

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Diseño, Construcción y Evaluación Hidrodinámica de un Humedal Artificial de Flujo Vertical a Escala Piloto

Por:

CRISTIAN JOVANY RUIZ SERRATO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Diseño, Construcción y Evaluación Hidrodinámica de un Humedal Artificial de
Flujo Vertical a Escala Piloto

Por:

CRISTIAN JOVANY RUIZ SERRATO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

Aprobada por el Comité de Asesoría:



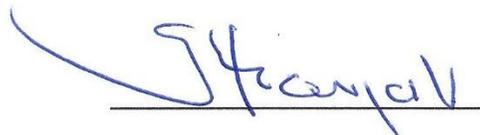
Dr. Luis Samaniego Moreno

Asesor Principal



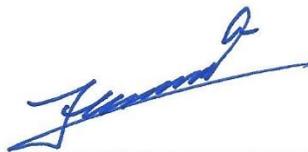
M.C. Aaron Isain Melendres Alvarez

Coasesor



Dr. Sergio Zeferino Garza Vara

Coasesor



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2019

DEDICATORIAS

A mis padres

Ellos que son mis padres y amigos a la vez, les debo muchas cosas y entre esas está el a verme apoyado en mi etapa de universitario, a ustedes les dedico esta pequeña parte de mi proyecto de vida, con amor y cariño su hijo Cristian.

José Guadalupe Ruiz y Bertha Serrato

A mi esposa

A ella que se ha convertido en mi compañía de toda la vida, por el apoyo incondicional ofrecido y por estar ahí cuando más lo necesito. Con mucho amor tu esposo Cristian.

Alejandra Castro Alonso

AGRADECIMIENTO

A Dios

Por darme la dicha de haber logrado esta etapa de mi vida, de haber conocido a muchas personas buenas, muchas gracias dios mío y que siempre estuviste ahí cuando más te ocupe.

A mi “Alma Mater” la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por darme la oportunidad de ser alguien en la vida y obtener una licenciatura, a ella que me tendió la mano cuando más lo necesité y sentía que iba a terminar en el fracaso, ahí estuviste ofreciéndome casa, comida y también ahí conocí muchas amistades buenas que nunca olvidare, Gracias alma mater.

A mis hermanos

A ellos por el cariño que me han dado y el apoyo que me dieron. Gracias por las palabras de aliento y consejos que me han brindado durante toda mi vida y en particular en los últimos cuatro años de mi formación profesional, estoy eternamente agradecida con ustedes, siempre los llevare en mi pensamiento y corazón y daré todo para que sigan orgullosos de mí.

Eduardo Antonio, Noé, Marcos Antonio, Rene y Aneth Guadalupe Ruiz Serrato

A mis tíos

A ellos por todo su apoyo que me han brindado, porque cuando más acupe económicamente, ustedes estuvieron ahí, muchas gracias por todo, a ustedes también les dedico esta culminación de unas de las etapas más hermosas de mi vida. Gracias.

Baltazar Serrato, Noé Ruiz, Samuel Ruiz

Amiga

Regina Martínez Mares, gracias por estar conmigo en todos los bellos y buenos momentos que compartí contigo, eres esa persona que conocí como cualquier desconocida y que en muy poco tiempo te convertiste en esa segunda hermana que nunca tuve, te aprecio y al igual que te admiro por tu valor e inteligencia. Muchas gracias por tu amistad.

Amigo

Amando de Jesús Hernández Velasco, gracias por todo carnal tu comprensión por tu amistad que se convirtió más que en eso, se transformó en una hermandad, lo estimo y admiro mucho, le estaré eternamente agradecido por esos consejos y palabras que me extendió cuando más lo necesitaba. Muchas gracias por su amistad

Amigos

Víctor Hugo López Gutiérrez, Ángel Rivera Pérez, Cesar Ashmed Galicia González, Rafael Pérez López, Pablo Marroquín Morales, Esteban Alcocer Mendoza. por el apoyo y confianza que me brindaron en este tiempo, espero seguir contando con su amistad. Muchas gracias.

A mi Asesor principal

A el Dr. Luis Samaniego Moreno, por darme la oportunidad de hacer mi proyecto de tesis con él, además por su amistad que me ha brindado y sobre todo su confianza, en el he encontrado un buen amigo para toda la vida. Muchas gracias.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivo específico.	3
1.2 Hipótesis.....	3
II. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1 Agua en el mundo.....	4
2.2 El agua en México.	5
2.3 Principales usos del agua en México.....	6
2.4 Aguas residuales.	7
2.5 Importancia del agua residual.....	10
2.6 Reutilización de las aguas residuales tratadas.....	10
2.7 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.	12
2.7.1 Convencionales.....	13
2.7.2 Naturales	15
2.8 Sistema de tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales...	20
2.8.1 Flujo superficial.	21
2.8.2 Flujo subsuperficial.....	22
2.9 Funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.....	24
2.10 Evaluación hidrodinámica de un humedal artificial.	25
2.10.1 Trazadores.	25
2.10.2 Tiempos de retención hidráulico (TRH).	27
2.10.3 Distribución de tiempos de residencia (DTR).	28

2.10.4 Factores que afectan a la hidrodinámica de los humedales artificiales.	29
III. MATERIALES Y METODOS	31
3.1 Ubicación del humedal artificial.	31
3.2 Construcción del humedal artificial.	32
3.2.1 Construcción.	32
3.2.2 Materiales.	38
3.3 Evaluación hidrodinámica del humedal.	41
3.3.1 Recolección de datos.	43
3.3.2 Interpretación de la curva DTR y su aplicación.	43
3.3.3 Modelo de dispersión.	47
3.3.4 Modelo de Wolf-Resnick.....	49
3.3.5 Normalización de las curvas DTR.	51
IV. RESULTADOS.....	53
4.1 Cálculos previos.	53
4.1.1 Volumen total y útil del humedal.....	53
4.1.2 Concentración del trazador.	54
4.1.3 Curva de calibración de conductividad vs concentración.	54
4.1.4 Porosidad del lecho.	55
4.1.5 Tiempo de retención hidráulico teórico (TRH).	56
4.2 Evaluación sin grava.....	56
4.2.1 Análisis de la curva de DTR.	56
4.2.2 Modelo de dispersión.	60
4.2.3 Modelo de Wolf-Resnick.....	60
4.3 Evaluación con grava.	61
4.3.1 Análisis de la curva de tendencia DTR.....	61
4.3.2 Modelo de dispersión.	65
4.3.3 Modelo de Wolf-Resnick.....	65
4.4 Evaluación con grava y planta.	66
4.4.1 Análisis de la curva de tendencia DTR.....	66
4.4.2 Modelo de dispersión.	70

4.4.3 Modelo de Wolf-Resnick.....	70
V. DISCUSIONES	71
VI. CONCLUSIONES	78
VII. RECOMENDACIONES	79
VIII. LITERATURA CITADA.....	80

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Los recursos de agua.....	11
Cuadro 2.- Lista de materiales para la construcción del humedal.....	40
Cuadro 3.-Principales parámetros para tener en cuenta en la curva concentración vs tiempo.....	45
Cuadro 4.- Criterios de caracterización de flujo.	46
Cuadro 5.- Dimensiones, volumen total del sistema y volumen de porosidad. .	53
Cuadro 6.- Porcentaje de porosidad.	55
Cuadro 7.- Tiempo de retención hidráulico teórico.	56
Cuadro 8.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de la DTR en la prueba sin grava.....	57
Cuadro 9.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR sin grava.	58
Cuadro 10.-Resultados del modelo de dispersión sin grava.	60
Cuadro 11.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick sin grava.	60
Cuadro 12.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de tendencia de la curva de distribución de trazador de la prueba con grava.	62
Cuadro 13.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR con grava.	63
Cuadro 14.- Resultados del método de dispersión con grava.	65
Cuadro 15.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick con grava.	66
Cuadro 16.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de tendencia de la curva de distribución de trazador de la prueba con grava y planta.....	67
Cuadro 17.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR con grava y planta.....	68
Cuadro 18.- Resultados del método de dispersión con grava y planta.	70

Cuadro 19.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick con grava y planta. 70

Cuadro 20 .- Comportamiento hidrodinámico para cada prueba. 73

Cuadro 21.- Comparación de los resultados de las relaciones paramétricas experimentales de los tiempos, con el método de momentos en las tres pruebas. 74

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Distribución del agua en el mundo (PNUMA, 2007).	5
Figura 2.- Distribución de los porcentajes, para cada uno de los usos de agua (CONAGUA, 2010).....	7
Figura 3.- Pretratamiento en la depuración de aguas (Juračka, 2011).	13
Figura 4.- Floculación en la superficie (Juračka,2011).....	14
Figura 5.- Tratamiento secundario (Juračka,2011).	14
Figura 6.- Tratamiento terciario (Lara, 2018).	15
Figura 7.- Esquema proceso de depuración de aguas (Juračka,2011).....	15
Figura 8.- Sintetización de los distintos tipos de humedales artificiales (Delgadillo et al., 2010).	21
Figura 9.- Humedal artificial de flujo superficial (Delgadillo et al., 2010).....	22
Figura 10.- Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo et al., 2010).23	
Figura 11.- Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical (Delgadillo et al., 2010).....	24
Figura 12.- Representación estímulo-respuesta.	26
Figura 13.- Representación gráfica de la señal pulso a la entrada y salida (Beat et al., 2016).	26
Figura 14.- Representación gráfica de las señales escalón (Beat et al., 2016). 27	
Figura 15.- Esquema del proceso estímulo-respuesta (Sabas, 2011).	28
Figura 16.- Curva de distribución de tiempos de salida del trazador (tiempo vs concentración) (Torres, 2011).	29
Figura 17.- Ubicación de la UAAAN con respecto a Saltillo.....	31
Figura 18.- Localización del humedal en relación con la UAAAN.	31
Figura 19.- Condiciones iniciales del área.	32
Figura 20.- Acondicionamiento del área.	32
Figura 21.- Dimensiones del área de experimentación.....	33
Figura 22.- Diagrama de los blocks que se utilizaron.	33
Figura 23.- Posición de los blocks en la construcción del pilar.	33

Figura 24.- Altura de cada pilar.....	34
Figura 25.- Posición, forma y perforaciones de los drenes.	35
Figura 26.- Parte inicial del sistema.	36
Figura 27.- Parte intermedia del sistema.	36
Figura 28.- Humedal artificial terminado.	36
Figura 29.- Distribución de agua por los drenes.	37
Figura 30.- Humedal sin grava funcionando.	37
Figura 31.- Llenado de los toneles con grava.	37
Figura 32.- Tule plantado en el sistema.....	38
Figura 33.- Diseño del humedal artificial.....	39
Figura 34.- Longitud y desnivel de la distancia del tanque Imhoff al sistema. ..	41
Figura 35.- Sonda multiparamétrica tomando lecturas durante una prueba.	43
Figura 36.- Esquema conceptual de los tiempos de residencia en la distribución de tipos de flujo (Gómez et al., 2013).	44
Figura 37.- Representación de la curva C, predichas por el modelo de dispersión (Peralta, 2008).	48
Figura 38.- Curva F (Sánchez et al., 2009).....	50
Figura 39.- Curva de 1-F cantidad de trazador que permanece en el sistema (Pérez, 1992).	51
Figura 40.- Curva de calibración.....	55
Figura 41.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba sin grava.....	59
Figura 42.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba con grava.....	64
Figura 43.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba con grava y plantas.....	69
Figura 44.- Comparación de las curvas DTR normalizadas.....	76
Figura 45.- Comparación de las curvas DTR experimentales.....	77

RESUMEN

La evaluación hidrodinámica es muy importante para detectar las características y eficiencia de un humedal, ya que a través de ésta, se determina el tipo de flujo, tiempo de residencia, existencia de zonas muertas y cortos circuitos, ya que estos dos últimos influyen en el tiempo de residencia del humedal.

El sistema se construyó con la finalidad de tratar el efluente de un tanque Imhoff localizado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). El humedal artificial se compone de un cuerpo principal que son tres toneles con capacidad de 220 L cada uno, que servirán de filtros o medios depuradores de contaminantes, los toneles están a diferente altura con respecto al piso.

