., E. Solarte., J.J. Sandoval., A. Toro., D. Ascuntar., M. Peña., 2011, Caracterización de Humedales Artificiales por Fluorescencia Inducida por Laser, Facultad de Ciencias Básicas, 9(1), 77-82.
- Giacoman, L. I. Rejón, S. R Aguilar. 2006. Evaluación de las características hidráulicas de un reactor de lecho fluidificado para el tratamiento aerobio de las aguas residuales. Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y científica ambiental.
- Guzmán M. S., 2013. Eficiencia de Remoción de Carga Orgánica en un Sistema Natural de Tratamiento. Elevado por DQO. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo México.

- Hincapié M., D. L., 2007. Cinética e Hidrodinámica Aplicadas, en Condiciones Ambientales Locales, a Humedales de Flujo Subsuperficial a Escala Piloto. Tesis, Requisito para optar al título de químico industrial. Facultad de tecnología programa de química industrial, Pereira.
- Pérez C. J. M. 1992. Análisis de Flujos y Factores que Determinan los Periodos de Retención. Manual de evaluación capítulo 2. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- Pérez E. H., 2013. Diseño y Construcción de un Pantano de Flujo Vertical a Escala Piloto. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad autónoma agraria Antonio narro.
- Pérez E. H., 2013. Diseño y Construcción de un Pantano de Flujo Vertical a Escala Piloto. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad autónoma agraria Antonio narro.
- Peña-Guzmán, C. A. 2012. Tratamiento de Aguas de Escorrentía Mediante Humedales Artificiales. Ciencia e ingeniería Neogranadia, 22(2), 39-61.
- Romero, A. M., A, Colín Cruz., E, Sánchez Salinas y M, L, Ortiz Hernández., 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales. Contam. Ambient. 25(3).
- Sabas R. C.A., 2011. Evaluación Hidrodinámica de Humedales Construidos a Escala de Laboratorio. Tesis para obtener el título de, Maestría en Ecotecnología. Universidad tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias ambientales.
- Toride, F., Leij, and M. Th. Genuchten, 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments. Research Report No. 137
- Vidales-Contreras, J.A., C.B. Chaidez-Quiroz., K. Acuña ASKAR., H. Ibarra-Gil., H. Rodríguez-Fuentes., G. Martínez-Turanzas., 2004. Pantanos Construidos para Tratamientos de Aguas Residuales. Ciencia UANL. 7(3), 379-384.
- Vidales-Contreras, J.A., C.B. Chaidez-Quiroz., K. Acuña ASKAR., H. Ibarra-Gil., H. Rodríguez-Fuentes., G. Martínez-Turanzas., 2004. Pantanos Construidos para Tratamientos de Aguas Residuales. Ciencia UANL. 7(3), 379-384.

Varila J. A., F.E. Díaz, 2008. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activos a escala laboratorio. *Journal of Technology*, Volumen 7(2), 21-28.