

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL A ESCALA PILOTO**

POR:

JOB RODRÍGUEZ HERRERA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

BUENAVISTA, SALTILLO COAHUILA, MÉXICO, DICIEMBRE DEL 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA
CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL A ESCALA PILOTO

POR:

JOB RODRÍGUEZ HERRERA

TESIS

QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE
ASESORIA Y APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE:

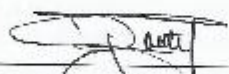
INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

COMITÉ PARTICULAR:



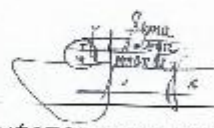
DR. LUIS SAMANIEGO MORENO

ASESOR PRINCIPAL



DR. JAVIER DE JESÚS CORTÉS
BRACHO

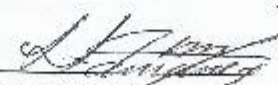
ASESOR



MC. HÉCTOR URIEL SERNA
FERNÁNDEZ

ASESOR

Universidad Agraria
"ANTONIO NARRO"



DR. LUIS SAMANIEGO MORENO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Coordinación de
Ingeniería

BUENAVISTA, SALTILLO COAHUILA, DICIEMBRE DEL 2015

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
RESUMEN	xii
I. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos:	2
1.2 Hipótesis:	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.	5
2.1.1 Tratamiento de aguas residuales en México.	7
2.1.2 Tratamiento de aguas residuales municipales	8
2.2 Núcleos de población.	10
2.3 Principales usos del agua en México.	10
2.4 Tipos de humedales artificiales.	11
2.4.1 Humedal artificial de flujo superficial.	13
2.4.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (FSS).	13
2.4.3. Ventajas de los humedales artificiales.	14
2.4.4. Desventajas de los humedales artificiales.	15
2.5 Eficiencia de remoción en los sistemas naturales de tratamiento.	15
2.6 Procesos de depuración.	16
2.6.1 Mecanismos de remoción.	16
2.7 Componentes del humedal de flujo subsuperficial.	18
2.8 Posibles usos del agua tratada.	20
2.9 Aforo químico.	20
2.10 QTRACER2.	22
III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Localización del sitio.	24
3.2 Descripción del sistema natural de tratamiento.	25

3.3 Construcción del sistema de tratamiento.	29
3.4 Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador.	33
IV RESULTADOS	37
V. CONCLUSIONES	51
VI BIBLIOGRAFÍA	52

DEDICATORIA

A TI DIOS:

Por haberme permitido culminar esta etapa tan importante en mi vida, y demostrarme que sin ti nada de esto sería posible ya que tú siempre has sido el centro de atención en mi familia.

A mi “**ALMA MATER**” Gracias por abrirme sus puertas para la adquisición y desarrollo de conocimientos para mi formación profesional.

A MIS PADRES:

Martha Herrera Alfaro Porque gracias a su cariño, apoyo, y comprensión he llegado a culminar mis estudios, por esas palabras de aliento y motivación que siempre tuviste para mí.

Abel Rodríguez Vázquez *A ti padre por enseñarme hacer de mí una persona de bien y siempre guiarme por el buen camino enseñándome que no todo en la vida es lo material que es más importante lo espiritual.*

A MIS HERMANOS:

América Santiago y Nahúm Gracias por vivir conmigo alentándome, corrigiéndome, comprendiéndome, apoyándome incondicionalmente y 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 mis padres **Abel y Martha** por el esfuerzo que han hecho a lo largo de mi vida para poder darme lo necesario y enseñarme que si confías en Dios todo se puede lograr en esta vida.

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.

Al MC. Héctor Uriel Serna Fernández Por haberme enseñado tanto a lo largo de carrera y haberme compartido sus conocimientos.

Al MC Juan Antonio Guerrero Hernández Por su valiosa asesoría y conocimientos compartidos en el salón de clases.

Al **Ing. Juan Javier Gonzales** porque a través del futbol americano me enseñó que si pones esfuerzo y dedicación podrás llegar a ser muchas cosas en la vida.

A todos mis amigos **Jesús, Lázaro, Edgar, Yovani, Francisco, Sosa, Pedro, Edwin** gracias por todos los momentos compartidos, nunca los olvidaré.

Y a todos mis compañeros de carrera fue un gusto y placer compartir estos últimos años con ustedes.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales municipales (Conagua, 2011)	7
Figura 2. Incremento del tratamiento de aguas residuales por año (Conagua, 2011)	8
Figura 3. Porcentajes de tratamiento de aguas residuales por entidad federativa (conagua, 2011)	9
Figura 4. Principal uso de agua en México (conagua, 2011)	10
Figura 5. Tipos de humedales artificiales (Llagas et.al, 2006)	12
Figura 6. Humedal artificial de flujo superficial. (Hoffmann et. al, 2011)	13
Figura 7. Humedal artificial de flujo subsuperficial. (Hoffmann et. al, 2011)	14
Figura 9. Aguas residuales tratadas (Lara 1999).	18
Figura 10. Material utilizado en humedales artificiales (Lara 1999).	19
Figura 11. Vegetación utilizada en humedales artificiales (Lara 1999).	19
Figura 8. Gráfica modelo de un trazador	21
Figura 12. Localización del sitio (google earth)	24
Figura 13. Componentes del sistema	25
Figura 14. Filtros utilizados en el tratamiento	26
Figura 15. Tanque Imhoff	27
Figura 16. Acondicionamiento del terreno	29
Figura 17. Componentes del sistema	30
Figura 18. Parte delantera del filtro y válvula reguladora de flujo	30
Figura 19. Válvula diseñada para la inyección rápida del trazador	31
Figura 20. Válvula retenedora de flujo	31
Figura 21. Medidor de flujo	32
Figura 22. Tuerca unión utilizada para desmontar los conectores.	32
Figura 23. Análisis de la curva. (Pérez, 1992)	33
Figura 24. Índice de morrill (Pérez, 1992).	35
Figura 25. Gráfica de la prueba 1 con grava	43
Figura 26. Gráfica de la prueba 2 con grava	43
Figura 27. Gráfica de la prueba 1 con carrizo	44
Figura 28. Gráfica de la prueba 2 con carrizo	44
Figura 29. Gráfica de la prueba 1 con llanta molida	45
Figura 30. Gráfica de la prueba 2 con llanta molida	45
Figura 31. Gráfica de la prueba con toneles de 200l	46
Figura 32. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 1 de grava	46
Figura 33. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 2 de grava	47
Figura 34. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 1 de carrizo	47
Figura 35. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 2	

de carrizo _____	48
Figura 36. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 1 de llanta molida _____	48
Figura 37. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba 2 de llanta molida _____	49
Figura 38. Curva generada por el programa qtracer2 para la prueba de toneles de 200l _____	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal y de flujo vertical (Hoffmann et. al 2011) _____	15
Cuadro 2. Procesos de remoción de contaminantes en ha de flujo subsuperficial _____	17
Cuadro 3. Lista de materiales _____	27
Cuadro 4. Datos obtenidos en la primera prueba con grava como material ____	37
Cuadro 5. Datos obtenidos en la segunda prueba con grava como material____	38
Cuadro 6. Datos obtenidos en la primera prueba con carrizo como material _	38
Cuadro 7. Datos obtenidos en la segunda prueba con carrizo como material	39
Cuadro 8. Datos obtenidos en la primera prueba con llanta molida como material _____	39
Cuadro 9. Datos obtenidos en la segunda prueba con llanta molida como material _____	40
Cuadro 10. Datos obtenidos en la prueba con toneles de 200l con grava como material _____	41
Cuadro 11. Parámetros calculados con los datos obtenidos _____	42
Cuadro 12. Velocidades obtenidas en la toda la prueba realizada _____	50

RESUMEN

Los sistemas de tratamiento naturales se caracterizan por su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, así como el nulo uso de energía, siendo utilizados para la remoción de cargas contaminantes en las aguas residuales. A pesar de los conocimientos que se tienen en la actualidad han llevado a proponer nuevos diseños, con la combinación de diferentes tipos de humedales artificiales en este caso de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

Utilizando para nuestra investigación tres toneles de 0.80 m de altura, con un diámetro de 0.60 m y una capacidad de 0.20 m³ por cada tonel y tres columnas de tubo de PVC de 1.50 m de largo, con 0.1524 m de diámetro para el tratamiento de aguas residuales de la UAAAN, a los cuales se les instaló válvulas para la toma de muestras, válvulas reguladoras de gasto, válvulas para la inyección de la solución, medidor de flujo entre otras cosas. El propósito de este proyecto, consiste en determinar los parámetros de transporte como son velocidad, tiempo de residencia y dispersión hidrodinámica que nos ayudan a la evaluación de sistemas de tratamiento desde el punto de vista hidrodinámico ya que se determinará la existencia de puntos muertos y cortos circuitos. Para lograr llevar a cabo el análisis de Determinación de Tiempos de Residencia (DTR) se llevaron a cabo estudios con trazadores. El método que se utilizó es el de estímulo-respuesta usando cloruro de sodio (NaCl) como trazador. En este método se introduce instantáneamente al flujo del caudal conocido que ingresa al humedal, una cantidad específica de un trazador químico no reactivo. Luego se registra la concentración del trazador en la corriente de flujo a la salida del reactor en función del tiempo.

Palabras claves: Determinación de tiempos de residencia, humedales artificiales

Correo electrónico; Job Rodríguez Herrera, jobito.69@hotmail.com

I. INTRODUCCION

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.

Con el objeto de preservar la calidad del agua, se construyen plantas para tratar el agua antes de su descarga a los ríos y cuerpos de agua. En el año 2010, las 2,186 plantas en operación en el país trataron 93.6 metros cúbicos por segundo, es decir el 44.76% de los 209.1 metros cúbicos por segundo recolectados en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2011). Lo que indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad de este bien, además de propuestas innovadoras que permitan implementar el tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas (CONAGUA, 2007).

Existen sistemas naturales de tratamiento que se definen como el proceso o técnicas que eliminan sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales, sin el empleo de algún aditivo químico.

El efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, suelo, microorganismos (terrestres y acuáticos) y, en menor medida, a la acción de animales superiores (Moreno *et al.*, 2003).

Los humedales artificiales son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan humedales artificiales (García y Corzo, 2008).

Lo anterior mencionado nos lleva a la realización de este proyecto a partir de procesos derivados de la naturaleza, que permita diseñar proyectos alternativos para el tratamiento de aguas residuales con el objetivo de reducir los costos de construcción, energía y explotación, así como la implementación de sistemas más compactos fáciles de operar. 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.

1.1 Objetivos:

a).- Construir un humedal artificial de flujo horizontal, como apoyo al tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

b).- Evaluar hidrodinámicamente dos humedales artificiales.

1.2 Hipótesis:

Con materiales de bajo costo es factible la construcción de un sistema de tratamiento del agua residual de flujo vertical a escala piloto.

Los tiempos de residencia pueden ser determinados por medio de trazadores.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El agua es uno de los elementos naturales fundamentales que junto con el aire, la tierra y la energía, constituyen los cuatro recursos básicos donde se apoya la vida en cualquiera de sus formas, sin embargo la importancia de la calidad del agua, ha tenido un lento desarrollo, sólo hasta finales del siglo XIX se le reconoció como origen de numerosas enfermedades infecciosas, hoy en día su importancia, está fuera de toda duda (Oswald, 2011).

Constituye uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre, en contra de lo que pudiera parecer, diversos factores limitan su disponibilidad para el uso humano; más del 97% del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas, por lo que su utilización es limitada, del 3% restante más del 2% se encuentra en estado sólido, como hielo resultando prácticamente inaccesible. En términos generales sólo el 0.62% de toda el agua en el planeta es apta para el hombre y sus actividades domésticas, agrícolas e industriales, este volumen de agua se encuentra en lagos, ríos y acuíferos subterráneos. La cantidad de agua disponible es ciertamente escasa, uno de sus mayores problemas es aun su distribución irregular en el planeta, por otro lado, el uso de los recursos naturales provoca un efecto sobre los ecosistemas de donde se extrae y donde se utilizan; el caso del agua es uno de los ejemplos más claros y contundentes: un mayor suministro de agua significa una mayor generación de aguas residuales, si se entiende por desarrollo sustentable aquél que permita compatibilizar el uso de los recursos con la conservación de los ecosistemas, entonces se debe propiciar el balance entre la explotación, el tratamiento y el

restablecimiento de todos los recursos naturales, incluyendo el agua en todas sus formas y presentaciones (Esponda, 2001).