El experimento consistió en tres pruebas (sin grava, con grava, grava y plantas) de estímulo respuesta, analizando la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) con el método de momentos, modelo de distribución y el modelo de Wolf-Resnick. En las pruebas se utilizó NaCl como trazador.

La evaluación del comportamiento hidrodinámico del sistema con el método de momentos, modelo de dispersión y modelo Wolf-Resnick, demostraron que, en las tres pruebas se detectó la presencia de flujo dual, es decir, que hay un porcentaje de flujo pistón y un porcentaje de flujo mezclado, pero con mayor presencia de este último. También es de recalcar que la presencia de zonas muertas en las tres pruebas dio como resultado números negativos, y en menor medida cortos circuitos y recirculación del flujo dentro del sistema.

En este trabajo se concluyó que, al disminuir el espacio poroso dentro del sistema, debido a la grava y al volumen radicular de la planta colocada, fue aumentado el flujo pistón, disminuyendo el tiempo de residencia y la dispersión.

Palabras clave: Humedal artificial, flujo pistón, flujo mezclado, corto circuito, distribución de tiempos de residencia (DTR), modelo de dispersión.

ABSTRACT

Hydrodynamic evaluation is very important to detect the characteristics and efficiency of a wetland, since through it, the type of flow, residence time, dead stock, short circuits are determined since these last two influences time of residence of the wetland.

The system was built with the purpose of treating the effluent of a primary treatment (Imhoff Tank) owned by the UAAAN, the artificial wetland is composed of a main body that is three barrels of capacity of 220 L each, which will serve as filters or pollutant purification means, the barrels are on pillars at different heights each.

The experiment involves three tests (without gravel, with gravel, gravel and plants) of stimulus response, analyzing the residence time distribution curve (DTR) with the moment method, distribution model and the Wolf-Resnick model, in the tests NaCl was used as a tracer.

The evaluation of the hydrodynamic behavior of the system in the method of moments, dispersion model and Wolf-Resnick model, showed that, in the three tests, the presence of dual flow was detected, that is to say that there is a percentage of piston flow and a percentage mixed flow, but with greater presence of the latter. It is also noteworthy that the presence of dead zones in the three tests resulted in negative numbers, which shows that there are dead zones, and in less presence of short circuits, in addition to the existence of recirculation of the flow within the system.

In this work it was concluded that, as the porous space within the system was reduced, due to the gravel and the root volume of the placed plant, the piston flow was increased, reducing the residence time and the dispersion.

Keywords: Artificial wetland, piston flow, mixed flow, short circuit, residence time distribution (DTR), dispersion model.

I. INTRODUCCION

Existe una gran demanda de recursos hídricos a nivel mundial. El 60% del agua dulce disponible en el planeta se destina a la agricultura, el 22% a la industria y el 8% al consumo doméstico (UNESCO, 2003). Diversos aspectos como la mala distribución temporal y espacial de la precipitación o la degradación de las zonas verdes conllevan a la actual situación de desequilibrio del agua. Países en desarrollo como el nuestro, enfrentarán una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas debido al crecimiento demográfico (Tromben, 2010). Así, la búsqueda de nuevas alternativas de aguas crecerá, sobre todo para la agricultura, sector que demanda el mayor porcentaje (García *et al.*, 2017).

Por otra parte, la disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representan un problema cuya magnitud está en constante crecimiento (FAO, 2014). Encarar este problema plantea un dilema crucial, ya que, por un lado, el agua residual se constituye en una fuente alternativa e importante para el riego de los cultivos, pero, por otro lado, su uso para este fin sin un adecuado tratamiento puede constituirse a su vez en un problema mayor (UNESCO, 2003).

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento diseñados para el control y remoción de contaminantes en vertederos. Han sido considerados desde la década de los años noventa, como una opción tecnológica apropiada para implementar en países en vías de desarrollo (Habert, 1999).

En la actualidad, existen dos tipos de humedales artificiales; los de flujo superficial y los de flujo subsuperficial, estos últimos tienen una mayor eficiencia por lo cual son los más comunes en el tratamiento de aguas residuales, los humedales subsuperficiales a su vez se dividen en dos grupos: los de flujo horizontal y de flujo vertical (Reija, 2013). Cada una de estas categorías cuenta con importantes variantes de acuerdo con la disposición, la forma de alimentación del caudal, plantas y patrones de flujo (Kadlec *et al.*, 2009).

Los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical constituyen una buena opción de saneamiento para comunidades que tienen tratamiento primario (fosa séptica, tanque Imhoff, lagunas anaerobias, entre otros) y tienen la capacidad de reducir la contaminación de los cuerpos de agua y buscan conseguir un efluente de calidad superior para poder reusarlo en agricultura (Tilley *et al.*, 2018). Los sistemas de flujo vertical tienen la ventaja de que puede operar con cargas superiores a los de flujo subsuperficial horizontal y requieren menos área superficial para tratar un mismo caudal, además un mínimo personal para su mantenimiento y costes bajos (Segura, 2017).

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivo general.

Diseñar, Construir y evaluar la hidrodinámica de un humedal artificial subsuperficial de flujo vertical, para el tratamiento natural de aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

1.1.2 Objetivo específico.

Determinar tiempos de residencia del humedal artificial con tres escenarios; sin grava, con grava, con grava y plantas.

1.2 Hipótesis.

Hi: La adición de grava combinado con plantas, modifica la hidrodinámica del sistema.

Ho: La adición de grava combinado con plantas, no modifica la hidrodinámica del sistema.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Agua en el mundo.

El agua es un elemento esencial para la vida en el planeta, es un recurso natural no renovable, los seres humanos dependen de su disponibilidad no solo para consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (Toledo, 2002). Consumo de agua en las últimas décadas ha ido en aumento, con la finalidad de producir más alimento y energía, así como de dotar de servicios de agua potable a poblaciones más numerosas (Shiklomanov, 2000).

Se ha estimado que en el planeta existe alrededor de 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua, de los cuales el 2.5 % corresponde a agua dulce, el resto se encuentra en los océanos, esa pequeña parte de agua dulce se encuentra distribuida principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del mundo (Shiklomanov, 2000).

La Figura 1 muestra que, del agua dulce existente en el planeta, el 68.7% se encuentra en los glaciares, el 30% corresponde a agua subterránea, el 0.8% permafrost, y solo el 0.4% a aguas superficiales y en la atmosfera (PNUMA, 2007). La subterránea representa un importante volumen de agua dulce no congelada que resulta importante como abastecimiento de arroyos, manantiales y humedales que, solo retienen el 1% del agua dulce no congelada (Carabias, 2005).

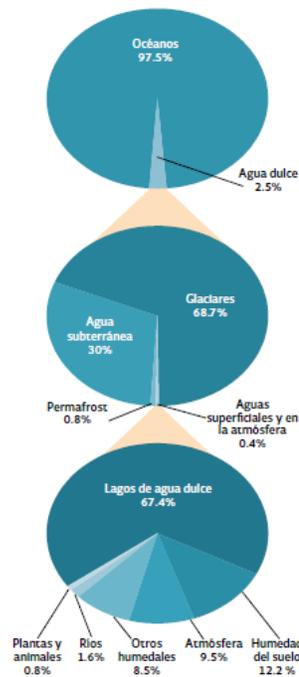


Figura 1.- Distribución del agua en el mundo (PNUMA, 2007).

Solamente el 0.007% del agua del planeta se encuentra disponible para uso directo de los seres humanos siendo un total de 4,200 km³, esta cantidad dividida entre 6,000 millones de habitantes representa un volumen de 700 m³ por persona por año (Toledo 2002), sin embargo esta cifra promedio no refleja la disponibilidad real del agua para todos los habitantes del planeta debido a que el agua se distribuye de manera geográfica, no de manera administrativa, es decir, la distribución del agua depende de la altitud, latitud, clima entre otros factores ambientales (Iglesias, 2015).

2.2 El agua en México.

El país con una superficie de casi dos millones de kilómetros cuadrados presenta una precipitación anual de 772 mm la cual es igual a 1528 km³(Jiménez *et al.*, 2004). Del agua que se precipita sobre el territorio mexicano, 23% se transforma en escurrimiento superficial, la lluvia se infiltra y se estima que 75 km³ forma el recurso renovable de los acuíferos (Arreguín *et al.*, 2004). Es importante destacar que el 67% de la lluvia se presenta en tan solo cuatro meses del año, lo que

dificulta el aprovechamiento y ha obligado a la construcción de la infraestructura necesaria para la captación y distribución del líquido (SEMARNAT, 2018).

En el país, el mayor crecimiento poblacional y económico se ha generado en las zonas con menor disponibilidad de agua; así en el centro y norte, donde se tiene el 31% de la disponibilidad de agua nacional se concentra el 77% de la población, a diferencia de la zona sureste, donde el 23% de la población cuenta con el 69% del recurso disponible (CNA, 2007).

2.3 Principales usos del agua en México.

La administración del agua en el sentido de saber las cantidades de agua en el tiempo requiere la medición tanto de volumen como de flujos volumétricos (Flores, 2008).

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir. De la misma forma, la distribución de los usos varía a lo largo del territorio nacional, ya que en todo el país varía la forma de actividad diaria (Gaona, 2011).

Los usos que se pueden dar al agua son variados y se clasifican en (Vega, 2010):

1. Consumo humano (bebida, cocina y procesamiento de alimentos).
2. Limpieza personal.
3. Cultivo de peces, mariscos o cualquier tipo de vida acuática.
4. Agricultura.
5. Industria.
6. Municipales (Riego de jardines, lavado de coches, fuentes de ornato, lavado de calles e instalaciones públicas).
7. Recreativos.
8. Transporte de desechos.

El volumen de agua que se usa en México es tan solo el 17% del agua disponible, el resto se desperdicia, la mayoría termina en los océanos que lo rodean (CONAGUA, 2012). El agua en el país se obtiene de dos fuentes; una de ellas es

la subterránea y la segunda de la recolección en cuencas naturales (Rolland *et al.*, 2009). En la Figura 2 se muestra que en el país se destina para las actividades agropecuarias el 76.7%, le sigue el uso para el abastecimiento público con 14.1% del volumen total de agua extraída, el industrial con 4.1%, para el uso termoeléctrico 5.1%, a estos usos se le denomina como usos consultivos, los cuales se caracterizan porque en el proceso hay pérdidas volumétricas de agua y el agua que se utiliza para las plantas hidroeléctricas es considerada como no consultivo (CONAGUA, 2010).

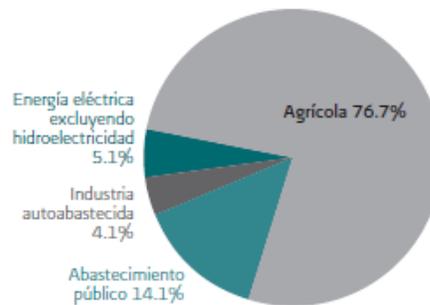


Figura 2.- Distribución de los porcentajes, para cada uno de los usos de agua (CONAGUA, 2010).

2.4 Aguas residuales.

Las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consiste en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimiento comerciales e instituciones, incluidos hospitales, efluentes industriales, aguas pluviales, y escorrentías agrícolas, hortícolas y acuícola (UNESCO, 2017).

Las aguas residuales son la acción y efecto en la que el hombre introduce materiales contaminantes; implicando alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica (Díaz *et al.*, 2012). El agua residual está compuesta de componentes, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (iagua, 2017).

Las aguas residuales son aquellas que por uso del hombre representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos (Rivas, 1978).

Dentro de este concepto se incluyen aguas con diversos orígenes (Espigares *et al.*, 1985):

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humana, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.

- Aguas blancas: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calle, parque y lugares públicos.

- Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal.

- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en la zona rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, para riego agrícolas con o sin un tratamiento previo.

Las aguas residuales también pueden ser una fuente rentable y sostenible de energía, nutriente y materia orgánica, entre otros subproductos útiles (Rama, 2013). Los potenciales beneficios de la extracción de dichos recursos van mucho más allá de la salud humana y medioambiental, con posibles repercusiones en la seguridad alimentaria y energética, así como también en la mitigación del cambio climático (UNESCO, 2017).

Las aguas residuales tienen tres grupos de características que se pueden tener en cuenta para los diferentes componentes del agua de las cuales se puede resaltar las características químicas (Muñoz, 2008):

-Físico.

-Químico.

-Biológico.

Características químicas.

Materia orgánica.

Constituye la tercera parte de los elementos de las aguas residuales, siendo los principales compuestos que se pueden hallar (Muñoz, 2007):

- Proteínas (40-60 %).
- Carbohidratos (25- 50 %).
- Grasas y aceites (10 %).

En las aguas residuales urbanas, la urea y el amoníaco constituyen las principales fuentes de nitrógenos, junto con las proteínas. La materia orgánica también puede aportar azufre, hierro y fosfato (Morales, 2001).

Otros compuestos importantes son los azúcares como la glucosa, lactosa, sacarosa, fructosa, galactosa; y los ácidos como el acético, propiónico, butírico, láctico y cítrico. También se pueden encontrar celulosa, almidón y lignina (Muñoz, 2007).

Materia inorgánica.

Los componentes inorgánicos de mayor interés, en las aguas residuales, son (Muñoz, 2007):

-*pH*: la actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentra entre los valores de 5 a 9.

-*Alcalinidad*: nos mide la cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en el agua.

-*Nitrógeno*: es esencial para el crecimiento de microorganismos y plantas, donde el nitrógeno está presente en el agua residual reciente en forma de urea y proteínas.

-*Fosforo*: es también esencial para el crecimiento de los organismos. La forma en que se puede encontrar en las aguas residuales es en fosfato orgánico. El fosfato satisface los requerimientos de todos los organismos y se necesitan a niveles mucho más bajos que el nitrógeno.

-*Azufre*: es requerido para la síntesis de proteínas.

2.5 Importancia del agua residual.

EL agua residual se produce de una forma relativamente continua, es decir, se trata de una “fuente” teórica de agua con características de continuidad en el tiempo (Torres, 2005).

Las distintas de aguas residuales según su origen tienen muchas características que la hacen muy tóxicas y además con un alto costo para su tratamiento para volverlas a reutilizar, pero las aguas residuales urbanas tienen una composición más o menos uniforme, que facilita los procesos de tratamiento y las distingue claramente de las aguas residuales industriales (WWAP, 2017).

La composición, al igual que la calidad de las aguas residuales, sufre también variaciones respecto al tiempo. Cambia en el transcurso de las distintas horas del día en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales (Espigares *et al.*, 1985).

2.6 Reutilización de las aguas residuales tratadas.

Las aguas residuales reutilizadas constituyen un recurso no convencional de agua que se ha desarrollado en las últimas décadas. No obstante, para poder reutilizar este recurso se requiere las tecnologías adecuadas y unos estudios previos detallados, así como también saber la legislación respecto a la reutilización de aguas residuales (Montecillos, 2011). Al evaluar la reutilización

de aguas residuales parecen presentar unas ciertas ventajas para su uso como agua de riego, aun que se requieren cálculos y herramientas de toma de decisión adaptados a cada circunstancia (Escalante *et al.*, 2012).

EL desarrollo económico suele implicar la necesidad de disponer de recursos hídricos adicionales para poder llevar a cabo las nuevas actividades industriales, agrícolas, domésticas, turísticas y cotidianas (Cuadro 1) (Díaz, 2003).

Cuadro 1.- Los recursos de agua.

Recursos convencionales	Agua Superficial
	Agua Subterránea
Recursos no convencionales	Escorrentía
	Agua residual tratada
	Agua de mar desalinizada

Dentro de los recursos no convencionales, caben destacar como los más importantes en volumen y disponibilidad, son las aguas residuales regeneradas (Escalante *et al.*, 2012).

La agricultura es el área en la que, se está suministrando con este tipo de aguas (reutilizada), ya que favorece en costes y en una alta cantidad de características positivas para este uso (Winpenny *et al.*, 2013). EL uso aguas tratadas está bajo varios reglamentos que son expedidos por cada país, con el fin de evitar un crecimiento exponencial de enfermedades a la población que consume de áreas agrícolas favorecida por este tipo de agua (Silva *et al.*, 2008). Pero en los últimos años han aumentado exponencialmente en muchos lugares del mundo los usos de riego no agrícola, más concretamente los relacionados con las prácticas deportivas y los parques urbanos (RIPDA, 2004).

El desarrollo económico de un país conlleva también a mayores exigencias paisajistas, lo que se traduce en un aumento de las demandas de zonas verdes y parques es las zonas urbanizadas y por lo cual la necesidad de aplicar nuevas alternativas hídricas para poder subsistir dichas áreas, además otros lugares

donde se reutiliza el agua residual son medianas autopistas, cementerios y otras instalaciones asociadas al desarrollo urbano (Delgado, 2012; Manga *et al.*, 2001).

En otros lugares, para los que no se planteaba el riego, son parcelas de producción de árboles para madera, en los últimos años reciben agua para aumentar la productividad, y por lo tanto reducir los turnos de corte (Ramírez, 2004).

2.7 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar o reducir su nivel de los contaminantes presentes en el agua (De la Peña, 2013).

Este tipo de actividades tiene como objetivo producir agua limpia o reutilizable en el ambiente por ello tiene como propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radioactivo de los recursos y cuerpos de agua receptores (Rojas, 2002).

El tratamiento de aguas residuales ha sido una consecuencia del desarrollo de la civilización y que se caracteriza por el aumento de la densidad demográfica y expansión industrial (SEMARNAT, 2007).

Cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, ya sea de tipo convencional o natural, cuenta con tres elementos fundamentales (CONAGUA, 2009):

- Recogida de las aguas residuales y su conducción hasta la estación de tratamiento de estas aguas.
- Tratamiento de las aguas residuales.
- Evaluación de los productos que se obtienen del tratamiento y se vierten a un cauce fluvial.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se dividen en dos grandes grupos (Rojas, 2002);

❖ Sistemas convenciones.

❖ Sistemas naturales.

2.7.1 Convencionales.

En el tratamiento convencional de las aguas residuales se llevan a cabo los siguientes procedimientos (Mila, 2011):

1. Pretratamiento: En la Figura 3, muestra en que consiste en la eliminación de los objetos que pueden ser gruesos, grandes, además de arenas y grasas, que puedan producir serios daños en los equipos, este procedimiento se lleva a cabo mediante procedimientos físicos (Juračka, 2011).



Figura 3.- Pretratamiento en la depuración de aguas (Juračka, 2011).

Así, en el pretratamiento se suelen llevar a cabo cinco funciones (Mila, 2011).

- Separación de grandes sólidos.
- Desbaste. (Consiste en hacer pasar el agua residual a través de una reja).
- Tamizado.
- Desarenado.
- Desengrasado.

2. Tratamiento primario: Se trata de unos procesos físicos-químicos (coagulación-floculación). Se lleva a cabo una decantación física natural para la eliminación de sólidos en suspensión, en la Figura 4 se observa la flotación natural de las partículas menos densas que no pudieron eliminarse en el pretratamiento (Ramalho, 2010). Los sólidos se depositan en el fondo y el agua decantada se vierte en un canal que la conduce hacia el tratamiento biológico (Hijja, 2014).



Figura 4.- Floculación en la superficie (Juračka,2011).

3. Tratamiento secundario: Se denomina también tratamiento biológico dado que su finalidad es reducir la fracción orgánica de las aguas residuales empleando para ello microorganismos (Nuevo, 2017). En la Figura 5, se muestra el proceso en el que el fango se deposita en el fondo y el agua depurada se evacúa al río o se somete a un tratamiento terciario (Tapia, 2004).



Figura 5.- Tratamiento secundario (Juračka,2011).

4. Tratamiento terciario: Son una serie de tratamientos fisicoquímicos destinados a mejorar algunas características del agua efluente de la depuradora (Figura 6), pero el más habitual es el de la higienización (cloro, rayos UV, entre otros), destinado a eliminar la presencia de virus y gérmenes del agua (Baeza, 2012).



Figura 6.- Tratamiento terciario (Lara, 2018).

5. Línea de fangos: Consiste en el tratamiento de los lodos derivados de la decantación secundaria. (Tapia, 2004). En muchos casos los fangos son tratados como residuos sólidos urbanos pudiendo llevarse a vertederos o incineradoras. Sin embargo, lo más adecuado es el uso de esta materia para la generación de composta, de modo que sea aprovechada como abono para la agricultura (Ramírez, 2005).

Resumiendo, el proceso de depuración de aguas puede explicarse de forma sencilla a través del esquema mostrado en Figura 7:

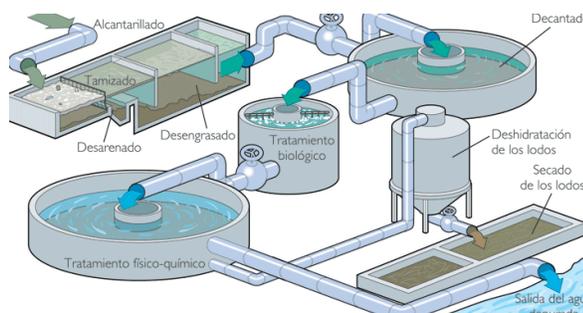


Figura 7.- Esquema proceso de depuración de aguas (Juračka,2011).

2.7.2 Naturales

Estos sistemas se utilizan en una gran variedad de situaciones, ya que son altamente adaptables a los diferentes usos que se le quieran dar, abarcando de una forma efectiva, técnica y económica, (Peña *et al.*, 2002).

Los métodos naturales de tratamiento de aguas residuales se dividen en dos grandes ramas, aplicación directa sobre el terreno y los sistemas acuáticos.

Ambos son una acción combinada de vegetación, suelo y microorganismos que encontramos en ellos (Wils,2009).

Ventajas de los sistemas naturales en comparación con sistemas convencionales (Kelly, 2002):

- Escasa necesidad de personal de mantenimiento.
- Consumo energético reducido.
- Baja producción de fango.
- Alta calidad sanitaria del efluente.
- Buena fertilidad del terreno en caso de desmantelamiento.

Factor limitante para los sistemas naturales (Kelly, 2002):

- Requiere mayor superficie de terreno disponible (entre 4 y 40 m²/habitante).
- Solo para determinados tipos de vertidos, han de ser totalmente degradados o se deben eliminar los residuos tóxicos o peligrosos restantes previamente al tratamiento natural.

1. Métodos de tratamiento mediante aplicaciones directas en el terreno.

En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones: por un lado, es el medio receptor de las aguas residuales (Torres, 2012). Por otro lado, cómo es el agente activo pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de depuración, eliminando nutrientes, materia orgánica con microorganismos (ALINZA POR EL AGUA, 2001).

- *Filtro verde.*

Los filtros verdes consisten generalmente en el cultivo de masas forestales, que además de favorecer la depuración de las aguas residuales permiten la explotación maderera del cultivo, con lo que se consigue de forma indirecta la protección de los bosques, la recarga artificial de acuíferos y la mejora de la calidad de la atmosfera (TECPA, 2018).

El filtro verde tiene uno de los mayores potenciales de tratamiento de todos los sistemas de depuración en el terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre el suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie (Álvarez, 2002). La depuración tiene lugar en los horizontes superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológica activa (TRCPA, 2018).

- *Infiltración rápida.*

El tratamiento mediante infiltración rápida se define como la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta. La aplicación se realiza de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento (Cortes, 1985; Galván, 2009).

- *Escorrentía superficial.*

La escorrentía superficial es un sistema de depuración relativamente nuevo, la técnica consiste en forzar la escorrentía del agua residual, mediante riego por circulación superficial, sobre una superficie muy lisa previamente acondicionada (en pendiente y con vegetación), alternado periodos de riego con periodos de secado (Fernández, 2009).