A la mayoría de nosotros nos parece natural tener acceso al agua potable, la usamos para todo, la dejamos correr, siempre estuvo ahí y siempre estará, como el aire que respiramos y también así de imprescindible, sin embargo en tan sólo dos décadas se ha duplicado el consumo de agua en nuestro planeta, hoy más de 1,500 millones de personas en el mundo no pueden gozar de este privilegio, se afirma que para el año 2025 la demanda de agua potable será el 56% mayor al suministro disponible.

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. En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, sólo 36 % de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración. 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 (Romero 2009).

Las condiciones de flujo no ideal en los humedales construidos afectan su desempeño, las causas comunes son cortos circuitos, zonas muertas y recirculación interna por corrientes cinéticas o densidad. (Pérez y Torres, 2008).

En el tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales, el conocimiento de los parámetros hidrodinámicos en ellos, es muy importante, ya que a través de estos estudios se puede lograr entender y mejorar la eficiencia de los procesos. Para determinar el comportamiento hidrodinámico de un sistema o 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) (Sabas 2011).

Para realizar las curvas 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 (Hincapié 2007).

La eficiencia hidrodinámica representa la habilidad de un reactor para distribuir el flujo uniforme en su volumen útil, maximizando el tiempo de contacto de los contaminantes en el sistema y optimizando la remoción de los mismos, siendo ampliamente utilizada en evaluación hidrodinámica de reactores (Cano 2010).

Cada humedal representa un DTR particular, y su correspondiente análisis se hace por medio de estudios experimentales de caracterización hidrodinámica conocida como ensayo de trazador. Una forma común de hacer estos ensayos es mediante la adición rápida de un trazador a la entrada del sistema, seguida por la determinación de su concentración y su correspondiente registro en función del tiempo, en una ubicación dada (Sandoval 2007).

2.1 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos. Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar estos procesos con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual (Metcalf y Eddy, 1998). Los pasos básicos para el tratamiento convencional de aguas residuales incluyen:

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento terciario o avanzado

Pretratamiento: Es el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos y operaciones. El desbaste y la

dilaceración (descomposición de sólidos grandes) son procesos utilizados para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para eliminar grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa (Romero, 2000).

Tratamiento primario: Se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos y materia orgánica particularmente mediante sedimentación o flotación, constituyendo una estrategia de preparar el agua residual para el tratamiento biológico. Por lo general el tratamiento primario en un sistema convencional, remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y hasta un 40% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Romero, 2000).

Tratamiento secundario: El tratamiento secundario convencional es biológico, se usa principalmente para remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos volátiles, se incluyen en estos los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunaje y los humedales artificiales, además de otras opciones anaeróbicas o mixtas (Romero, 2000).

Tratamiento terciario y avanzado: Supone generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de fuentes receptora ambientalmente más sensibles o para mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso (Romero, 2000).

En un desarrollo gradual de sistemas de tratamiento se pueden considerar, como objetivos iniciales y principales del tratamiento de aguas residuales, los siguientes:

- Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Remoción de Nitrógeno y Fósforo

2.1.1 Tratamiento de aguas residuales en México.

En México, el agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, y se ha convertido en elemento central de las actuales políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su salud, aporten caudales para satisfacer las necesidades de la población y contribuyan al crecimiento económico y calidad de vida de la población; requiere que se mantengan limpios, sin descargas de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas que los contaminen y afecten más allá de su capacidad natural de asimilación y dilución (Peña-Guzmán 2012).

Para la remoción de los contaminantes en las aguas residuales provenientes de las ciudades existen diversos procesos biofísicos de tratamiento. Actualmente, los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales en el país incluyen lodos activados, lagunas de estabilización, primario avanzado, lagunas aireadas, filtros biológicos, dual y otros (Figura 1). A través de estos procesos, anualmente se logra remover cerca de 0.6 millones de toneladas de DBO que se colectan en el alcantarillado municipal de las 2 millones de toneladas que se generan; estos procesos también son capaces de remover alrededor del 19% de la carga orgánica de las aguas industriales (CONAGUA, 2011).

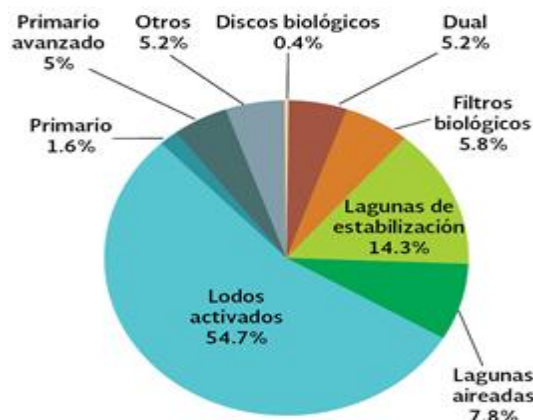


Figura 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2011).

En 2011 en México había en operación 2289 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (las cuales procesan un caudal de $97.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y 3033 plantas para tratamiento de aguas residuales industriales (de las cuales están en operación 2995, lo que representa 98.7% del total). Si se considera sólo el caudal municipal generado, en ese año se trató el 41.3%, lo que representa un incremento de 141% respecto a 1998 (es decir, $56.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$;) (Figura 2). Aunque la cantidad total de agua residual que se trata aún resulta baja, está por encima del promedio de América Latina, que apenas llega al 13%. De estos resultados queda claro que aún muchos de los cuerpos de agua superficiales del país reciben de manera continua, descargas residuales sin tratamiento que ocasionan su contaminación y, en consecuencia, afectaciones a la salud de la población y de las especies que los habitan.

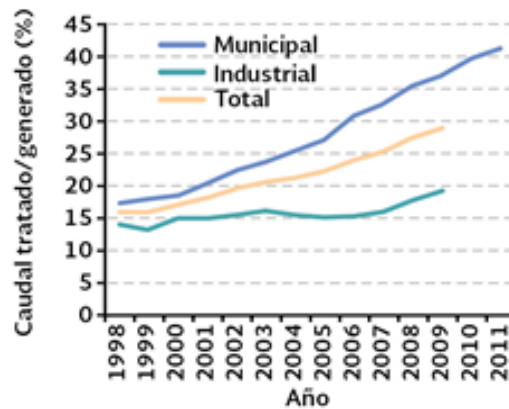


Figura 2. Incremento del tratamiento de aguas residuales por año (CONAGUA, 2011)

2.1.2 Tratamiento de aguas residuales municipales

Al cierre del año 2010 el registro de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación fue de 2186 instalaciones de las cuales 298 contaban con un nivel de tratamiento primario, 16 con primario avanzado, 1870 con tratamiento secundario y 2 con tratamiento terciario (Conagua, 2011).

La capacidad instalada fue de $126.85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y el caudal tratado fue de $93.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ lo que permitió alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales de 44.8%.

Los avances de la cobertura de tratamiento han venido incrementándose a lo largo del tiempo. En el año 2000 se contaba con una cobertura de 23%, cerrando en el año 2006 con una cobertura de 36.1% y como se mencionó anteriormente, en el último registro se contó con una cobertura de 44.8%.

La meta establecida en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 es llegar a una cobertura de 60% de las aguas residuales colectadas.

A nivel de entidad federativa es muy variable el porcentaje de aguas residuales que reciben tratamiento respecto al caudal generado: en 2011, Nuevo León, Baja California y Aguascalientes dieron tratamiento a más del 90% del agua residual que generaron, mientras que entidades como Campeche y Yucatán trataron menos del 5% (Figura 3).

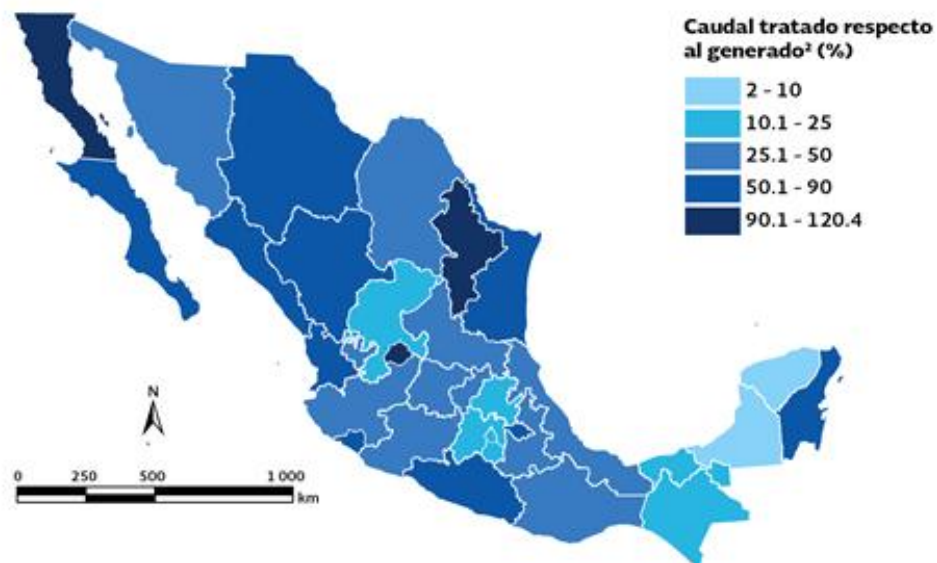


Figura 3. Porcentajes de tratamiento de aguas residuales por entidad federativa (CONAGUA, 2011).

2.2 Núcleos de población.

El proceso de concentración de la población en las localidades urbanas ha dado como resultado su acelerado crecimiento, lo que ha implicado fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones, derivadas de la demanda incrementada de servicios como es el caso del agua. Viéndose cada vez más afectada por la falta de disponibilidad del recurso hídrico (CONAGUA, 2011).

Anualmente México recibe del orden de 1489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2011).

2.3 Principales usos del agua en México.

Los usos del agua para fines prácticos se han agrupado en cuatro grandes grupos corresponden a usos consuntivos el agrícola, el abastecimiento público, la industria y la generación de energía eléctrica (Figura 4). El principal uso agrupado del agua en México es el agrícola, el cual en términos de uso de aguas nacionales se utilizada para el riego de cultivos con un 77%.

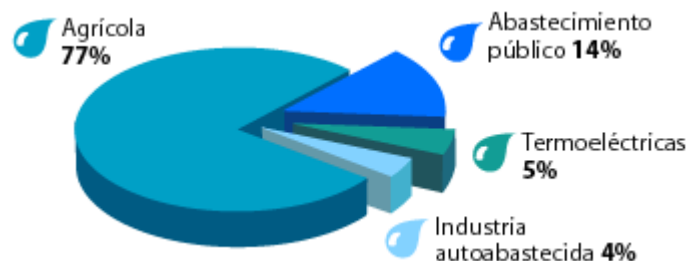


Figura 4. Principal uso de agua en México (CONAGUA, 2011).

En países en desarrollo como el nuestro, enfrentaremos una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial. Así, la búsqueda de fuentes alternativas de agua, sobre todo para la agricultura, sector que demanda un mayor porcentaje, resulta de gran importancia.

Frente a este panorama, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo y de requerimientos sencillos de operación y mantenimiento. Es decir, que sean acordes a nuestra realidad y sobre todo para los sectores urbanos y rurales, donde se concentran la mayoría de los puntos de descarga de aguas residuales y en los cuales la gestión sostenible de estas aguas se ha convertido en una demanda cada vez más urgente y que requiere una pronta respuesta del Gobierno (Delgadillo *et al.*, 2008). Además de la escasez de agua para riego, determinan que el reúso de aguas residuales para riego se convierta en una alternativa de actual y de muchísima importancia.