- *Lechos de turba.*

El sistema está formado por lechos de turba (Pilas) a través de los cuales circula el agua residual. Cada lecho descansa sobre una delgada capa de arena, soportada, a su vez, por una capa de grava. Siendo la superficie total de cada uno 200 m², unos en funcionamiento y otros en conservación, para su mantenimiento y aireación. (La Iglesia, 2016). El efluente se recoge a través de un dispositivo de drenaje situado en la base del sistema. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de las aguas subterráneas, en caso contrario hay que recurrir a la impermeabilización (Martínez, 2018).

- *Lecho de arena.*

Los filtros de arena son una de las tecnologías más antiguas para la depuración de aguas residuales que se conocen. Empleados de forma adecuada consiguen llegar a niveles de depuración muy elevados (Ruiz, 2004). Consisten en lechos de materia granular del tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente acomodados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema de afine de aguas tratadas previamente, mediante otros sistemas como puede ser una fosa séptica (EPA, 1999).

2. Métodos de sistemas acuáticos.

Los métodos acuáticos son aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada (Arroyave, 2004).

- *Lagunaje.*

La depuración por lagunaje consiste en el almacenamiento de estas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático (Peña, 2004). Las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaerobias y aerobias (Escorihuela, 2007).

- *Cultivos acuáticos.*

Los cultivos acuáticos son básicamente una variante de los humedales artificiales, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces (Ramos *et al.*, 2007). Las profundidades de agua suelen ser mayores que en los sistemas de humedales y varían entre 0.5 y 1.8 m, para aumentar la capacidad de tratamiento

y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico en los sistemas de plantas acuáticas flotantes (Frers, 2008).

- *Humedales.*

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua normalmente inferior a 0.6 m con plantas emergentes (Delgadillo, 2010). En estos sistemas el agua fluye continuamente y la superficie libre permanece al nivel del suelo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo periodo del año (Fernández, 2002). La vegetación presente en estos sistemas proporciona superficies adecuadas para la información de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permitiendo la transferencia del oxígeno a la columna de agua y además controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar (Frers, 2008).

- Humedales naturales.*

Los humedales naturales se consideran cuerpos de agua receptores. Por el vertido a estos terrenos está sujeto, en la mayoría de los casos, a las limitaciones normativas aplicables que suelen obligar al tratamiento secundario o avanzado de las aguas a verter. Más aun, el principal objetivo del vertido a humedales debería ser la mejora del hábitat existente (Robles, 2008).

Los humedales naturales abarcan, hasta 12.1 millones de kilómetros en todo el mundo. Comprenden ríos, arroyos, lagos naturales, charcas y acuíferos; turberas de diversos tipos; marismas, pantanos, manglares y humedales artificiales, además de arrozales y arrecifes de coral (Ramsan, 2017; Fariña, 2012).

- Humedales artificiales.*

Los humedales artificiales procuran idéntica capacidad de tratamiento que los naturales, con la ventaja añadida no están sujetos a las limitaciones de vertidos a ecosistemas naturales (Seoanez, 1999). Suelen tener un fondo o base impermeable sobre la que se deposita un lecho de gravas, suelo u otro medio

para el desarrollo de las plantas, que constituyen el principal agente depurador (Delgadillo *et al.*, 2010).

2.8 Sistema de tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales.

El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrofitas (Plantas adaptadas al agua) enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado (Rodríguez *et al.*, 2014). La acción de las macrofitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Sherman *et al.*, 2003).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad microbiana, el aporte de oxígeno a través de la vegetación durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas, además se sirve como material filtrante (Reed en Kolb, 1998).

Clasificación de los humedales artificiales.

En la Figura 8 se aprecia que los humedales artificiales pueden ser clasificados, según el tipo de macrofitas que empleen en su funcionamiento: Macrofitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrofitas flotantes libres (Delgadillo *et al.*, 2010).

Considerando la forma de vida de macrofitas fijas al sustrato, los humedales artificiales pueden ser clasificados en (Cricyt, 2007):

-Sistemas de tratamiento basados en macrofitas de hojas flotantes; Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema.

-Sistemas de tratamiento basados en macrofitas sumergidas; Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carofitas y muchas angiospermas. Se

encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares solo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

-*Sistemas de tratamiento basados en macrofitas enraizadas emergentes*; En suelos anegados permanente o temporalmente, en general son plantas perenes, con órganos reproductores aéreos.

Los humedales basados en macrofitas enraizadas emergente pueden ser de dos tipos, de acuerdo con la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrofitas y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal (Núñez, 2016).



Figura 8.- Sintetización de los distintos tipos de humedales artificiales (Delgadillo *et al.*, 2010).

2.8.1 Flujo superficial.

En la figura 9 se aprecia que 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 atmosfera (Rodríguez, 2017). Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de estas, tienen menor profundidad (no más de 0.6 m) y tienen plantas (Luna *et al.*, 2014).

En términos de paisaje pueden constituirse como lugares turísticos y sitios de estudios, además de su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera (Pérez *et al.*, 2011).

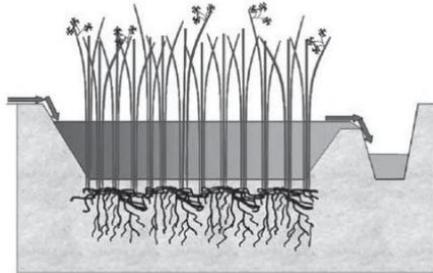


Figura 9.- Humedal artificial de flujo superficial (Delgadillo *et al.*, 2010).

2.8.2 Flujo subsuperficial.

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m (Rodríguez, 2012). La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas (Cuenca *et al.*, 2014). Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema: (a) humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo *et al.*, 2010).

-Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrofitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Brix, 1998).

El agua ingresa en forma permanente. En la Figura 10 se muestra como el agua se aplica en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior, el agua residual se trata a medida que fluye

lateralmente a través de un medio poroso (Estrada, 2010). La profundidad del lecho varía entre 0.45m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0.5 % a 1 %.

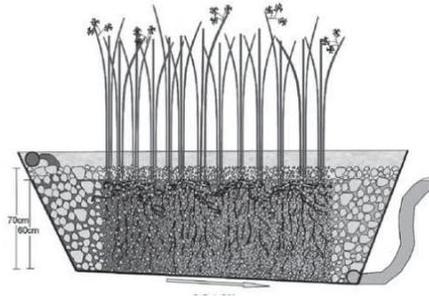


Figura 10.- Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo *et al.*, 2010).

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal, sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño (Martínez, 2016).

-Humedales subsuperficiales de flujo vertical.

Este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua (Tiller *et al.*, 2018).

En la Figura 11 se puede observar con es que las aguas residuales infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arena, grava) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (Delgadillo *et al.*, 2010). La vegetación emergente se planta también en este medio granular (Tiller *et al.*, 2018). A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo (González *et al.*, 2012).

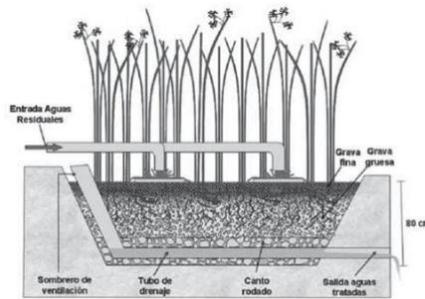


Figura 11.- Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical (Delgadillo et al., 2010).

2.9 Funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.

Un humedal artificial de flujo vertical es un lecho de filtración que se plantea con vegetación acuática. las aguas residuales se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico y gravitacional de dosificación donde el agua fluye verticalmente hacia abajo o hacia arriba por la matriz del filtro. (Headley *et al.*, 2007).

El medio filtrante actúa tanto como filtración para eliminar sólidos, y contaminantes, debido a una diversa gama de interacciones entre los sedimentos, sustrato, microorganismos, plantas, la atmósfera y las aguas residuales (Rodríguez, 2012). El medio con una superficie fija para que las bacterias se sujeten y como una base para la vegetación colocada. La capa superior es plantada con vegetación que puede desarrollar raíces profundas y gruesas, que entran en el medio de filtración (Pérez *et al.*, 2011).

La vegetación transfiere una pequeña porción de oxígeno a la zona de raíces de manera que las bacterias aerobias pueden colonizar el área y degradar la materia orgánica. Sin embargo, la función primaria de la vegetación es mantener la permeabilidad en el filtro y proporcionar un hábitat para los microorganismos existentes en el medio (Elosegi *et al.*, 2009). Los nutrientes y la materia orgánica son absorbidos y degradados por las densas poblaciones microbianas sujetas a la superficie del material filtrante y las raíces (Mara, 2003).

El diseño y el tamaño del humedal depende de las cargas hidráulicas y organismos (Delgadillo *et al.*, 2010).

2.10 Evaluación hidrodinámica de un humedal artificial.

La naturaleza y la dinámica del movimiento del agua a través del humedal pueden tener una influencia significativa en la eficiencia y el alcance de estas interacciones (Fernández, 2008). Muchas de las reacciones bioquímicas importantes dependen del tiempo de contacto entre componentes, microorganismos y sustratos, mientras que la velocidad de las aguas residuales pueden ser un factor determinante importante para otros procesos de remoción de contaminantes, así como la sedimentación, cualquier zona de corto circuito o zonas muertas que se produzcan dentro de un humedal tienen un efecto sobre el tiempo de contacto y las velocidades de flujo, por lo tanto influyen en la eficiencia de tratamiento (López, 2009, Alarcón *et al.*, 2018).

La evaluación hidrodinámica es una herramienta útil para conocer el comportamiento que describe el agua dentro del sistema, para ello es preciso realizar ensayos con trazadores no conservativos, con el fin de obtener la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) y los tiempos de residencia hidráulicos (TRH) del sistema (Alasino *et al.*, 2015).

2.10.1 Trazadores.

Los trazadores para ser seleccionados deben cumplir con algunos criterios, tales como: no deben ser biodegradables para evitar adsorción en la biomasa; estabilidad en el tiempo y bajo condiciones del proceso; solubilidad en el agua y preferible con elevado peso molecular; rango de concentración con respuesta lineal y buena sensibilidad (Rocha *et al.*, 2000, Ferrer *et al.*, 2013).

Las sustancias trazadoras pueden ser: colorantes como fluoresceína o rodamina; iones como cloruros especialmente de sodio, potasio o litio; fluoruros o nitratos; elementos radioactivos como isotopos; ácido clorhídrico (CEPIS, 2004). La forma

de analizarlos en la corriente de salida dependerá del tipo de trazador utilizado (absorbancia, pH, conductividad eléctrica, entre otros) (Rojas, 2001).

La técnica estímulo-respuesta es la más usada para medir la DTR de forma experimental. Se emplea un trazador, que es un material distinguible del fluido que está siendo estudiado, el trazador se inyecta a la entrada y se monitorea su concentración a la salida. El trazador inyectado es el estímulo señal, y el resultado del monitoreo es la respuesta (Ver Figura 12) (Herrera, 2014; Bea *et al.*, 2016).

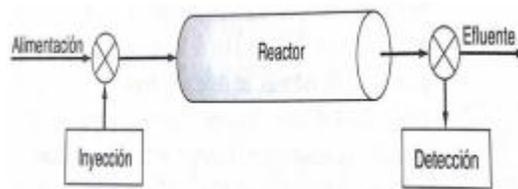


Figura 12.- Representación estímulo-respuesta.

Existen dos tipos de señal definidas son el pulso y escalón. A continuación, se describe cada una de ellas (Ramírez, 2008).

➤ *Señal pulso.*

Se involucra la inyección rápida de una cantidad de trazador. En la Figura 13, se puede apreciar, la representación graficas del pulso de entrada del trazador a la entrada del sistema (t vs $C_{A, ent}$) y la respuesta del pulso a la salida del sistema (t vs $C_{A, sal}$) (Sabas, 2011).

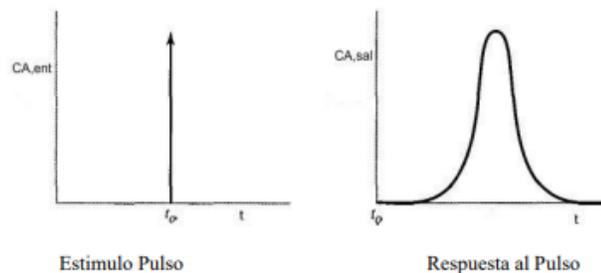


Figura 13.- Representación gráfica de la señal pulso a la entrada y salida (Bea *et al.*, 2016).