Entre las distintas tecnologías no convencionales, los humedales artificiales son los que están experimentando un mayor grado de desarrollo e implantación, dando como resultado una opción viable a la hora de obtener agua con una mejor calidad, debido principalmente a su elevada eficiencia en la disminución de materia orgánica, nutrientes y patógenos, reduciéndose los posibles efectos adversos de los vertimientos sobre los medios receptores (Llagas y Guadalupe, 2006).

2.4 Tipos de humedales artificiales.

Existen dos tipos de humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales, humedales de flujo subsuperficial (SFS) y superficial (SF) (Figura 5). En el denominado de flujo superficial, el agua circula por sobre la superficie del

substrato y, en el de flujo subsuperficial, el agua circula a nivel de la superficie del lecho o por debajo del substrato (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los humedales artificiales (HA) desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como sistemas "naturales" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas. Un aspecto especial de gran importancia es el uso del HA para el tratamiento de aguas grises,

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) pueden ser diseñados con flujo vertical u horizontal. El Humedal de Flujo Vertical (HFV) tiene un rendimiento de tratamiento más eficiente con una menor área de ocupación. Por otra parte, la eficacia del tratamiento depende del intervalo en que se da la carga (de 4 a 8 veces al día) por lo que se necesita un mayor conocimiento técnico para el diseño, en cambio la alimentación del Humedal de Flujo Horizontal (HFH) es de flujo continuo. Estos son más fáciles de diseñar y hasta ahora siguen siendo las instalaciones preferidas, especialmente en países en desarrollo (Hoffmann *et. al*, 2011)

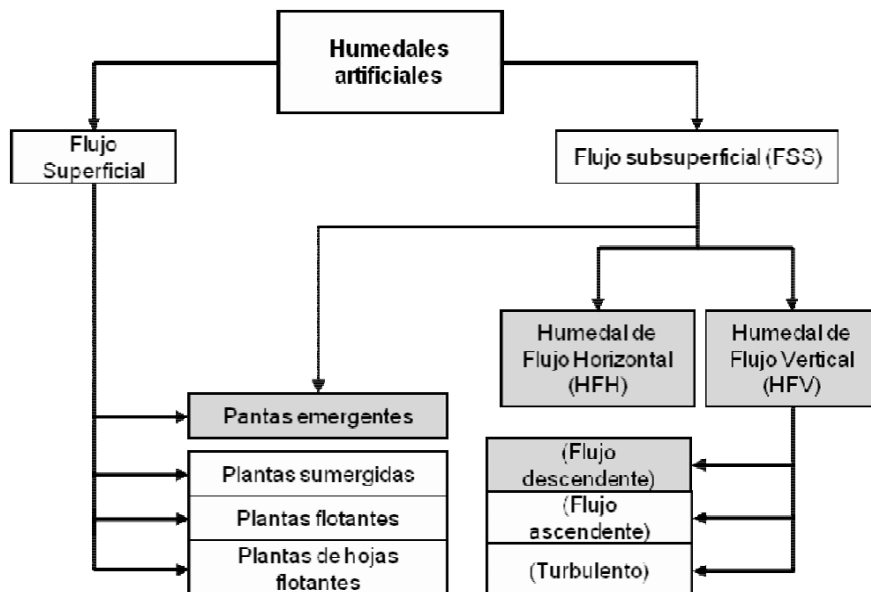


Figura 5. Tipos de humedales artificiales (Llagas y Guadalupe, 2006).

2.4.1 Humedal artificial de flujo superficial.

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (0.1 m a 0.6 m) y tienen plantas (Figura 6).

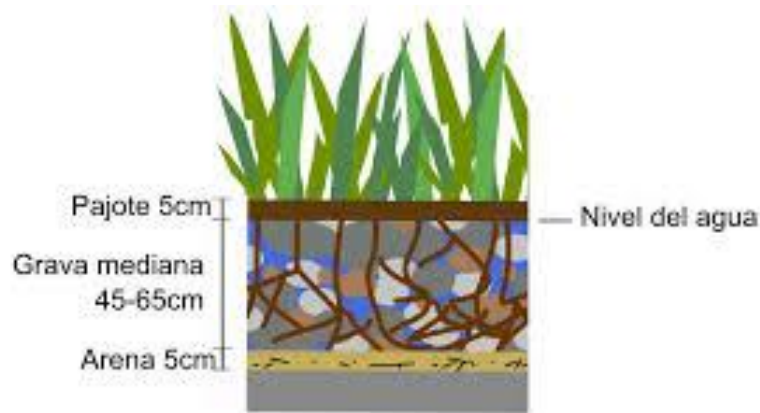


Figura 6. Humedal artificial de flujo superficial. (Hoffmann et. al, 2011).

2.4.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (FSS).

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas (Figura 7). Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical. También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua.

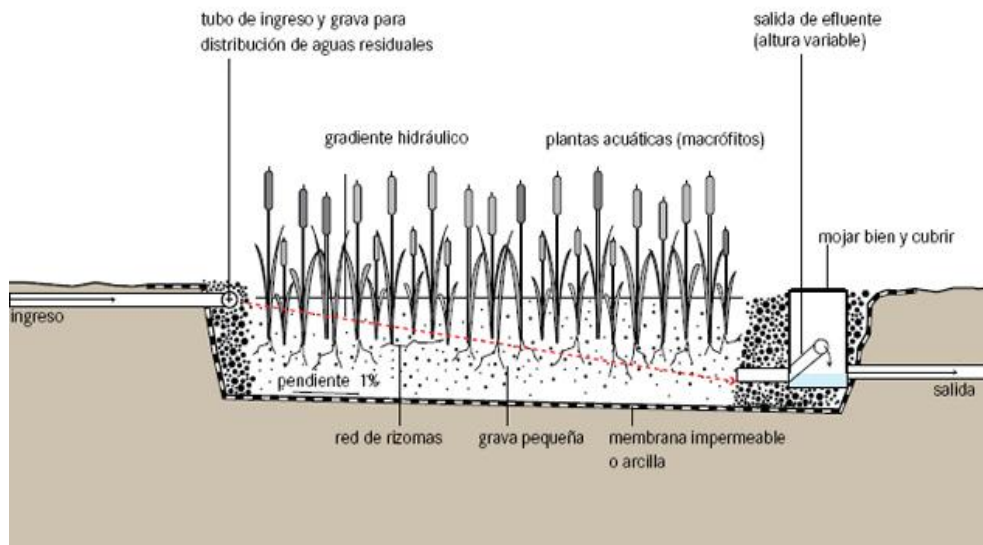


Figura 7. Humedal artificial de flujo subsuperficial. (Hoffmann et. al, 2011).

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal.

La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio

2.4.3. Ventajas de los humedales artificiales.

Altos rendimientos en la disminución DBO, sólidos en suspensión, nutrientes y patógenos. Permite regular y almacenar agua que por sus características es sanitaria y agrícolamente apta para el riego. La retirada de lodos se realiza cada 5 - 10 años, dependiendo del agua residual (Moreno, *et al.*, 2003).

2.4.4. Desventajas de los humedales artificiales.

Las desventajas que se pueden mencionar es que estos sistemas, es que sin un buen diseño, no podremos desechar los contaminantes que se desean eliminar, así como también la producción de elevadas pérdidas de agua por evaporación. Las aguas depuradas presentan una elevada concentración de algas y son de difícil adaptación a los cambios climáticos (Moreno, *et al.*, 2003).

2.5 Eficiencia de remoción en los sistemas naturales de tratamiento.

Estudios realizados en sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales indican que, con una buena operación de estos sistemas se consigue una elevada reducción de organismos patógenos de hasta el 99 % (Lara, 2009).

Los humedales artificiales son generalmente diseñados para la eliminación de los siguientes contaminantes en aguas residuales.

- Materia orgánica (medida como DBO y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (por ejemplo nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

Cuadro 1. Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal y de flujo vertical (Hoffmann *et. al* 2011).

Contaminantes	HFH (Morel y Diener, 2006)	HFV (Ridderstolpe, 2004)
DBO	80-90%	90-99%
SST (Sólidos totales)	80-95%	90-99%
NT (Nitrógeno total)	15-40%	30%

PT (Fosforo total)	Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del Tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.
--------------------	--

2.6 Procesos de depuración.

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Stearman *et al.*, 2003).

El tratamiento de aguas residuales para depuración se realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución (Fernández *et al.*, 2004).

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales tales como:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

2.6.1 Mecanismos de remoción.

Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizado, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbiana de la DBO y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación (Mena *et al.*, 2008).

Entre los principales mecanismos se encuentran los siguientes:

- Remoción de DBO

- Remoción de SST
- Remoción de Nitrógeno
- Remoción de Fósforo

Cuadro 2. Procesos de remoción de contaminantes en HA de flujo subsuperficial.

Contaminante	Proceso
Materia orgánica (MO) (medida como DBO ₅ o DQO)	<ul style="list-style-type: none"> • Las partículas de MO son eliminadas por la sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO₅ soluble • La MO soluble es fijada y adsorbida por el biofilm y degradadas por las bacterias adheridas en este.
Sólidos suspendidos totales (SST)	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación y filtración • Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrificación / Desnitrificación por el biofilm • Absorción de las plantas (influencia limitada)
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Retención en el lecho de arena (adsorción) • Precipitación con aluminio, hierro y calcio • Absorción de las plantas (influencia limitada)
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación y filtración • Absorción por el biofilm • Depredación por protozoarios • Eliminación de bacterias por condiciones ambientales desfavorables (temperatura y pH)
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación y adsorción • Absorción de las plantas (influencia limitada)

Contaminantes orgánicos

- Adsorción por el biofilm y partículas de arena
 - Descomposición debido a lo largo del tiempo de retención y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable).
-

2.7 Componentes del humedal de flujo subsuperficial.

Agua. La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso (Figura 9).



Figura 8. Aguas residuales tratadas (Lara 1999).

Substrato. En los humedales, está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación (Figura 10) 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 (Lara 1999).



Figura 9. Material utilizado en humedales artificiales (Lara 1999).

Vegetación. El principal beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) (Figura 11) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).



Figura 10. Vegetación utilizada en humedales artificiales (Lara 1999).

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 y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).

2.8 Posibles usos del agua tratada.

La contaminación del agua hace que la disponibilidad del recurso sea limitada en muchas regiones del país principalmente para consumo humano y recreativo. La sobresaturación de carga orgánica desequilibra sobre los ecosistemas acuáticos genera condiciones sin oxígeno de difícil recuperación que limitan la vida de las comunidades acuáticas y generan procesos de eutroficación de lagos y lagunas por sobreabundancia de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Una vez determinado los parámetros necesario para la utilización se procede a clasificar el tipo de reutilización del agua tratada tomando el grado de contaminación que establece los límites máximos permisibles. Ya sea para descarga a los cuerpos de agua o para la reutilización en cultivos como el maíz, forrajes entre otros.

2.9 Aforo químico.

Esta técnica se usa en aquellas corrientes que presenten dificultades para la aplicación del método área velocidad o medidas con estructuras hidráulicas, como en corrientes muy anchas o en ríos torrenciales, además de ser usado en la determinación del gasto en medios porosos.

Los trazadores pueden ser de tres tipos:

- 1) **Químicos:** de esta clase son la sal común y el dicromato de sodio.
- 2) **Fluorescentes:** como la rodamina.

3) **Materiales radioactivos:** los más usados son el yodo 132, bromo 82, sodio.

La sal común puede detectarse con un error de 1% para concentraciones de 10 ppm (partes por millón).

El dicromato de sodio puede detectarse a concentraciones de 0.2 ppm y los trazadores fluorescentes con concentraciones muy altas. Los trazadores radioactivos se detectan en concentraciones muy bajas. Sin embargo su utilización requiere personal muy especializado.

El método de los trazadores puede implementarse de dos maneras:

a) Inyección a caudal constante En los aforos químicos o radioactivos se añade de forma continua y constante una concentración conocida (C_1) de una sustancia química o radioactiva a la corriente cuyo caudal (Q) desea determinarse.

b) Inyectar rápidamente un volumen de trazador. Este método es llamado también Método de integración. Supóngase que en una sección 1 de un río se adiciona un pequeño volumen de trazador V_1 con una concentración alta C_1 . Si existe en el río una concentración, C_0 , el perfil de concentraciones en el río se comporta con el tiempo así:

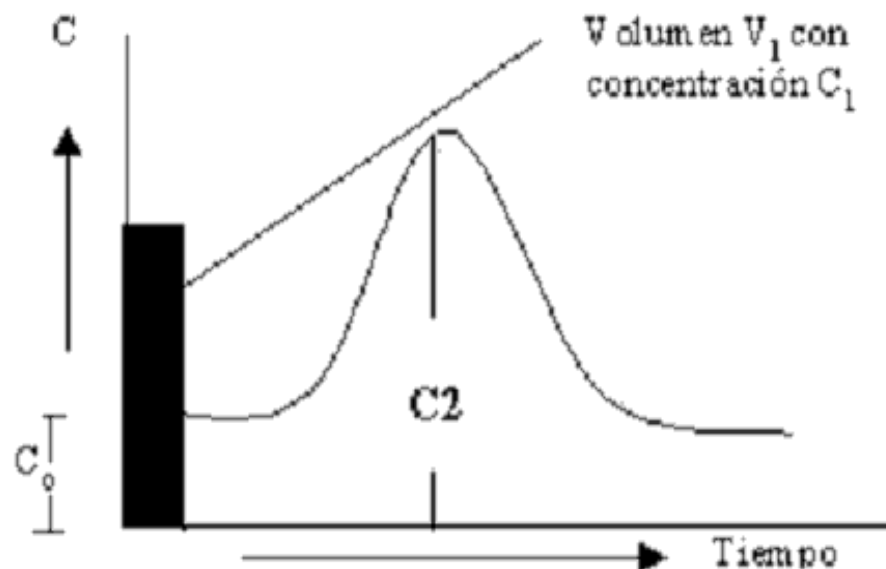


Figura 11. Grafica modelo de un trazador.

Por continuidad se tiene que:

$$V_1 \cdot C_1 = \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot C_2 \cdot dt - \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot C_0 \cdot dt$$

Donde:

Q= Caudal de la corriente que se desea conocer.

C₁ = Concentración del trazador.

V₁= Volumen del trazador

C₂= Función que define la concentración del trazador, en el punto de control en la función de t.

C₀= Concentración encontrada en el rio antes de la dosificación.

Resolviendo la ecuación para Q se tiene:

$$Q = \frac{V_1 \cdot C_1}{\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) dt}$$

2.10 QTRACER2.

La prueba de trazadores es generalmente considerada como el método más confiable y eficiente en la recolección de información hidráulica. Esto es especialmente cierto para los acuíferos de roca fracturada. Las pruebas de rastreo cualitativos se han empleado convencionalmente en su mayoría. Aunque se reconoce ampliamente que proporcionan una gran cantidad de datos hidráulicos y geométricos y se emplean comúnmente en los sistemas hidrológicos, QTRACER2 ha sido desarrollado para facilitar el análisis de la curva (DTR). El programa QTRACER2 resuelve las ecuaciones necesarias de entrada de datos generados por los usuarios usando rutinas de integración robustas y se basa en modelos hidráulicos establecidos. Las características adicionales incluyen la asignación de memoria dinámica, la capacidad de

extrapolar los datos, existen dos métodos distintos para el manejo de datos de concentración-tiempo de gran tamaño, y una poderosa rutina de gráficos interactivos. Otros cuatro programas se incluyen para facilitar el uso de QTRACER2. El primero, NDATA, permite a los usuarios interpolar ya sea su concentración el tiempo o los datos de descarga de tiempo. El segundo programa, AUTOTIME, permite a los usuarios convertir los datos de tiempo contra concentración en archivos grabados con hora militar (un reloj de 24 horas) en el tiempo decimal secuencial como es requerido por QTRACER2. Los archivos creados por estos dos programas pueden ser combinados y añaden al fondo de una estación de muestreo de datos de QTRACER2. El método más sencillo para la creación de una nueva entrada de datos en QTRACER2 es modificar una-entrada de datos existente con un editor de texto estándar (por ejemplo, el Bloc de notas) y guardar la revisada con un nuevo nombre. Sin embargo, si se desea, el usuario puede acceder al tercer programa adicional, DATFILE, para crear o modificar una entrada de datos, respondiendo a una serie de preguntas planteadas por el programa. Por último, el cuarto programa fue diseñado para abordar el problema de tiempo contra concentración no coincidente y los datos de descarga de tiempo. El programa, combina dos conjuntos de datos dispares en el tiempo y así poder mostrar la gráfica de tiempo contra concentración

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del sitio.

La instalación se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila México (Figura 12), ubicada entre las coordenadas geográficas 25° 21'18" latitud Norte y 101° 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,



Figura 12. Localización del sitio (Google earth).

3.2 Descripción del sistema natural de tratamiento.

Para el tratamiento del agua residual estos sistemas se basan prácticamente en procedimientos naturales de depuración que no emplean aditivos químicos y que eliminan las sustancias contaminantes usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos (Seguí, 2004).

El sistema de tratamiento consta de los siguientes componentes (Figura 13).



Figura 13. Componentes del sistema.

Se utilizaron 3 toneles con dimensiones de 0.8 m de alto, 0.6 m ancho con un volumen de 0.2 m³ de capacidad por cada tonel, los cuales se instalaron en serie, que se conectaron mediante tubos de policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 0.0254 m, y una separación entre toneles de 1 m.

Los toneles se rellenaron con grava triturada de 20 mm de diámetro, a 0.8 m de altura del tonel.

También se utilizaron tres columnas de tubo de (PVC) de 0.1524 m de ancho por 1.50 m de largo con un volumen de 0.02736 m³ de capacidad por cada columna las cuales son conectadas independientemente para cada sistema



Figura 14. Filtros utilizados en el tratamiento.

Las columnas fueron rellenas de diferente material tales como son grava, llanta triturada y carrizo para una evaluación diferente por cada tratamiento

El sistema de abastecimiento es un tanque imhoff que se ubica a aproximadamente a 80 m de distancia. 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 primaria



Figura 15. Tanque imhoff.

Para la construcción del humedal artificial (columnas de PVC) fueron necesarios

La adquisición de diferentes materiales como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Lista de materiales para la construcción del humedal artificial.

Descripción	Unidad	Cantidad
Coples ½	pza	3
Válvulas ½	pza	3
Tees ½	pza	3
Codo ½	pza	3
Tapones ½	pza	2
Reducciones ¾- ½	pza	2
Manguera	m	90
Tubo de PVC ½	pza	2
Pegamento PVC	pza	2
Lija	pza	2
Trapo	pza	5
Cinta de aislar	pza	1
Cinta para ductos	pza	1
Cinta canela	pza	1
Silicón	pza	1
Medidor de flujo	pza	1
Coplees para medidor	pza	2
Tubo de PVC 6"	pza	1
Tapas para tubos de 6"	pza	6
Coplees ¾	pza	6
Válvulas ¾	pza	3
Codos ¾	pza	11
Tes ¾	pza	1
Tubo de PVC ¾	pza	1
Madera 2*2	pza	8
Tuerca unión	pza	3

3.3 Construcción del sistema de tratamiento.

Se acondicionó el terreno para realizar la respectivas pruebas llevándonos al desyerbe de dicho terreno (Figura 16) y acondicionamiento de dicho sistema.



Figura 16. Acondicionamiento del terreno.

La construcción de un pantano para el tratamiento del agua residual puede tener un buen funcionamiento si cada uno de sus componentes esté bien diseñado y construido evitando fallas que se puedan presentar en la operación del pantano.

La construcción del humedal artificiales se realizó utilizando tres columnas de PVC, (Figura 17) los cuales se instalaron independientemente para su evaluación de la misma manera; cada parte del sistema de tratamiento fue ensamblado minuciosamente, para evitar fugas o imperfectos que le puedan ocasionar un mal funcionamiento del sistema de tratamiento.



Figura 17. Componentes del sistema.

Se colocaron tapas a los tubos de PVC de 6", para posteriormente realizarles un Barreno de $\frac{3}{4}$ " para poder ensamblar las válvulas reguladoras de flujo (Figura 18) y ensamblar los tres tubos con una sola conexión proveniente del tanque Imhoff.



Figura 18. Parte delantera del filtro y válvula reguladora de flujo.

Se le acoplaron válvulas para la inyección rápida de $\frac{1}{2}$ " para realizar una inyección más precisa y evitar pérdida del trazador, dicha válvula está compuesta de una "T" y un cople de rosca para utilizar un tapón y así evitar fugas en el sistema (Figura 19).



Figura 19. Válvula diseñada para la inyección rápida del trazador.

Se colocaron válvulas de $\frac{1}{2}$ " para detener la solución de manera que al momento de inyectar se ubicara a la entrada de nuestras columnas y evitar que nuestro trazador tome dirección errónea y poder tener una prueba correcta (Figura 20).



Figura 20. Válvula retenedora de flujo.

Se acoplo un medidor de flujo de uso doméstico para realizar dichas pruebas esto con el fin de garantizar que el flujo que estamos manejando sea constante

en toda la prueba y evitar cambios de flujo en la prueba y pueda ver errores (Figura 21).



Figura 21. Medidor de flujo.

Todo esto se realizó de manera que pudiera ser desmontable utilizando tres tuercas unión (Figura 22) una para cada lado (para las columnas, para los toneles y la que provienen del tanque Ihmoff) y así poder desmontar todas las válvulas de inyección y retención así como el medidor.



Figura 22. Tuerca unión utilizada para desmontar los conectores.

3.4 Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador.

Ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica en un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomada en la salida se obtiene una serie de valores de concentración que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuye progresivamente, originando una curva como esta.

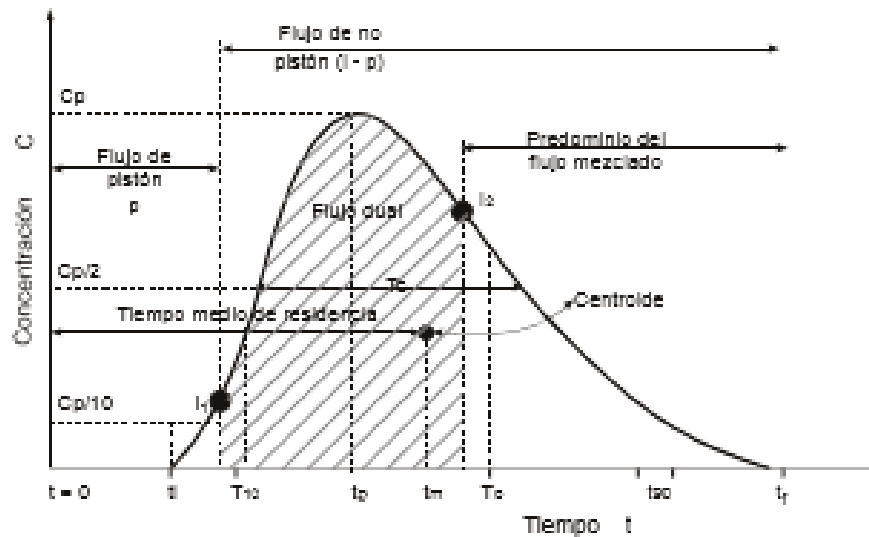


Figura 23. Análisis de la curva. (Pérez, 1992).

La descripción de los tiempos mencionados en la Figura anterior son:

T_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece 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 total del trazador.

T_o = tiempo mediano, 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 de salida.