➤ **Señal escalón.**

. La señal escalón del trazador, puede ser de dos tipos: escalón de incremento y de decremento. Por lo general, en el primer caso, el escalón incrementa desde un valor de cero, mientras que el segundo caso, el escalón decrece a un valor de cero (Ramírez, 2008; Lindarte *et al.*, 2015).

En la Figura 14, se muestra las señales de escalón de incremento y decremento, así como las respuestas al inicio y final del sistema al momento de aplicarlas.

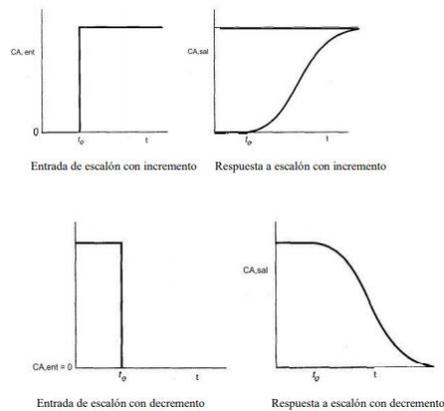


Figura 14.- Representación gráfica de las señales escalón (Beat *et al.*, 2016).

2.10.2 Tiempos de retención hidráulico (TRH).

La duración del tiempo que el agua tarda dentro de un humedal se define como el tiempo de retención hidráulico, también conocido como el tiempo de detención (Von, 2011). Por otra parte, el TRH bajo condiciones de flujo ideal conocido como TRH nominal (t), puede ser definido por la ecuación (1), mediante la relación entre el volumen del agua útil (v), cuyo resultado es producto de la profundidad (h), el ancho (W) y la longitud (L) afectados por la porosidad del medio (ϵ); dividido por el caudal de agua (Q) (Kadlec *et al.*, 2009).

$$t = \frac{v}{Q} = \frac{\epsilon(LWh)}{Q} \quad (1)$$

La carga hidráulica y el consecuente tiempo de retención hidráulico son importantes en los procesos de depuración de los humedales (Ferrer *et al.*, 2013).

A bajas cargas hidráulicas el tiempo de retención es elevado, mientras que a altas cargas el agua pasa rápidamente hasta la salida del humedal, reduciendo el tiempo de contacto entre el agua residual y los microorganismos del humedal encargados de los procesos de degradación (Thuy *et al.*, 2009; Lara, 1999).

2.10.3 Distribución de tiempos de residencia (DTR).

La distribución de tiempos de residencia (DTR), corresponde a la función de densidad probabilística para el tiempo de residencia del agua dentro de un sistema, se debe tener en cuenta que cada humedal presenta un DTR particular y su correspondiente análisis hidráulico se hace generalmente mediante estudios de caracterización hidrodinámica, conocidos como ensayos de trazador (Sandoval, 2007, Marín, 2007).

La representación gráfica de la curva DTR (Figura 15), obtenida como respuesta del trazador es un reflejo del comportamiento del flujo en el interior del humedal (Sabas, 2011). Esta curva se obtiene de la evaluación de varios tiempos de distribución, que a la vez se compara luego con las curvas teóricas de los modelos de flujo pistón, flujo pistón con dispersión o mezclado (Maraña, 2015). La DTR es una herramienta que ha sido aplicada en el área de los sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto en métodos convencionales como naturales (Alasino *et al.*, 2015).

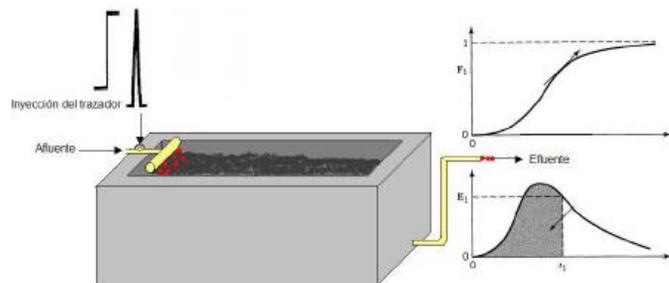


Figura 15.- Esquema del proceso estímulo-respuesta (Sabas, 2011).

En la Figura16, muestra los principales tiempos de distribución que sirven para el análisis de la información obtenida, además de que la curva DTR permite

observar la tendencia de la concentración del trazador en el tiempo y con ello determinar el estado hidrodinámico del humedal (Kadlec *et al.*, 2009).

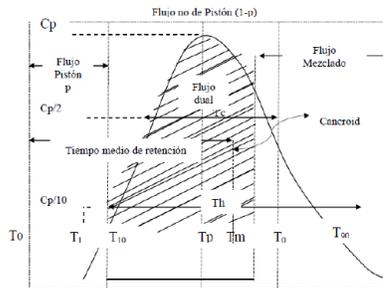


Figura 16.- Curva de distribución de tiempos de salida del trazador (tiempo vs concentración) (Torres, 2011).

2.10.4 Factores que afectan a la hidrodinámica de los humedales artificiales.

Las zonas de mezcla reducida o nulas en el interior de un HA-FSS, conocidas como zonas muertas, influyen significativamente en baja eficiencia hidrodinámica (Holland *et al.*, 2004). De la misma manera, los flujos preferenciales causan reducción del tiempo de retención real y por ende afectan la hidrodinámica del sistema (Kadlec *et al.*, 2009).

A continuación, se describen los aspectos que están referenciados con influencia directa en la hidrodinámica.

➤ Tipo de medio filtrante.

Las características del medio filtrante como la porosidad y la permeabilidad, depende en gran manera de la conductividad hidráulica en el interior. Estudios sobre este parámetro, han encontrado que inicialmente los menores diámetros del medio producen mejores eficiencias de remoción, pero con el tiempo se van tapando más fácilmente y representan un colapso hidráulico, por ello se recomienda utilizar grava como medio de soporte (García *et al.*, 2004; Akratos *et al.*, 2007).

➤ *Geometría.*

Se ha encontrado que la forma del reactor y su geometría son consideraciones importantes que inciden en el desempeño hidrodinámico, porque ellos afectan la localización y abundancia, tanto de zonas muertas, como de flujos preferenciales (Persson *et al.*, 1999; Jenkins *et al.*, 2005).

➤ *Distribución y recolección del flujo en el humedal.*

La forma de introducir y recolectar el flujo del sistema también afecta la eficiencia hidráulica, es así, como se han desarrollado análisis de las curvas DTR para optimizar las estructuras de entrada y salida (Shilton *et al.*, 1996).

➤ *Escala de las unidades.*

Los resultados a escalas pequeñas deben ser validados a escalas piloto y real, ya que la dispersión se hace mayor cuando las unidades aumentan su tamaño y es probable que los mecanismos de transporte sean diferentes (Suliman *et al.*, 2005).

➤ *Biomasa en el medio filtrante (Microorganismos).*

Los macroorganismos en el interior del medio poroso producen un relleno en la porosidad del medio y generan reducción de la conductividad hidráulica. (Tanner *et al.*, 1995).

➤ *Vegetación en el humedal (Raíces).*

La influencia radicular de la vegetación sobre los patrones de flujo indica cambios en las características del flujo (García *et al.*, 2004).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación del humedal artificial.

El sistema fue construido en la parte suroeste de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), al lado de la laguna de oxidación, perteneciente al tratamiento primario de aguas residuales de dicha institución. La universidad se ubica en la zona sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila (Figura 17), con las coordenadas, Latitud 25°21'7.34"N y Longitud 101° 2'0.01"O, la temperatura media oscila entre 15 °C a 29 °C, vientos con una velocidad promedio de 15 km/h, precipitación promedio anual de 600 a 800 mm (Subdirección de Operación de Proyectos UAAAN, 2011).



Figura 17.- Ubicación de la UAAAN con respecto a Saltillo.



Figura 18.- Localización del humedal en relación con la UAAAN.

3.2 Construcción del humedal artificial.

3.2.1 Construcción.

➤ Acondicionamiento del área para el sistema.

Se realizó la limpieza del área de construcción del humedal con talache y machete, la zona se encontraba con mucha maleza (Figuras 19 y 20).



Figura 19.- Condiciones iniciales del área.



Figura 20.- Acondicionamiento del área.

➤ Medición de área para el sistema.

En la Figura 21, se aprecia el área donde se construyó el sistema considerando un área de 3 m de ancho, por 5 m de largo, las cuales se midieron con un flexómetro, además este humedal artificial cuenta con la salida de agua por un tubo de 1" que se extiende 14 metros al frente.



Figura 21.- Dimensiones del área de experimentación.

➤ **Colocación de pilares de soporte a cada tonel.**

Los pilares que soportan los toneles están ensamblados de blocks de concreto que tienen una dimensión de 15x20x40 cm, con un peso de 11.5 kg cada uno. (Figura 22).

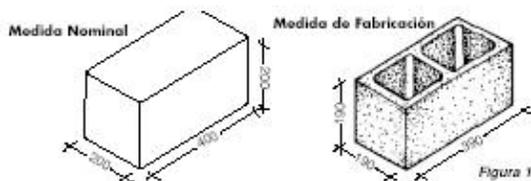


Figura 22.- Diagrama de los blocks que se utilizaron.

Cada lado del pilar se compone de un block a lo largo más otro a lo ancho, buscando que los blocks quedarán entre lazados (Figura 23), para obtener una mayor resistencia al movimiento y peso que soportará cada pilar. Como se muestra en la Figura 24, cada pilar tiene diferente nivel, el primer pilar tiene una altura de 80 centímetros, el segundo 60 cm, y el tercero 40 cm.



Figura 23.- Posición de los blocks en la construcción del pilar.



Figura 24.- Altura de cada pilar.

➤ **Perforación de los toneles.**

A cada tonel se le retiró la tapa con una segueta y se perforaron dos agujeros en forma circular al lado opuesto cada uno, además de que los agujeros van uno en la parte superior y el otro en la parte inferior de la pared del tonel. Se buscó que, en el agujero, de manera ajustada entrara un macho de 1 ½” de PVC, se realizó el corte de empaques los cuales fueron colocados entre el macho y la hembra. Posteriormente se enroscó la hembra por dentro del tonel y finalmente se rellenó con silicón la circunferencia de la unión, por dentro y fuera del tonel, para que no hubiera fuga de agua.

➤ **Armado de los drenes distribuidores y recolectores de agua en cada tonel.**

Cada tonel lleva dos drenes uno arriba y el otro abajo, en forma de T de una longitud de 21.5 cm cada extremo, agujerados con una broca de 1/2”, por cada lado, estos se unen a un tubo principal de 1 ½” que tiene una longitud de 20 cm, que va cementado a una T de 1 ½ “, en la Figura 25 se muestra que los extremos de la T, al final de cada extremo del dren lleva cementado un tapón y el agua se drene por los orificios.



Figura 25.- Posición, forma y perforaciones de los drenes.

➤ **Conexión de tanque Imhoff al humedal artificial.**

En la parte noreste de la UAAAN, se encuentra construido un tanque Imhoff, del efluente de éste, fue extraída el agua residual que se utilizó para el funcionamiento del humedal, el agua se conduce a través de una manguera de $\frac{3}{4}$ " de poliducto cedula 40 con una longitud de 85 m. En el extremo de la manguera del lado del tanque se colocó un filtro, por el otro extremo se instaló una válvula esfera de $\frac{3}{4}$ " PVC, que permite el cierre total del tramo.

Después de la válvula se colocó una tuerca unión de $\frac{3}{4}$ ", que va unido a un tramo de 25 metros de manguera poliducto $\frac{3}{4}$ " cedula 40, misma que al final también tiene una tuerca unión que va unida a otra válvula esfera $\frac{3}{4}$ " PVC, que sirve de cierre parcial o reguladora de caudal y por último se instaló una válvula esfera de 1" la cual su función será de cierre total. El tramo de 25 metros de manguera será utilizado para la inyección del trazador.