De acuerdo con Pérez (1992) se pueden utilizar los siguientes criterios para el análisis de la curva:

- A) T_i/T_o = mide los cortos circuitos grandes. Es igual a 1 para el flujo estable ideal y 0 para el flujo ideal de mezcla completa. Si el valor de la relación ≥ 0.3 puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida.
- B) T_m/T_o = si la relación es menor que la unidad existen espacios muertos si es mayor hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador haya quedado retenido por un cierto tiempo y luego haya ido saliendo lentamente con lo que la rama descendiente de la curva presente una forma alargada que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de T_m haciendo $T_m \geq T_o$ cuando normalmente $T_m = T_o$.
- C) T_p/T_o = indica la relación de flujo pistón y flujo mezclado cuando es igual a 1 existe únicamente flujo pistón y 0 para flujo mezclado cuando la relación T_p/T_o se aproxima a 1 y $T_i/T_o \geq 0.5$ puede concluir que existe predominio de flujo pistón.
- D) T_c/T_o = esta relación en general con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencias). Es igual al cociente $\Delta T_o / T_o$ (razón del tiempo de inyección) para flujo estable ideal y aproximadamente del orden de 0.7 para mezcla ideal.

- E) $T_b/T_o =$ está relacionado con las corrientes de inercia turbulencias y de recirculación grande. Es igual al cociente $\Delta T_o/T_o$ (razón del tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y del orden de 2.3 para mezcla ideal
- F) $e = (T_f - T_p) - (T_p - T_i)/T_o$ expresa la exentricidad de la curva y por lo tanto es función de la recirculación es igual a 0 para el flujo estable ideal y 2.3 para mezcla ideal.
- G) Índice de Morrill. Este autor en 1932 dice que el acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en por ciento y dibujados en papel que tenga escala de probabilidad en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferenciar tiempos se obtiene aproximadamente una línea recta.

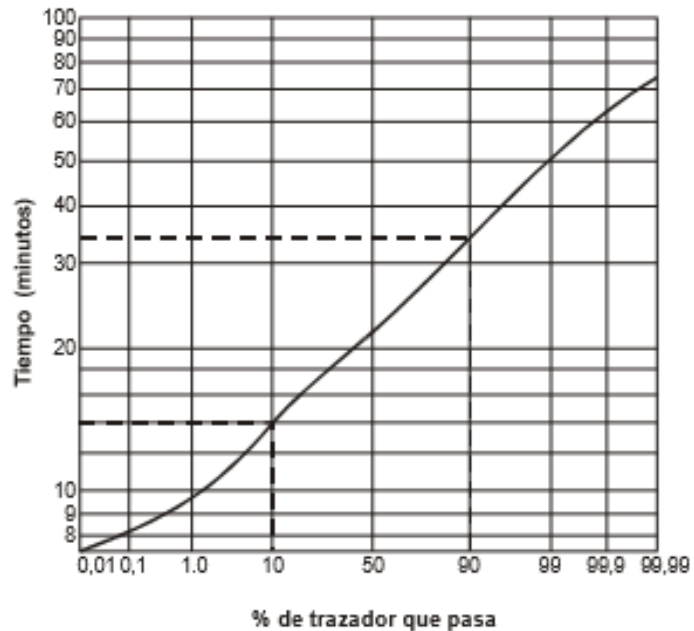


Figura 24. Índice de Morrill (Pérez, 1992).

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% era el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión.

Índice de Morrill= tiempo en que pasa el 90%/ tiempo en que pasa el 10%

Si todo el flujo fuera de pistón la curva de la Figura 24 sería una línea horizontal y el índice de Morrill sería 1 pues todo el trazador saldría en el tiempo $T=T_0$ y nada saldría antes, en cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado se aumenta el ángulo de la curva hace con la horizontal pues hay una distribución más amplia del tiempo de detención.

H) El estudio de la teoría de la curva puede suministrar una información más completa que las de las tendencias centrales.

Generalmente el solo observar la forma que toma la curva de trazadores de una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia.

El flujo de pistón puro viene representado por el tiempo que transcurre hasta que aparece la primera huella del trazador. Hirsch (1972) considera que esta se puede tomar en el punto de inflexión I1 cuando cambia de cóncava a convexa.

De aquí en adelante el flujo debe considerarse como no pistón entre dicho punto y el punto de inflexión I2 es la rama descendente el flujo es dual (pistón y no pistón combinado) a partir del segundo punto de inflexión el flujo tiene un carácter predominante mixto.

IV RESULTADOS

A continuación se muestran los Cuadros con las lecturas obtenidas al momento de realizar las diferentes pruebas. Se puede observar que tienen datos como tiempo y concentración dicha concentración se obtuvo de medir la conductividad eléctrica en la prueba y con ello poder obtener nuestra concentración y así realizar nuestra cura con los resultados de determinación de tiempos de residencia.

Cuadro 4. Datos obtenidos en la primera prueba con grava como material.

tiempo (min)	concentración en gL^{-1}	tiempo (min)	concentración en gL^{-1}	tiempo (min)	concentración en gL^{-1}
5	0.012226	40	2.591912	65	1.497685
10	0	41	2.500217	70	1.338747
15	0.434023	42	2.432974	75	1.185922
20	2.665268	43	2.402409	80	1.051436
22	3.172647	44	2.390183	85	0.910837
23	3.307133	45	2.310714	90	0.819142
24	3.417167	46	2.274036	95	0.745786
25	3.453845	47	2.188454	100	0.666317
26	3.472184	48	2.20068	105	0.574622
27	3.447732	49	2.151776	110	0.525718
28	3.392715	50	2.108985	115	0.470701
29	3.356037	51	2.066194	120	0.415684
30	3.282681	52	2.01729	125	0.354554
31	3.227664	53	1.980612	130	0.336215
32	3.154308	54	1.931708	135	0.293424
33	3.062613	55	1.882804	140	0.268972
34	3.001483	56	1.840013	145	0.238407
35	2.922014	57	1.803335	150	0.220068
36	2.830319	58	1.760544	155	0.189503
37	2.781415	59	1.723866	160	0.195616
38	2.714172	60	1.687188	165	0.177277
39	2.653042				

Cuadro 5. Datos obtenidos en la segunda prueba con grava como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
5	0.073356	37	0.409571	56	0.134486
10	0.085582	38	0.379006	57	0.12226
15	5.764559	39	0.330102	58	0.128373
20	4.963756	40	0.299537	59	0.12226
22	4.028467	41	0.268972	60	0.12226
23	3.673913	42	0.250633	65	0.091695
24	3.294907	43	0.232294	70	0.079469
25	2.885336	44	0.232294	75	0.091695
26	2.665268	45	0.220068	80	0.055017
27	11.223468	46	0.220068	85	0.042791
28	6.913803	47	0.195616	90	0.036678
29	3.887868	48	0.201729	95	0.024452
30	2.280149	49	0.165051	100	0
31	1.583267	50	0.171164	105	0.012226
32	1.088114	51	0.158938	110	0.012226
33	0.813029	52	0.158938	115	0.012226
34	0.702995	53	0.140599	120	0.006113
35	0.574622	54	0.140599	125	0.012226
36	0.476814	55	0.140599	130	0.006113

Cuadro 6. Datos obtenidos en la primera prueba con carrizo como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
5	0.036678	36	0.110034	54	0.152825
10	1.149244	37	0.122260	55	0.152825
15	0.452362	38	0.116147	56	0.171164
20	0.287311	39	0.116147	57	0.165051
22	0.244520	40	0.116147	58	0.171164
23	0.213955	41	0.110034	59	0.177277
24	0.195616	42	0.122260	60	0.177277
25	0.183390	43	0.116147	65	0.146712
26	0.171164	44	0.116147	70	0.116147
28	0.171164	45	0.103921	75	0.122260
27	0.152825	46	0.110034	80	0.165051
29	0.146712	47	0.110034	85	0.195616
30	0.140599	48	0.110034	90	0.171164
31	0.061130	49	0.116147	95	0.128373
32	0	50	0.122260	100	0.122260

33	0.122260	51	0.116147	105	0.122260
34	0.110034	52	0.122260		
35	0.116147	53	0.146712		

Cuadro 7. Datos obtenidos en la segunda prueba con carrizo como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
5	0.067243	38	0.073356	58	0.067243
10	1.204261	39	0.079469	59	0.055017
15	0.464588	40	0.067243	60	0.055017
20	0.262859	41	0.067243	65	0.055017
22	0.201729	42	0.073356	70	0.042791
23	0.18339	43	0.067243	75	0.042791
24	0.171164	44	0.067243	80	0.036678
25	0.165051	45	0.073356	85	0.024452
26	0.152825	46	0.073356	90	0.036678
27	0.140599	47	0.067243	95	0.030565
28	0.140599	48	0.067243	100	0.036678
29	0.134486	49	0.067243	105	0.024452
30	0.12226	50	0.055017	110	0.012226
31	0.12226	51	0.06113	115	0.018339
32	0.110034	52	0.067243	120	0.012226
33	0.110034	53	0.06113	125	0.006113
34	0.097808	54	0.067243	130	0
35	0.091695	55	0.06113	135	0.012226
36	0.085582	56	0.06113	140	0.036678
37	0.079469	57	0.06113		

Cuadro 8. Datos obtenidos en la primera prueba con llanta molida como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
5	0.238407	38	0.904724	58	0.317876
10	0.519605	39	0.868046	59	0.299537
15	1.033097	40	0.831368	60	0.287311
20	0.984193	41	0.79469	65	0.220068
22	0.941402	42	0.739673	70	0.171164
23	0.947515	43	0.690769	75	0.140599
24	0.959741	44	0.67243	80	0.103921
25	0.97808	45	0.629639	85	0.091695
26	1.002532	46	0.599074	90	0.085582

27	1.051436	47	0.568509	95	0.073356
27	1.106453	48	0.544057	100	0.067243
29	1.112566	49	0.513492	105	0.06113
30	1.118679	50	0.501266	110	0.042791
31	1.118679	51	0.464588	115	0.048904
32	1.094227	52	0.452362	120	0.042791
33	1.069775	53	0.421797	125	0.030565
34	1.026984	54	0.397345	130	0.024452
35	1.002532	55	0.372893	135	0.006113
36	0.959741	56	0.354554	140	0
37	0.929176	57	0.330102		

Cuadro 9. Datos obtenidos en la segunda prueba con llanta molida como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
5	0	37	0.617413	56	0.336215
10	0.287311	38	0.6113	57	0.323989
15	0.568509	39	0.605187	58	0.311763
20	0.55017	40	0.586848	59	0.299537
22	0.556283	41	0.580735	60	0.299537
23	0.562396	42	0.556283	65	0.232294
24	0.580735	43	0.537944	70	0.207842
25	0.586848	44	0.519605	75	0.171164
26	0.6113	45	0.501266	80	0.140599
27	0.635752	46	0.495153	85	0.12226
27	0.654091	47	0.476814	90	0.110034
29	0.813029	48	0.470701	95	0.097808
30	0.996419	49	0.446249	100	0.085582
31	0.666317	50	0.42791	105	0.073356
32	0.666317	51	0.403458	110	0.073356
33	0.666317	52	0.403458	115	0.06113
34	0.660204	53	0.385119	120	0.055017
35	0.654091	54	0.360667	125	0.055017
36	0.647978	55	0.348441		

Cuadro 10. Datos obtenidos en la prueba con toneles de 200L con grava como material.

tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹	tiempo (min)	concentración en gL ⁻¹
4	0.048904	118	3.796173	255	2.206793
8	0.024452	124	4.138501	262	2.151776
12	0.012226	130	4.535846	269	2.029516
16	0.012226	136	4.596976	276	1.943934
20	0.018339	142	4.76814	283	1.784996
24	0	148	4.865948	290	1.77277
28	0.042791	154	5.037112	304	1.662736
32	0.055017	160	4.982095	318	1.583267
36	0.042791	166	4.994321	332	1.34486
40	0.012226	172	4.651993	346	1.198148
46	0.018339	178	4.535846	360	1.106453
52	0.012226	184	4.352456	374	1.014758
58	0.012226	190	4.211857	388	0.91695
64	0.018339	196	4.022354	402	0.79469
70	0.036678	202	3.814512	416	0.702995
76	0.048904	208	3.60667	430	0.702995
82	0.152825	214	3.435506	450	0.641865
88	0.262859	220	3.190986	470	0.580735
94	0.446249	227	3.148195	490	0.48904
100	1.16147	234	2.952579	510	0.452362
106	2.310714	241	2.610251	530	0.36678
112	3.221551	248	2.396296		

En el Cuadro 11 podemos observar los parámetros resultantes con los datos obtenidos en las pruebas con los que podemos interpretar dichos datos generados para conocer la eficiencia de nuestro sistema de tratamiento viéndolo desde un punto de vista hidrodinámico.

Cuadro 11. Parámetros calculados con los datos obtenidos.

prueba	Ti/To	Tm/To	Tp/To	Tc/To	Tb/To	e	índice de Morrill
grava 1	0.1461	1.31578	0.76023	0.38011	0.07602	3.45029	5.25
grava 2	0.1461	0.58479	0.78947	0.39473	0.07894	2.36842	3.10
carrizo 1	0.0981	0.5106	0.19638	0.09819	0.01963	1.76747	18.00
carrizo 2	0.0981	0.29457	0.19638	0.09819	0.01963	2.45483	11.80
llanta molida 1	0.107	0.66867	0.66867	0.33433	0.0668	1.79033	6.50
llanta molida 2	0.2157	1.20793	0.64710	0.32355	0.06471	1.61777	5.33
Toneles 200L	0.5368	27.1140	20.6711	10.3355	2.06711	29.7449	3.12

A continuación se muestran las gráficas de dichas pruebas donde podemos observar la curva real para la determinación de tiempos de residencia, dichas curvas se generaron mediante los datos de tiempo y concentración mencionados anteriormente (Figuras 25 a 31) y así podremos observar el comportamiento del flujo dentro del filtro o columna.

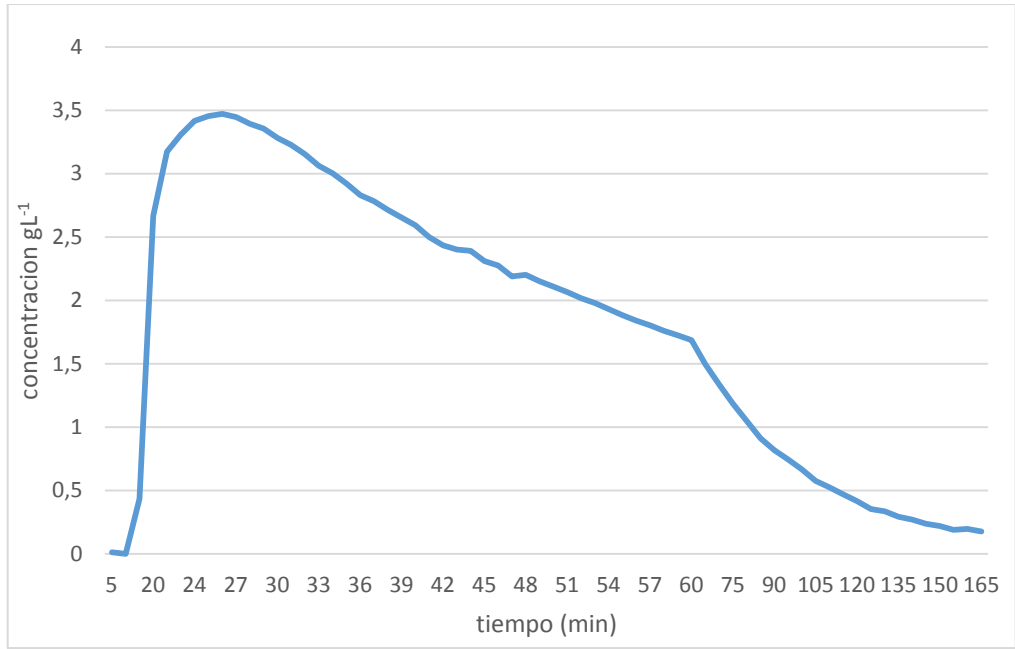


Figura 25. Gráfica de la prueba 1 con grava.

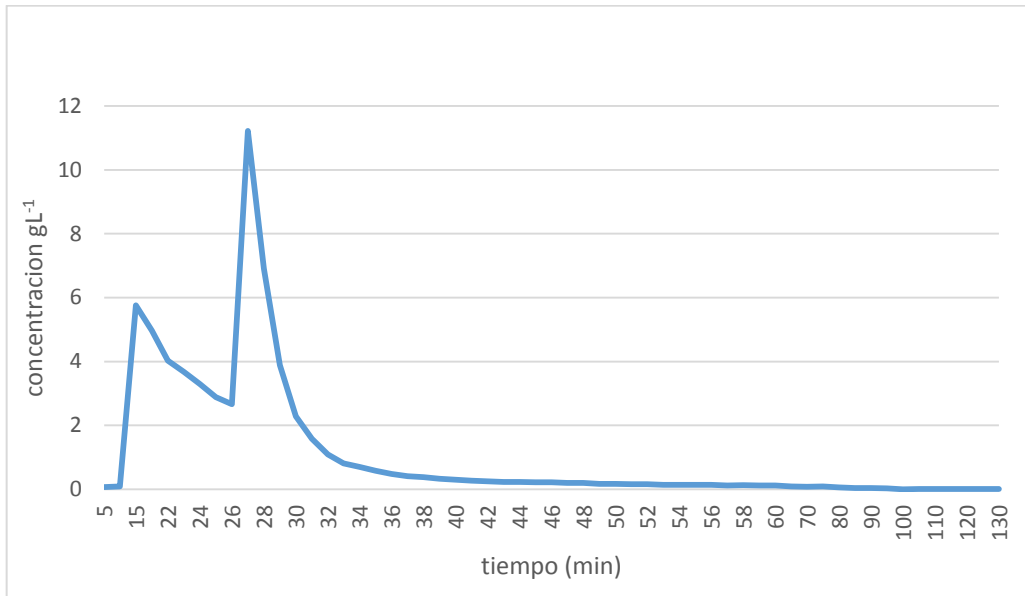


Figura 26. Gráfica de la prueba 2 con grava.

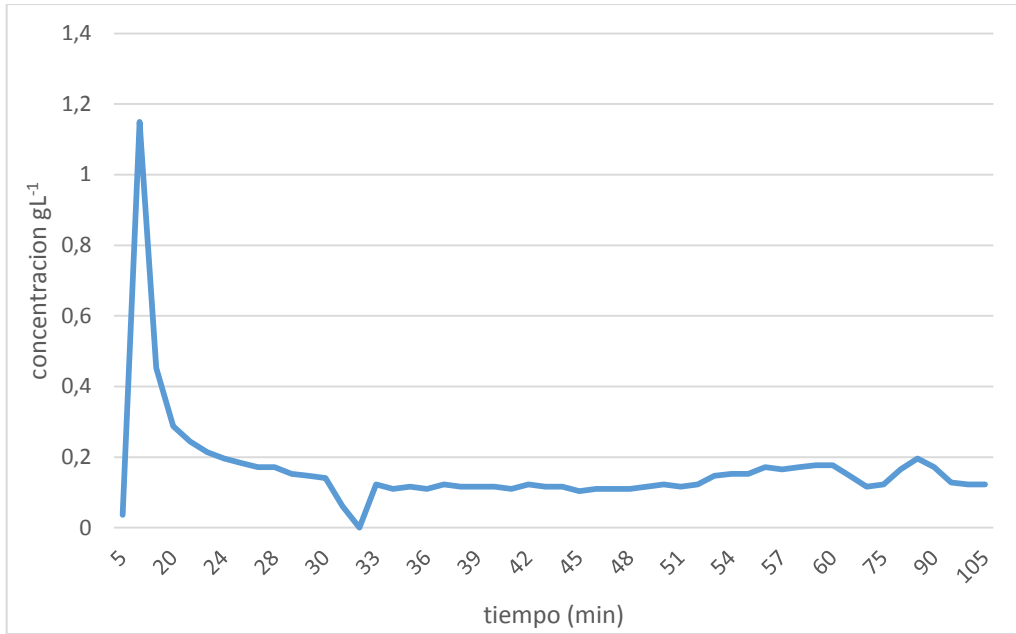


Figura 27. Gráfica de la prueba 1 con carrizo.

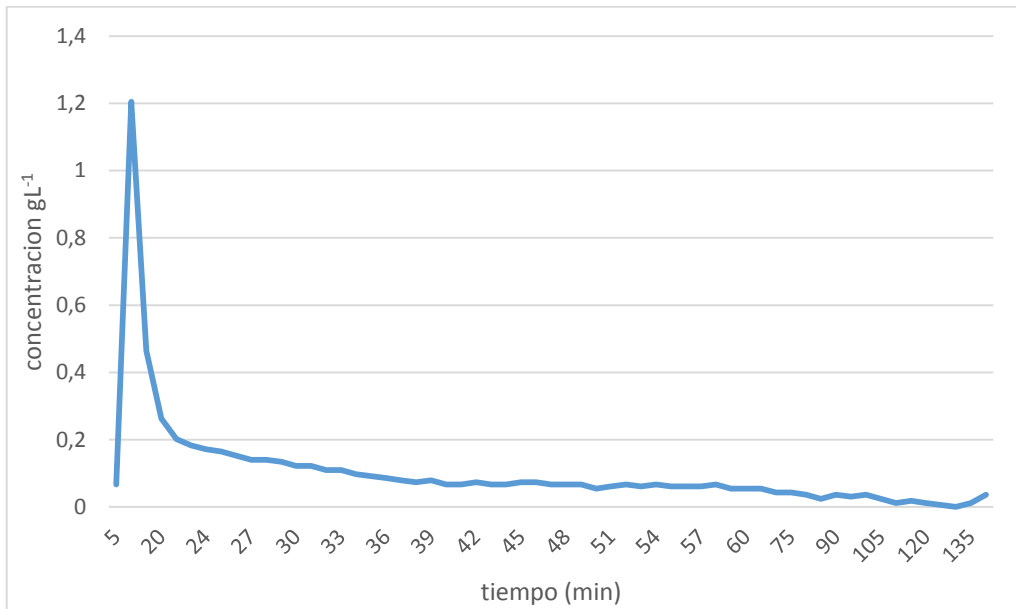


Figura 28. Gráfica de la prueba 2 con carrizo.

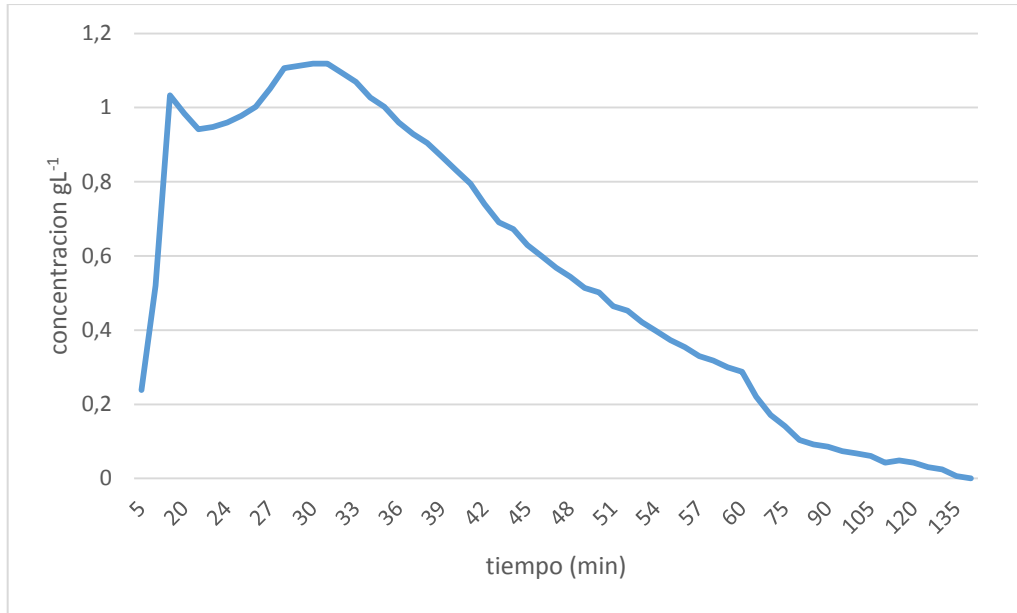


Figura 29. Gráfica de la prueba 1 con llanta molida.