➤ **Construcción total del humedal.**

El armado total del humedal se puede apreciar en la Figura 28, siguiendo los pasos de un plano ya establecido (Figura 32), posteriormente se procedió al llenado de los toneles solo con agua, ya que posteriormente, se llenaron de grava cada tonel (Figuras 29 y 30).

La primera prueba del experimento se desarrolló sin grava, la segunda con grava, y la tercera con grava y plantas. Lo anterior tiene como objetivo evaluar si existe un cambio en la hidrodinámica del sistema.



Figura 26.- Parte inicial del sistema.



Figura 27.- Parte intermedia del sistema.



Figura 28.- Humedal artificial terminado.



Figura 29.- Distribución de agua por los drenes.



Figura 30.- Humedal sin grava funcionando.

➤ **Colocación de grava en toneles.**

Una vez corrida la primera prueba de trazadores, los tres toneles fueron rellenos con grava. La grava que se utilizó para el llenado fue aproximadamente 0.7 m^3 .



Figura 31.- Llenado de los toneles con grava.

➤ **Colocación de la planta en el sistema.**

En el sistema se plantó, tule, también llamado junco o espadaña (*Schoenoplectus acutus*), es una planta acuática nativa de los lagos y pantanos, que nos servirá como medio depurador de contaminantes.



Figura 32.- Tule plantado en el sistema.

3.2.2 Materiales.

Los materiales que se utilizaron para la construcción del humedal artificial se pueden apreciar en la Figura 33, y en la cual también se muestra de manera general el diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.

En particular el experimento se compone de tres toneles de capacidad máxima de 220 litros, colocados a diferentes alturas, todos ellos interconectados uno seguido del otro en el Cuadro 2, se detalla la lista de los materiales que une al sistema para su funcionamiento.

Cuadro 2.- Lista de materiales para la construcción del humedal.

Cantidad	Unidad	Descripción
25	m	Manguera poliducto 3/4" Cedula 40
2	Pza	Válvula esfera 3/4"
3	Pza	Abrazadera 1 1/2"
4	Pza	válvula esfera 1"
1	Pza	Reducción 1" a 3/4"
3	Pza	Reducción 1 1/2" a 1"
7	Pza	Codo 90° 1 "
4	Pza	Codo 90 ° 1 1/2"
2	Pza	T 1"
7	Pza	T 1 1/2"
12	Pza	Tapones 1 1/2"
2	Pza	Tuerca unión 1 1/2"
6	Pza	Macho 1 1/2"
6	Pza	Hembra 1 1/2"
1	Pza	Pegamento 1/2 Litro
1	Pza	Ablanda tubo 1/2 Litro
1	m	Tubo 3/4"
14	m	Tubo 1"
3	m	Tubo 1 1/2"
2	Pza	Tonel azul 3mm grosor
1	Pza	Tonel negro 3 mm de grosor
1	m ³	Grava

3.3 Evaluación hidrodinámica del humedal.

La evaluación hidrodinámica es una herramienta útil para determinar los comportamientos que describe un sistema durante su funcionamiento, para la evaluación es necesario realizar ensayos con trazadores, con el fin de obtener la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), misma que es analizada y comparada con el flujo pistón (FP), flujo pistón con dispersión (FPD) o mezcla completa (MC) a través de métodos y modelos ya establecidos (Sandoval, 2007, Kadlec, 2000).

Para la evaluación hidrodinámica se hace uso de la curva DTR, siguiendo el método de momentos descrito por Teefy (1995), como trazador se utilizó NaCl, inyectado al sistema de manera instantánea a la entrada del humedal, 3 kg de sal disuelta en 10 litros de agua. Anticipado a la inyección de la sal se regularizo el gasto de salida del sistema en $90 \text{ cm}^3/\text{s}$, después de que se inyectó el trazador, cada minuto se tomó la conductividad y cada 2 horas el gasto para verificar que no cambiara este último. Para la medición de conductividad se utilizó una sonda multiparamétrica marca HANNA HI9829-00041.

Como se mencionó anteriormente, el agua que se utilizara para el humedal es extraído del tanque Imhoff a través de una manguera poliducto $\frac{3}{4}$ " cedula. 40, en la Figura 34 se puede apreciar que del humedal al tanque Imhoff existe una carga de 6 metros de columna de agua misma que se utilizara como medio de gravedad, para que fluya el agua sin gasto de energía eléctrica. Al final de esta manguera esta una válvula esfera $\frac{3}{4}$ " de cierre total.



Figura 34.- Longitud y desnivel de la distancia del tanque Imhoff al sistema.

Posterior mente esta un tramo de 25 metros de manguera de $\frac{3}{4}$ " que en sus extremos tiene dos tuercas uniones de $\frac{3}{4}$ ", esta parte del sistema es utilizado para la inyección del trazador.

A continuación de describe cada uno de los pasos para correr las pruebas de trazadores para la evaluación hidrodinámica del sistema:

1. Se regulariza anticipadamente el flujo de agua a la salida del sistema, a $90 \text{ cm}^3/\text{s}$, a través del método de aforo, con la ayuda de una probeta y un reloj para calcular el tiempo, con los datos obtenidos determinar el gasto.

2. Ante de iniciar la prueba se vertieron 10 litros de agua aun garrafón vacío, después se colocaron 3 kilogramos de Sal (NaCl), se mezcló por 5 minutos.

3. Se cerró la válvula de cierre total del primer tramo de manguera y se acudió a limpiar un filtro que se instaló al inicio de este mismo tramo de manguera, que conduce el agua del tanque Imhoff al sistema.

4. Cerramos la válvula de 1" de cierre total que esta antes de la entrada del humedal y desconectamos el segundo tramo de manguera poliducto a través de las tuercas uniones, y posteriormente se le extrae el agua residual que quedo en este tramo de manguera.

5. Por uno de los extremos del segundo tramo de manguera poliducto, se vertió el agua que tenía diluida la sal, con la ayuda de un pequeño embudo, teniendo en cuenta que el agua no se derramara por el otro extremo.

6. Conectamos el segundo tramo de manguera con el primer tramo a través de las tuercas uniones de manera que no se tire o derrame el líquido que contiene el trazador.

7. Posteriormente se programa la sonda multiparamétrica HI9829-0041 a que cada minuto registre la conductividad del agua que sale al final del sistema, el sensor de la sonda multiparamétrica se colocó en una cubeta que se encuentra al final de la tubería de salida de agua del sistema.

8. Se abren las dos válvulas esfera $\frac{3}{4}$ " de cierre total.

9. Se da inicio a que la sonda registre cada minuto la conductividad eléctrica del agua que va saliendo del humedal artificial.

10. En las primeras 12 horas de iniciar la prueba se verifico el gasto, a cada 2 horas para supervisar que el flujo de salida no varié.

3.3.1 Recolección de datos.

Se realizó la toma de conductividades a cada minuto en la salida del sistema hasta que esta, fue igual a la inicial, con la ayuda de una sonda multiparamétrica HI9829-00041, misma que se programa con anticipación, para los intervalos de tiempo de registro de datos. En la Figura 35 se muestra la sonda.



Figura 35.- Sonda multiparamétrica tomando lecturas durante una prueba.

Todos los datos son almacenados en la sonda y posteriormente exportados a la P:C, para su posterior procesamiento y con ello elaborar la curva de distribuir de tiempos de residencia. también obtener el porcentaje de recuperación del trazador, porcentaje de flujo pistón, mezclado y zonas muertas.

3.3.2 Interpretación de la curva DTR y su aplicación.

Para determinar el comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial, se debe conocer cuánto tiempo permanece las partículas o moléculas dentro del sistema (Alasino *et al.*, 2015).

De la forma de distribución de las concentraciones en el tiempo, se pueden hacer una primera aproximación visual, acerca del comportamiento del sistema en estudio; como sistema en flujo pistón, flujo ideal y flujo completamente mezclado.

En la Figura 36, se muestra un esquema conceptual, en el cual se explica a qué tipo de sistema corresponde cada zona de esta curva.

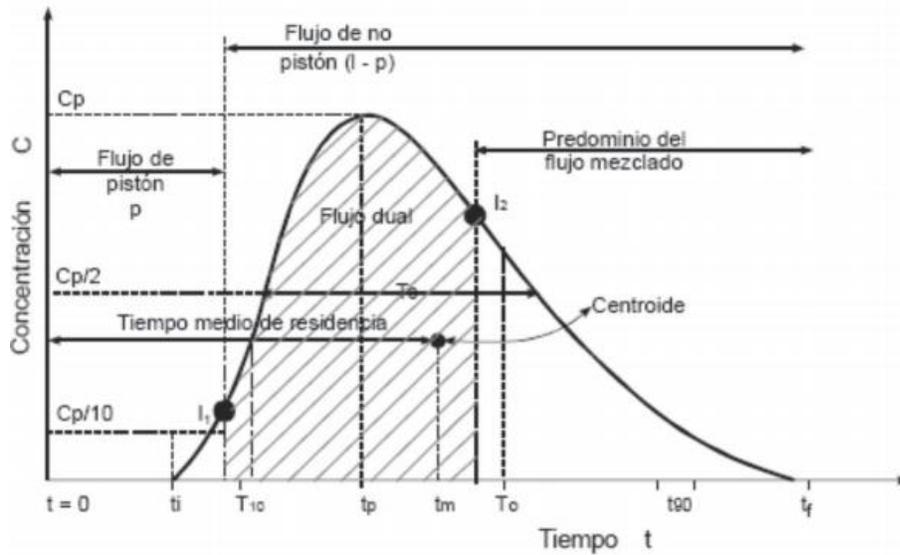


Figura 36.- Esquema conceptual de los tiempos de residencia en la distribución de tipos de flujo (Gómez *et al.*, 2013).

De acuerdo con los tiempos de residencia de trazador y a las concentraciones para esos mismos tiempos, los parámetros de la Figura 36 se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3.-Principales parámetros para tener en cuenta en la curva concentración vs tiempo.

Parámetro	Descripción
t_j	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que este aparece en el efluente.
t_{10}	Tiempo correspondiente al paso del 10 % de la cantidad total de trazado recuperador.
t_p	Tiempo modal, corresponde al tiempo para el cual se presenta la máxima concentración en el sistema.
t_m	Tiempo mediano, corresponde al paso de 50% del trazador recuperado.
t_n	Tiempo teórico de retención.
t_{90}	Tiempo corresponde al paso del 90 % del trazador.
t_r	Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador.
t_c	Tiempo para el cual la concentración es mayor que $C_p/2$.
t_b	Tiempo en el cual la concentración es mayor que $C_p/10$.
C_0	Concentración inicial.
C_p	Concentración máxima.

Además de las relaciones escritas, también se encuentra el índice de Morril (MDI), que se calcula con la Ecuación 2 (CEPIS, 2004), según la EPA un reactor tipo flujo pistón es aquel cuyo MDI < 2 (Eddy et al., 2003).

$$MDI = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}} \quad (2)$$

A continuación, en el Cuadro 4, se establece una serie de relaciones cuantitativas que permiten establecer la presencia de corto circuitos, zonas muertas, zonas de retención, procesos de difusión, a su vez permite establecer qué tipo de flujo se asemeja el sistema en estudio (Pérez, 1992).

Cuadro 4.- Criterios de caracterización de flujo.

Relación	Definición
$\frac{t_j}{t_n}$	Si es igual a 1 para flujo pistón. Si es igual a 0 para flujo mezclado. Si es < 0.3 hay cortocircuito hidráulico
$\frac{t_m}{t_n}$	Si es < 1, existen cortos circuitos hidráulicos. Si es > 1, hay errores experimentales o presencia de espacios muertos, zonas donde el fluido se queda estancado, para luego salir lentamente. Esto hace que la rama descendente de la curva se presenta alargada, por lo cual el centroide del área bajo la curva de concentración se desplaza hacia la derecha, aumentando el valor del parámetro t_m .
$\frac{t_p}{t_n}$	Si es igual a 1 para flujo pistón. Si es igual a 0 para el flujo completamente mezclado. Si se aproxima a 1 y $t_j/t_0 > 0.5$ existe predominio de flujo pistón. Si se aproxima a 0, existe superioridad de flujo mezclado.
$\frac{t_c}{t_n}$	Está relacionado con el fenómeno de difusión. Si es igual al cociente $\Delta t_n/t_n$ para el flujo estable ideal. Si es cercano a 0.7 hay flujo mezclado.
$\frac{t_b}{t_n}$	Si es igual al cociente $\Delta t_n/t_n$ para el flujo estable ideal. Si es cercano a 2.3 hay flujo mezclado.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_j)}{t_n}$	Es la excentricidad de la curva. Si es igual a 0 para flujo pistón. Si es > 2.3 para flujo mezclado ideal.