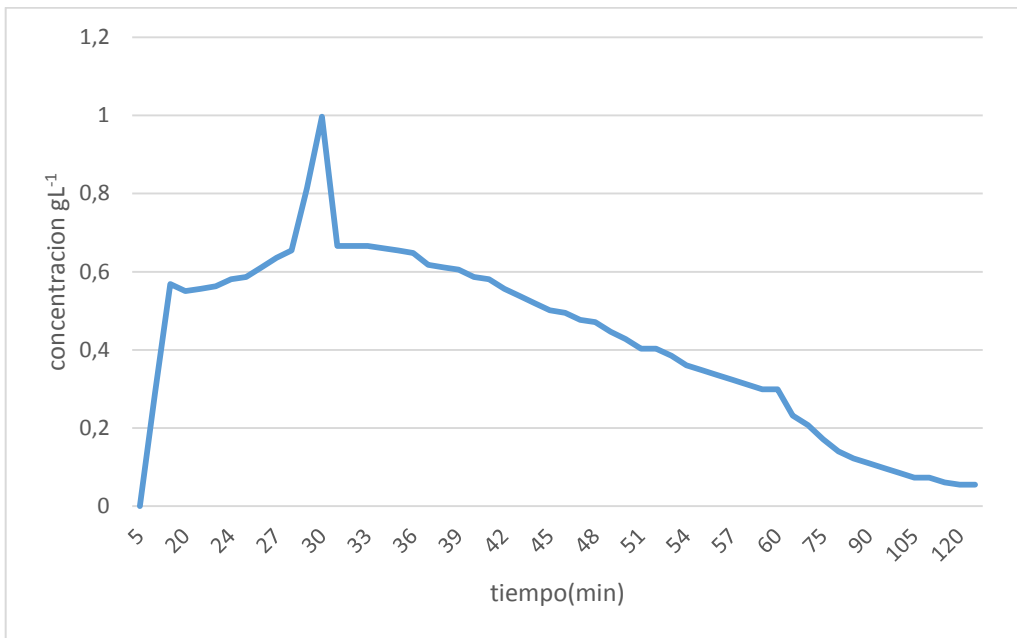


Figura 30. Gráfica de la prueba 2 con llanta molida.

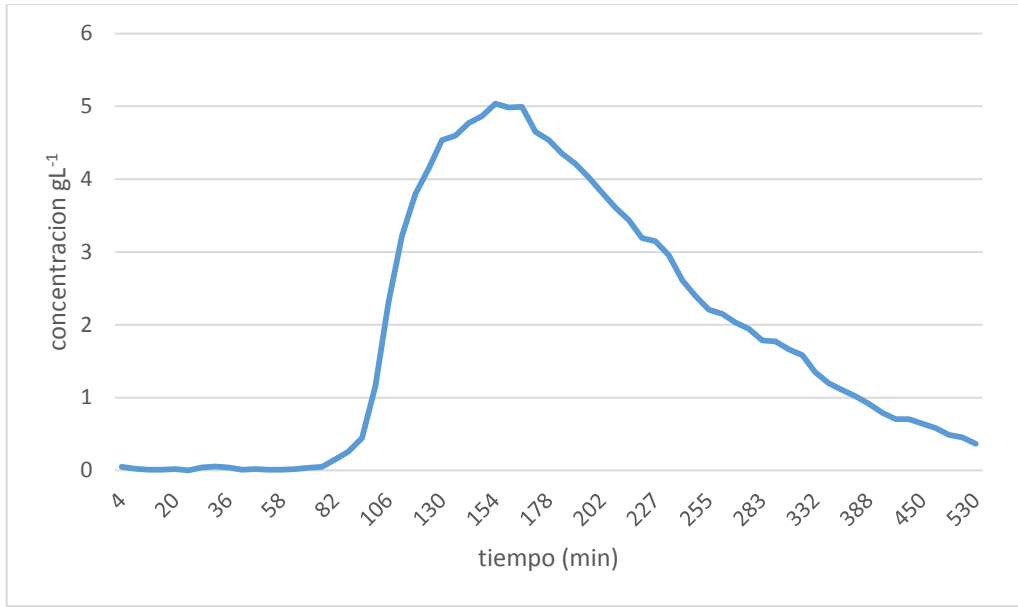


Figura 31. Gráfica de la prueba con toneles de 200L.

En las Figuras de la 32 a 38, se muestran las gráficas obtenidas por el programa QTRACER2 que son obtenidas por medio de la simulación de los datos obtenidos al momento de muestrear, ingresando estos datos podemos obtener nuestras curvas de determinación de tiempos de residencia (DTR)

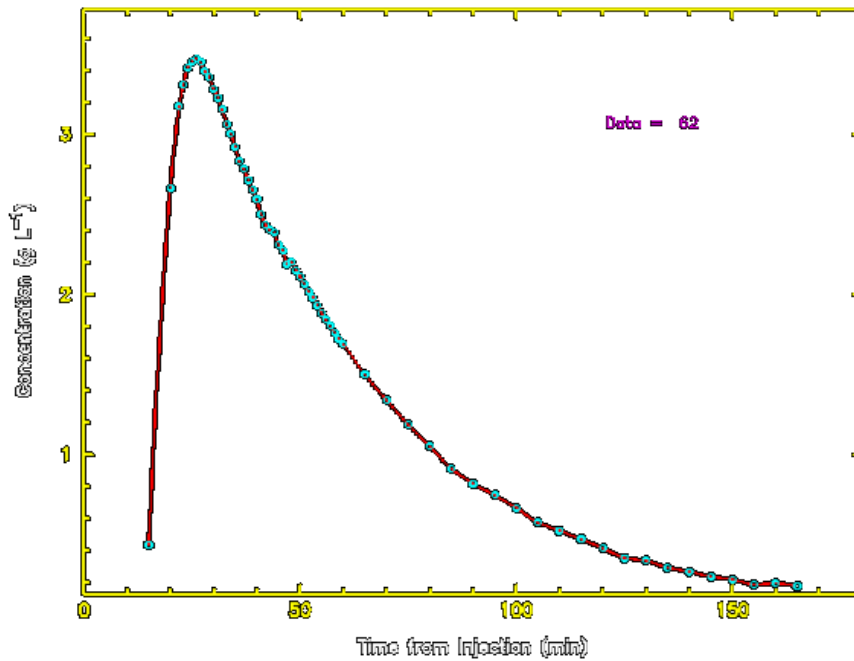


Figura 32. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 1 de grava.

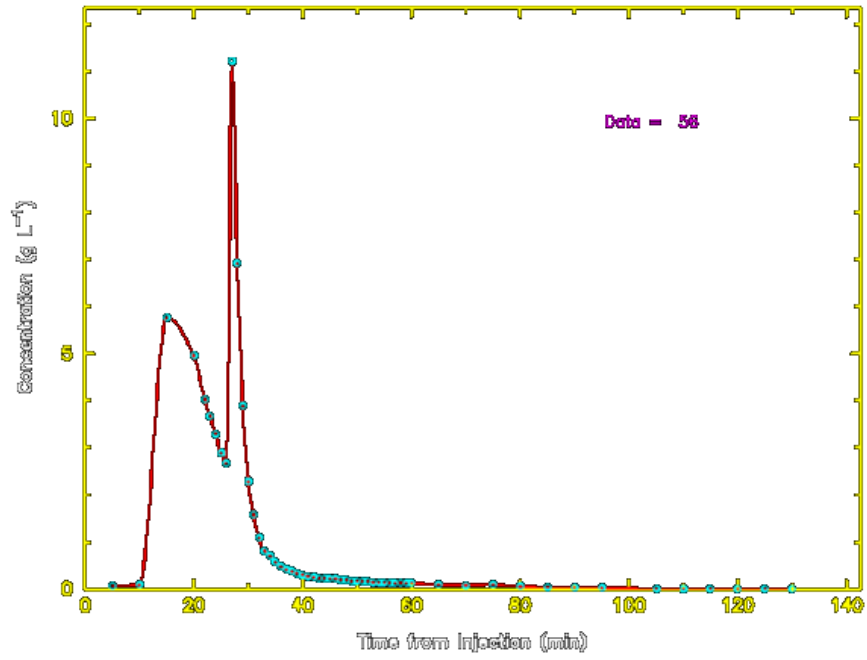


Figura 33. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 2 de grava.

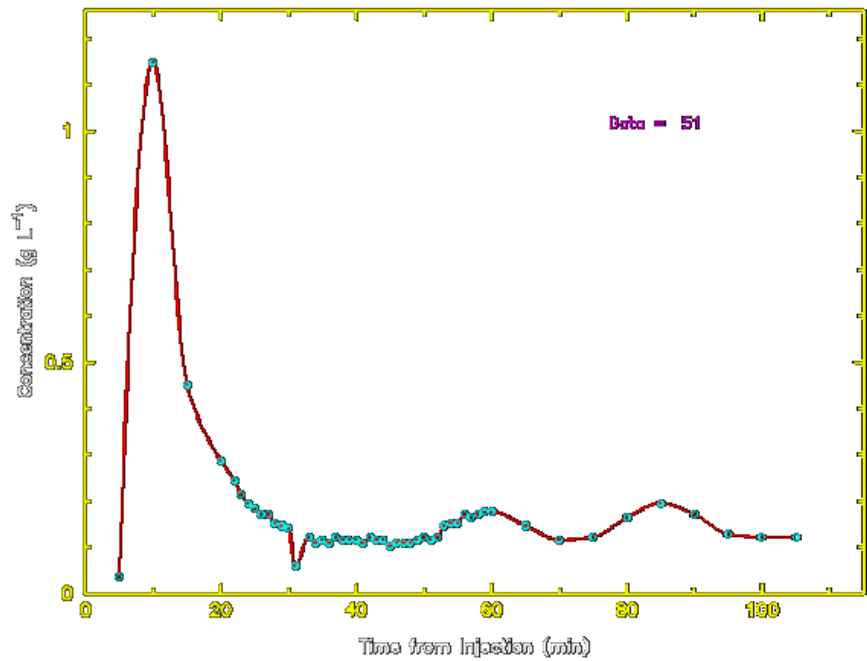


Figura 34. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 1 de carrizo.

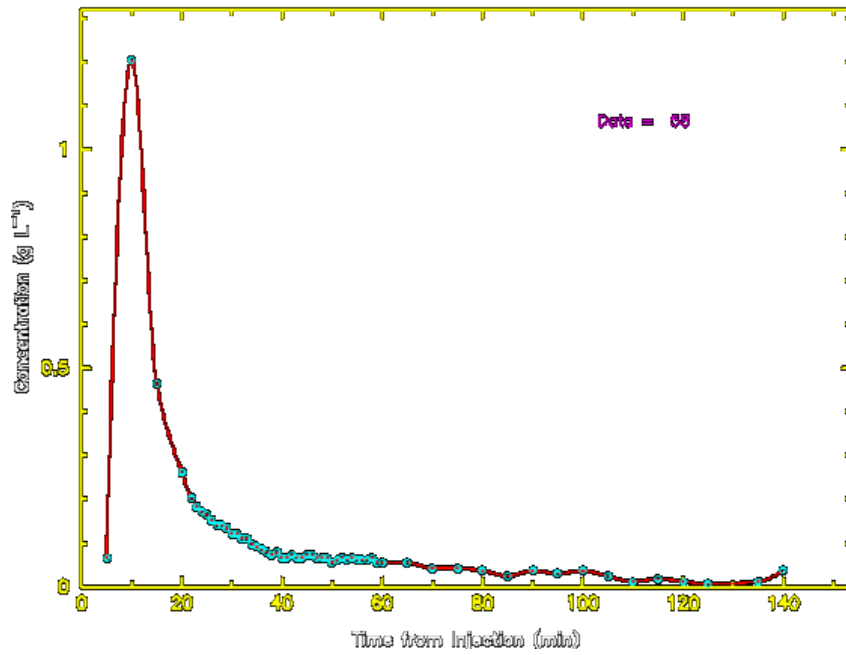


Figura 35. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 2 de carrizo.

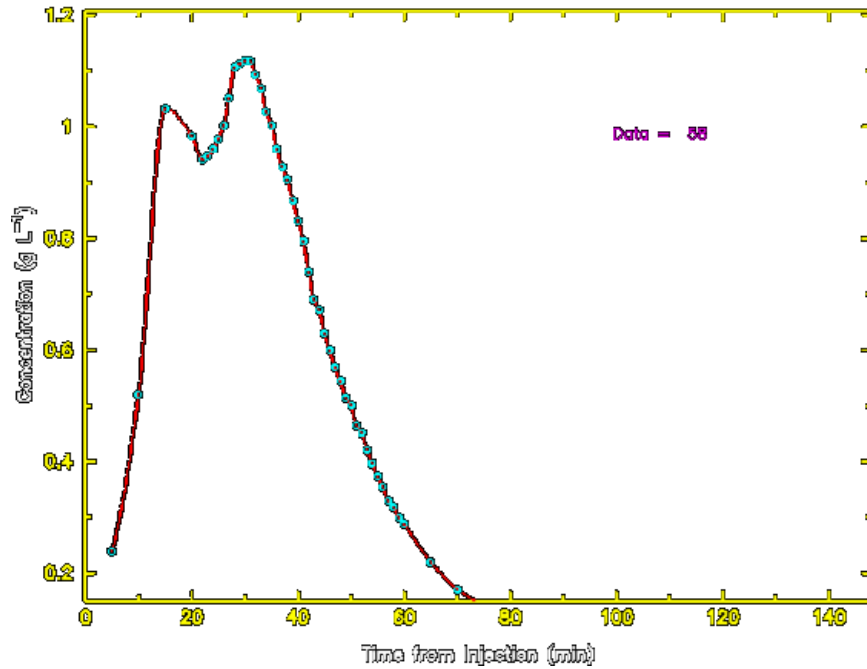


Figura 36. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 1 de llanta molida.

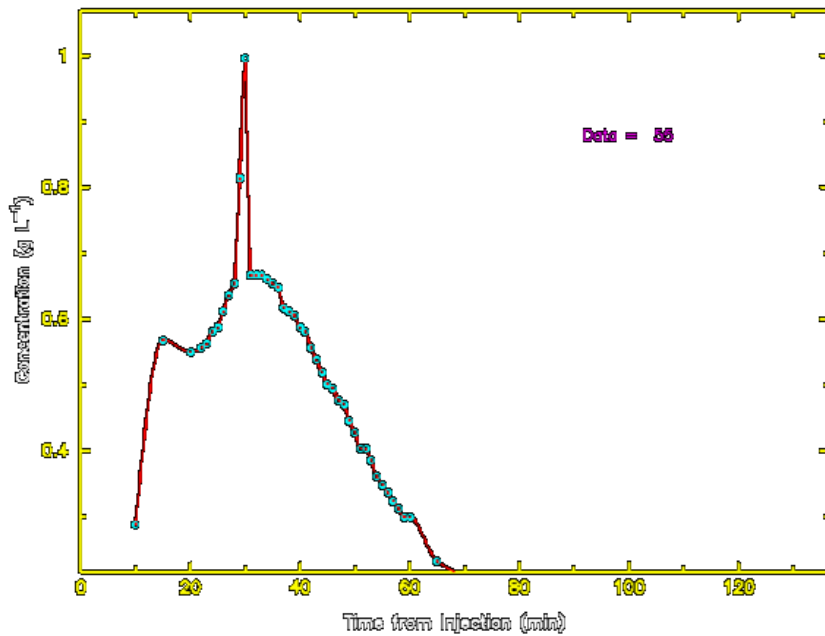


Figura 37. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba 2 de llanta molida.

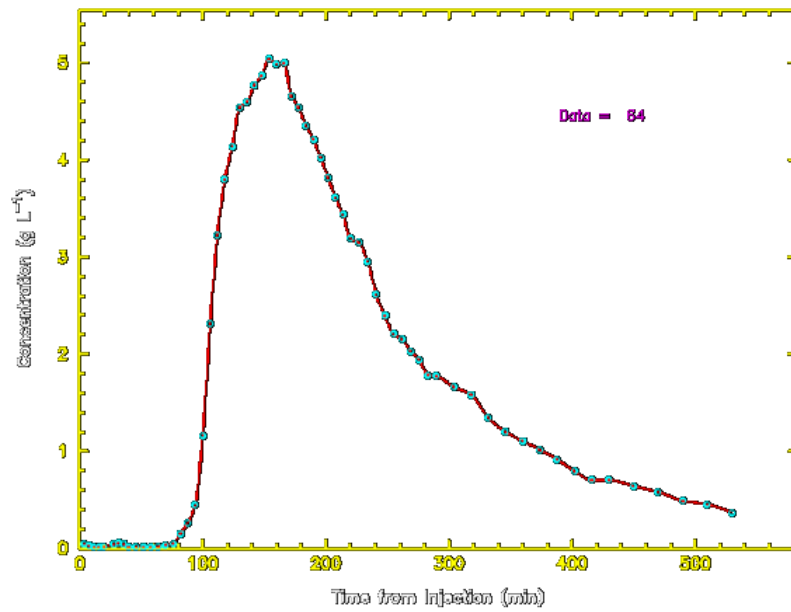


Figura 38. Curva generada por el programa QTRACER2 para la prueba de toneles de 200L.

Cuadro 12. Velocidades obtenidas en la toda la prueba realizada.

Prueba	Vel. calculada ms^{-1}	Vel. real ms^{-1}	Vel. simulada ms^{-1}
Grava 1	3.28×10^{-4}	7.30×10^{-4}	4.36×10^{-4}
Grava 2	3.15×10^{-4}	7.00×10^{-4}	3.02×10^{-4}
Carrizo 1	4.93×10^{-4}	10.96×10^{-4}	6.27×10^{-4}
Carrizo 2	5.31×10^{-4}	11.81×10^{-4}	8.91×10^{-4}
Llanta molida1	5.02×10^{-4}	11.17×10^{-4}	6.62×10^{-4}
Llanta molida 2	5.02×10^{-4}	11.17×10^{-4}	5.56×10^{-4}
Toneles 200L	0.80×10^{-4}	17.89×10^{-4}	10.84×10^{-4}

En el Cuadro 12 podemos observar los diferentes tipos de velocidades que obtuvimos en nuestra prueba, la velocidad calculada se refiere a la velocidad obtenida considerando el área total de la columna o filtro, la velocidad real se refiere a la velocidad calculada considerando la porosidad el material que se encuentra en el filtro que vendría siendo por donde en realidad pasa el flujo, la velocidad simulada es la que nos arroja el programa que toma en cuenta la porosidad y las concentraciones es por eso que observamos una diferencia en la velocidades ya que la variable independiente en todas es el área y es por eso que obtenemos diferencias en nuestras velocidades.

V. CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto es completamente natural, Al realizarse el proyecto propuesto, se alcanzará un gran beneficio para el ecosistema y un aporte valioso para el desarrollo de la institución por la importancia que tiene la depuración y reutilización de las aguas residuales de la UAAAN.

Los humedales artificiales son una buena alternativa para el tratamiento del agua residual, a bajo costo en construcción, operación y mantenimiento, tratando el agua por medio de procesos físicos, químicos y biológicos.

Con nuestros datos obtenidos podemos ver que si es posible calcular la curva para la determinación de tiempos de residencia y así poder evaluar hidrodinámicamente nuestro sistema de tratamiento de aguas residuales, ya que se puede modelar en el programa QTRACER2 nuestro sistema y obtener las diferentes variables que nos ayudaran a demostrar que nuestro sistema es o no factible para el tratamiento de aguas residuales.

Uno de los valores obtenidos en esta prueba fue el de la velocidad, esto nos indica cómo es el comportamiento del flujo dentro del sistema y con ello poder realizar los debidos ajustes al sistema para tener una mayor eficiencia y obtener los resultados deseados.

VI BIBLIOGRAFÍA

- Arias, C. 2004. Phosphorus removal in constructed wetlands: Can suitable alternative media be identified. Vol.2. pp. 655-662. 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Avignon (France)
- Cano-Castillo, L. P. 2010. Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio. Tesis de grado. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Conagua. (Comisión Nacional del Agua). 2007. Identificación de Sistemas Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Pág. 7-27.
- Conagua, 2011. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2011. México, D. F. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2011. 96pp.
- Delgadillo, O., M. Andrade, A. Camacho, L. Pérez y R Argote 2008. "Zonas húmedas construidas, una tecnología natural para la depuración de aguas residuales con fines de riego en municipios rurales y periurbanos" ponencia presentada en la "Reunión sudamericana para manejo y sustentabilidad de riego en regiones áridas", Salvador, Bahía-Brasil, del 21 al 23 de octubre de 2008.
- Hoffmann, H., Platzer.C., Winker, M., Von Muench, E. 2011. Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. En Línea en: http://ocw.unesco-ihe.org/pluginfile.php/643/mod_folder/content/0/Technology_Review_Wetlands.pdf?forcedownload=1
- Esponda. A. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, Universidad Autónoma Nacional de México, México. Rev.Int.Contam.Ambient.25 (3)157-167.
- Fernández, J. 2004. Manual de fitodepuración, Ayuntamiento de Lorca, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- García, E. 2004. Tratamiento de aguas industriales: Análisis microbiológico de aguas residuales, Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.
- García, J., Corzo, A. 2008. Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.

- Hincapié-Marín, D. L. 2007. Cinética e hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto. Trabajo de grado. Programa de química industrial, universidad tecnológica de Pereira.
- Lara, B. J. A. 2009. Introducción a los Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales, Bogotá, D.C. Colombia. En línea: <http://www.slideshare.net/jalarab/introduccion-sistemas-naturalespresentation>.
- Lara, J. A. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Lahora Cano, A. 2004. Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas. En línea en: www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT/g01/d01203/d01203.htm
- Llagas, W., Guadalupe E. 2006. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM. Disponible en: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf.
- Metcalf & Eddy. 1998. Ingeniería de Aguas Residuales. Tomo 1. Mc. Graw-Hill, 1998.
- Mena, j., Rodríguez, L., Núñez, j., Fernández, F.J., y Villaseñor, J. 2008. Design of horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands treating industrial wastewater. Proceedings of the Ninth International Conference on Modeling, Monitoring and Management of Water Pollution. Witpress, 672pp.
- Moreno, M. L., Fernández J. M. A., Rubio C. J. C., Calaforra, Ch. J. M., López G. J. A., Beas T. J., Alcaín, M. G., Murillo, D. J. M. y Gómez L. J. A. 2003. La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos. En línea en: http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm consultado en septiembre del 2015.
- Oswald, U. 2011. Retos de la investigación del agua en México. UNAM.CRIM. México.

- Pérez, A. y P. Torres. 2008. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaeróbicos de crecimiento en medio fijo. *Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 45, 27-40.
- Peña-Guzmán, C. A. 2012. Tratamiento de Aguas de Escorrentía Mediante humedales artificiales. *Ciencia e ingeniería Neogranadía*, 22(2), 39-61
- Romero, J. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C, Colombia.
- Romero, M. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*,
- Sabas-Ramírez, C. A. 2011. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira
- Sandoval-Cobo, J. J. y Peña, M. R. 2007. Análisis del desempeño de un humedal artificial de flujo subsuperficial en zonas tropicales basado en modelos hidráulicos y en cinética de primer orden. Seminario manejo integral de aguas residuales domésticas.
- Stearman, G., George DB, Carlson K, Lansford S. 2003. Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells en *Journal of Environmental Quality*, No 32, pp. 1548-1556.
- Valdés, M.D. Curt y J. Fernández 2005 "Tolerancia de *Phragmites* y *Typha* a la contaminación del agua" en Memoria del Encuentro Internacional en Fitodepuración, Lorca.