Para obtener el parámetro t_n hace uso de la ecuación 1.

La recuperación del trazador inyectado a la entrada del humedal es también uno de los factores importantes en la evaluación hidrodinámica, en la literatura menciona que para que un humedal construido se eficiente y tenga buena hidrodinámica se tiene que recuperar un 80% del trazador inyectado (Ferrer,

2013). La masa del trazador recuperado se obtiene con la ecuación 3 (Kadlec *et al.*, 2009).

$$M_o = Q \int_0^{\infty} C dt = Q \sum_{i=0}^{i=n} c_{pi} * \Delta t_i \quad (3)$$

Donde:

Q= Flujo volumétrico a la entrada del humedal.

El porcentaje del trazador recuperado se encuentra con la ecuación 4.

$$\% \text{ de recuperacion} = \frac{Q \sum_{i=0}^{i=n} c_{pi} * \Delta t_i}{M_t} * 100 \quad (4)$$

Donde:

M_t= Masa total del trazador inyectado.

El área bajo la curva DTR es la sumatoria de la masa del trazador recuperado y se obtiene con la ecuación 5 (Teefy, 1995).

$$A = \frac{M_o}{Q} \cong \int_0^{\infty} C dt \cong \sum_{i=0}^{i=n} c_{pi} * \Delta t_i \quad (5)$$

Donde:

A= Área bajo la curva de la curva C.

C= Concentración del trazador en el tiempo.

M_o= Masa del trazador inyectado.

Q= Flujo volumétrico a la entrada del humedal.

3.3.3 Modelo de dispersión.

Para el parámetro t_m descrito en la Cuadro 7, que es el tiempo medio de residencia, el primer momento de la DTR y representa el centroide de la distribución. se encuentra mediante la ecuación 6 (Levenspiel, 2002).

$$t_r = \frac{\int_0^{\infty} tC dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} t_i * c_{pi} * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} c_{pi} * \Delta t_i} \quad (6)$$

La varianza (σ^2) es el segundo momento de la curva DTR y es utilizada para cuantificar los procesos de dispersión y se puede calcular como se muestra en las ecuaciones 7 (Levenspiel, 2004).

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} - t_m^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 * c_{pi} * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n c_{pi} * \Delta t_i} - t_m^2 \quad (7)$$

La varianza normalizada se calcula con la ecuación 8 (Levenspiel, 2004).

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2} \quad (8)$$

El módulo de dispersión D/VL es un parámetro adimensional que mide el grado de dispersión axial. Este parámetro se aproxima a cero, cuando el flujo tiende a ser flujo pistón, y si es grande, tendiendo a infinito, entonces, se trata de un flujo de mezcla completa (Levenspiel, 1998).

En la Figura 37, se visualiza que los valores del módulo de dispersión que se extiende al infinito indica que hay presencia de mezcla completa y que por otro lado la dispersión de 0.2 indican un grado de dispersión grande, valores de 0.025 dispersión intermedia y de 0.002 dispersión pequeña, hasta llegar al cero que es determinado por el flujo pistón (Levenspiel, 2004).

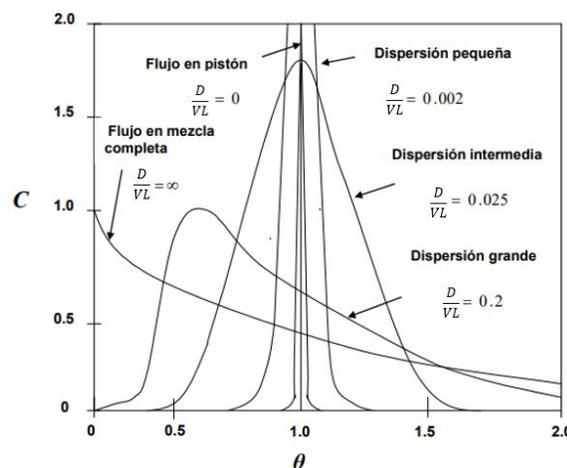


Figura 37.- Representación de la curva C, predichas por el modelo de dispersión (Peralta, 2008).

El módulo y coeficiente de dispersión, se debe calcular usando la ecuación 9 (Levenspiel, 1998).

$$8 \left(\frac{D}{VL} \right)^2 + 2 \left(\frac{D}{VL} \right) - \frac{\sigma^2}{t_m^2} = 0 \quad (9)$$

Donde:

D: Coeficiente de dispersión longitudinal (m²/s).

V: Velocidad del flujo (Se obtiene con la ecuación 10).

L: Longitud del reactor.

t_m: Tiempo medio del fluido dentro del reactor.

$$V = \frac{L}{t_r} \quad (10)$$

Donde:

L= Distancia longitudinal del humedal.

t_r= Tiempo real del sistema.

El coeficiente de dispersión longitudinal (D), parámetro básico de transporte, que permite definir el patrón de dispersión de una partícula a lo largo del eje longitudinal del flujo, en humedales (Hart *et al.*, 2012).

- D≈0, (La curva de respuesta es una función delta igual que la entrada, es decir, corresponde a un flujo pistón).
- D≤1 pequeños, (La curva de respuesta es una campana delgada, alta y alargada).
- D grande, (La curva de respuesta es una curva muy extensa, baja y ancha).

3.3.4 Modelo de Wolf-Resnick.

En la Figura 38 se aprecia la curva F, que se usa para describir la concentración, en forma acumulada, de una sustancia a la salida del reactor, en función de su concentración inicial. Esta función varía entre cero y uno (Levenspiel, 1998). Físicamente, esta curva representa un aumento de la concentración de trazador en la corriente de salida del sistema del humedal.

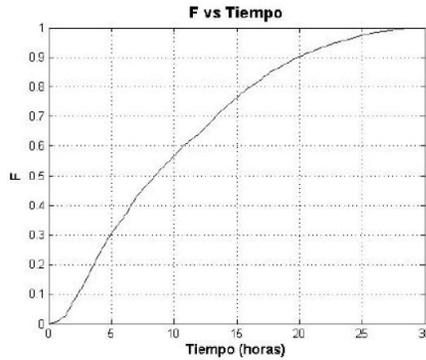


Figura 38.- Curva F (Sánchez *et al.*, 2009).

En la Figura 39, se muestra la curva 1-F, que permite identificar con cierta claridad el porcentaje de zonas muertas, corto circuitos, además permite cuantificar por medio de las Ecuaciones 13 a 15, que porcentaje del reactor se comporta como flujo en pistón y flujo en mezcla completa.

La fracción de la totalidad del trazador que sale del reactor está determinada por la ecuación 11 (Levenspiel, 1998).

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (11)$$

$$\theta = \frac{t_1}{t_n} \quad (12)$$

Gráficamente se obtiene $\frac{t_2}{t_n}$, representa el punto en el que la curva de la gráfica 1-F, se va convirtiendo en vertical.

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2 - t_1}{t_n} \frac{t_1}{t_n}} \quad (13)$$

Para encontrar los parámetros antes mencionados, se debe construir la gráfica de 1-F en escala semilogarítmica y en función del tiempo adimensional (t_1/t_n). Luego se traza una recta tangente en el punto donde la línea comienza a volverse vertical. Se llamará α al ángulo comprendido entre la recta tangente y la horizontal, y θ al intercepto de la recta con el eje de las abscisas (Pérez, 1992).

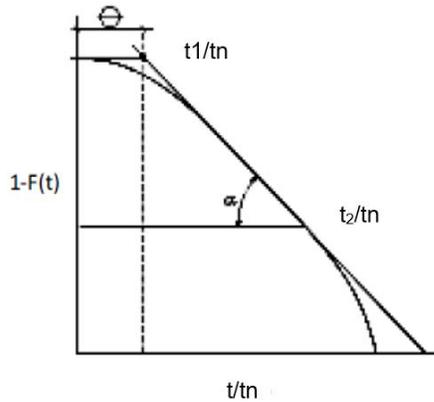


Figura 39.- Curva de 1-F cantidad de trazador que permanece en el sistema (Pérez, 1992).

El flujo pistón (P) es igual a la ecuación 14 (Pérez, 1992).

$$P = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad (14)$$

El flujo mezclado (M) se obtiene con la ecuación 15 (Pérez, 1992).

$$M = 1 - P \quad (15)$$

El volumen de espacios muertos se obtiene con la ecuación 16 (Pérez, 1992).

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \quad (16)$$

3.3.5 Normalización de las curvas DTR.

Para comparar curvas de DTR entre sistemas o condiciones de operación diferentes, es posible normalizar la DTR para remover las unidades de flujo, volumen del sistema y masa del trazador (Werner *et al.*, 1996; Kadlec *et al.*, 2009).

El procedimiento de normalización consiste en hacer adimensionales las unidades en cada uno de los ejes de la curva DRT de la siguiente manera (Tay *et al.*, 1999).

Para normalizar la concentración se utiliza la ecuación 17 (Levenspiel, 2004).

$$E_{\theta} = \frac{c_i}{c_o} \quad (17)$$

Para normalizar el tiempo es utilizada la ecuación 18 (Levenspiel, 2004).

$$\theta_{(i)} = \frac{t_i}{t_m} \quad (18)$$

Donde:

c_i = Concentración del trazador en el efluente al tiempo t_i .

c_o = Concentración inicial del trazador (Concentración de trazador aplicado en la entrada del humedal).

t_i =Tiempos tomados en cada toma de muestra de conductividad eléctrica después de haber inyectado el trazador.

IV. RESULTADOS

4.1 Cálculos previos.

4.1.1 Volumen total y útil del humedal.

Para la determinación de la velocidad teórica del agua dentro del humedal, es necesario el cálculo de los volúmenes de los toneles que conforman el sistema. Además, hay que hacer notar que en este humedal se analizaron tres escenarios; i). - sin grava, ii). - con grava y iii). - grava y plantas. El volumen total del sistema corresponde a la suma de los volúmenes de los tres toneles. En la segunda y tercera prueba es necesario tener en consideración el valor de la porosidad del sistema que es afectado por la grava agregada. En el Cuadro 5 se muestran las dimensiones de cada tonel, el volumen total del humedal y el volumen de porosidad.

Cuadro 5.- Dimensiones, volumen total del sistema y volumen de porosidad.

	Tonel 1	Tonel 2	Tonel 3
H (cm)	82.00	62.00	82.00
P (cm)	185.00	185.00	185.00
r (cm)	29.14	29.14	29.14
V (L)	218.80	165.43	218.80
Volumen total (L)	603.04		
Porosidad total (L)	259.30		

Donde:

H: Carga hidráulica en el tonel.

P: Perímetro del tonel.

r: Radio del tonel.

V: Volumen de agua en cada tonel.

4.1.2 Concentración del trazador.

El volumen del trazador inyectado en el sistema en cada prueba fue de 10 litros de agua desionizada con una concentración de 300 g L^{-1} de N. Se determinó la conductividad eléctrica del agua residual del sistema, resultando en $2371 \mu\text{S cm}^{-1}$. De acuerdo con Teffy (1995), se requiere incrementar entre 4 o 5 veces la conductividad eléctrica inicial. En la prueba de calibración, se observó que con una concentración de 4 g L^{-1} de NaCl en agua residual, la conductividad se elevaba a $10030 \mu\text{S cm}^{-1}$, esto aproximándose a lo requerido.

El incremento en el valor de la conductividad eléctrica tiene la finalidad de que en la curva de DTR se aprecie de mejor.

Con la concentración de 4 g L^{-1} de NaCl en agua residual se logra elevar entre 4 o 5 veces la conductividad eléctrica inicial, al tener 603.04 L de volumen en el sistema, se necesitarán 2.4 kg de NaCl, mismo que para cuestiones prácticas se llevó a 3 kg . Para disolver esa cantidad y tomando en cuenta que la solubilidad de la sal es de 360 gr L^{-1} , se requirió de 8.33 L , mismos que se aumentaron a 10 L .

4.1.3 Curva de calibración de conductividad vs concentración.

En un vaso de precipitado, se vertió 1 L de agua residual tomada en la salida del humedal, aquel se colocó en un agitador magnético y se agregó 0.2 g de NaCl, esperando a que solubilizara y tomar lectura de conductividad eléctrica con una sonda multiparamétrica HAANA INSTRUMETS® modelo HI 9829-00041, posterior a esto, se incrementa la concentración en 0.2 g L^{-1} hasta alcanzar los 4 g L^{-1} . Obteniendo la conductividad en cada intervalo.

Se graficaron los valores de la conductividad ajustada (que es la conductividad registrada menos la conductividad inicial) y la concentración de NaCl, obteniendo una relación lineal de calibración (Figura 40).

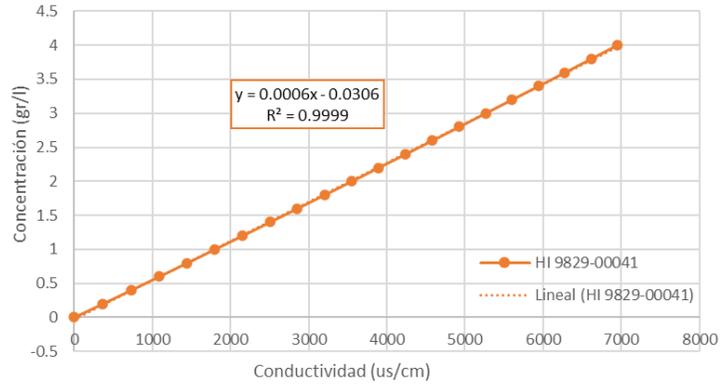


Figura 40.- Curva de calibración.

4.1.4 Porosidad del lecho.

La porosidad del humedal se determinó a nivel laboratorio, llenando una probeta de volumen conocido ($V_T=1L$) con grava y se adicionó agua (V_2) hasta alcanzar la capacidad total de la probeta. El volumen V_2 (espacio de vacíos) se obtiene mediante la medición del volumen de agua necesario para rellenar los espacios entre la grava.

La porosidad se calculó aplicando la ecuación 19:

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_T} * 100 \quad (19)$$

El resultado de porosidad fue de 43%.

El Cuadro 6 resume las pruebas que se realizaron para determinar la porosidad del sistema.

Cuadro 6.- Porcentaje de porosidad.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Lleno con agua y grava(ml).	1000.00	1000.00	1000.00
Solo agua (ml).	430.00	430.00	430.00
Porosidad 43%.			

4.1.5 Tiempo de retención hidráulico teórico (TRH).

El tiempo de retención hidráulico teórico (TRH) fue definido por la Ecuación 1.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Donde, V representa el volumen efectivo del humedal en cm^3 , Q el caudal en $\text{cm}^3\text{seg}^{-1}$ (en las pruebas se controló el gasto a $90 \text{ cm}^3\text{seg}^{-1}$) y t en segundos. Cabe destacar que en este humedal se evaluó la hidrodinámica con tres escenarios; i). - sin grava, ii). - con grava y iii). - grava y plantas. En la primera evaluación (sin grava) se tomó como volumen útil el total de agua en los tres toneles y en la segunda y tercera evaluación (con grava, con grava y plantas respectivamente), se tomó en cuenta la porosidad de la grava contenida en el humedal. Los resultados obtenidos de tiempos de residencia teóricos se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7.- Tiempo de retención hidráulico teórico.

Material	Sin grava	Con grava	Grava y planta
TRH (min)	111.67	48.02	48.02

4.2 Evaluación sin grava.

4.2.1 Análisis de la curva de DTR.

Los valores de los parámetros que permiten evaluar el comportamiento de la DTR en el sistema sin grava se muestran en los Cuadros 8 y 9.

El tiempo t_r es mayor al tiempo t_n en un 60.74 %, lo que significa que en la prueba se encuentra un flujo completamente mezclado, con zonas muertas que provocan una cola alargada por la derecha de la DRT.

En la relación t_m/t_n , supera al criterio establecido de 1, lo que indica la presencia de zonas muertas (Pérez, 1992). El resto de las relaciones t_j/t_n , t_c/t_n , el valor de la

excentricidad y el índice de Morril confirman el predominio de flujo completamente mezclado dentro del sistema.

En la Figura 41, se puede apreciar una cola larga decreciendo a la derecha a partir de haber alcanzado la máxima concentración, pero con una tendencia muy parecida al tramo desde la detección del trazador y hasta alcanzar la máxima concentración de trazador, hay que recalcar que a partir del minuto 300 después de haber iniciado la prueba, en la curva se denota un pequeño aumento en la concentración de salida y a partir de ese punto la inclinación fue siendo cada vez menor. El tiempo de retención hidráulico real en el sistema es mayor que el teórico calculado, debido a factores como zonas muertas, recirculación y cortos circuitos que alejan a la curva de la idealidad.

Aplicando la ecuación 3, se obtiene la recuperación de masa del trazador inyectado, dando como resultado 82.80 %, estando dentro del porcentaje recomendable de recuperación de trazador.

Cuadro 8.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de la DTR en la prueba sin grava.

Parámetro Experimental	Tiempo (min)	Parámetro Experimental	Concentración (g/l)
t _j	22.00	C _o	300.00
t ₁₀	71.00	C _p	2.19
t _p	86.00	C _{p/10}	0.22
t _m	174.50	C _{p/2}	1.09
t _n	111.67		
t ₉₀	662.50		
t _r	1358.00		
t _c	124.00		
t _b	501.00		
t _r	284.34		

Cuadro 9.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR sin grava.

Relación paramétrica	Criterio Relación paramétrica	Resultado Experimental	Interpretación
t_j/t_n	$t_j/t_n=0$ (Flujo mezcla completa) $t_j/t_n=1$ (Flujo pistón) $t_j/t_n<0.3$ (Corto circuito)	0.19	Predominio de flujo mezclado y existencia de corto circuito
t_m/t_n	$t_m/t_n<1$ (Corto circuito) $t_m/t_n>1$ (Zonas muertas)	1.56	Presencia de Zonas muertas
t_p/t_n	$t_p/t_n=0$ (Predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_n=1$ y $t_p/t_n>0.5$ (Predominio flujo pistón)	0.77	Predominio de flujo pistón
t_c/t_n	$t_c/t_n=0.693$ (Flujo mezcla completa)	1.11	Predominio de flujo mezclado
t_b/t_n	$t_b/t_n=2.3$ (Flujo mezcla completa)	4.48	Predomina el flujo mezclado
E	$E=0$ (Flujo pistón) $E>2.3$ (Flujo mezcla completa)	10.81	Existencia de flujo de mezcla completa
Índice de Morril	$MDI<2$ (Flujo pistón)	9.33	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

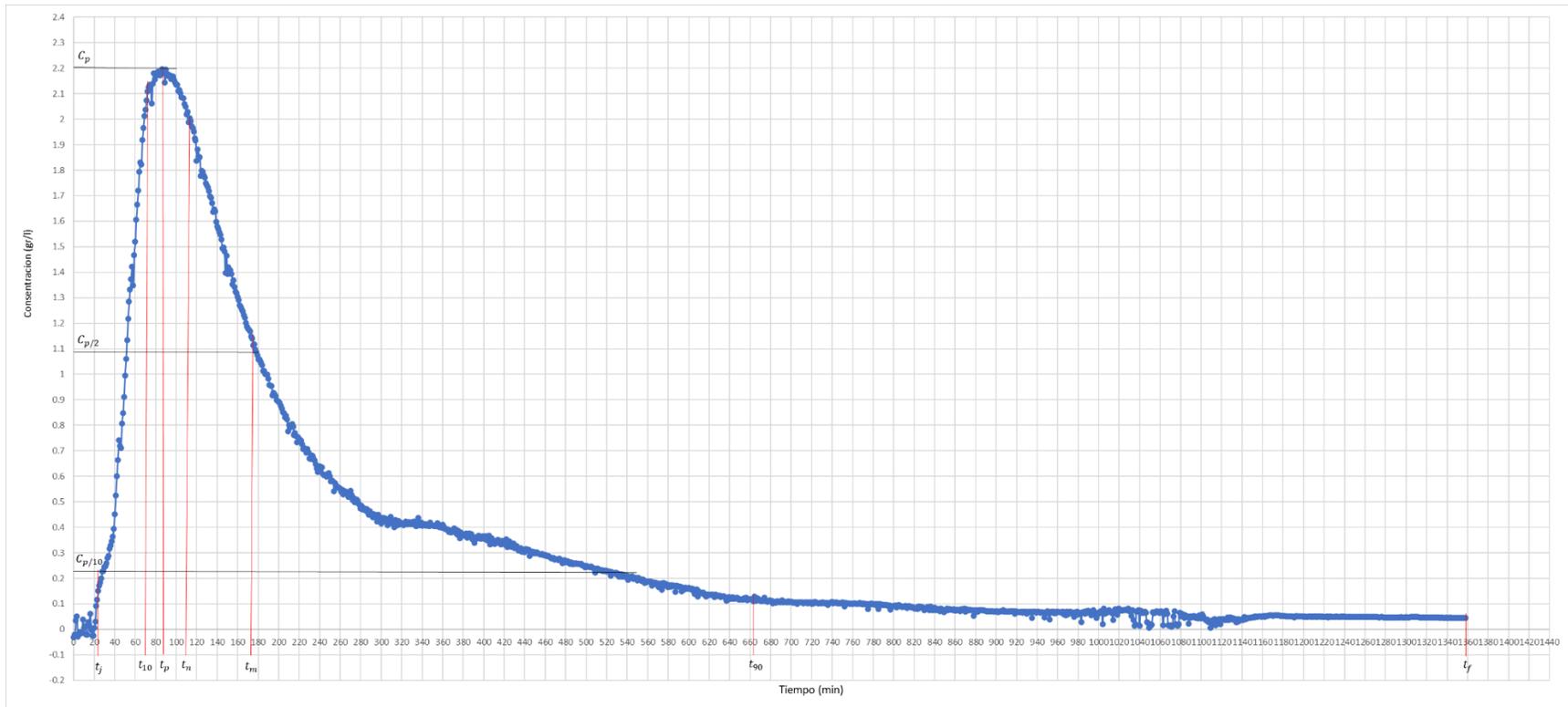


Figura 41.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba sin grava.

4.2.2 Modelo de dispersión.

Para del modelo de dispersión, de la prueba sin grava, se determinó una velocidad media de 0.26 cm s^{-1} del flujo y una distancia longitudinal del sistema de 4480 cm, los valores obtenidos se muestran en el Cuadro 10, cuyos parámetros a destacar son el módulo de dispersión y el coeficiente de dispersión, concluyendo que el sistema presenta en el módulo de dispersión un valor mayor a 0.2, por lo que se presenta un grado de dispersión grande y una curva DTR normalizada grande y alargada, lo que representa la existencia de un flujo combinado de mezcla completa y flujo pistón, con predominio del primero.

Cuadro 10.-Resultados del modelo de dispersión sin grava.

TRH experimental (tr) (min)	σ^2 (Minutos)²	$\sigma(\Theta)^2$	Módulo de Dispersión D/VL	Coficiente de Dispersión D (m²/s)
284.34	73172.31	159.06	4.33	0.51

4.2.3 Modelo de Wolf-Resnick.

Los resultados reportados en el Cuadro 11, corresponden a la aplicación del modelo de Wolf-Resnick. En el escenario sin grava, presentó un comportamiento hidrodinámico con mayor dominancia en 64.38 % del flujo mezclado en comparación al flujo pistón. Adicionalmente se presenta en esta prueba un -3.46 de zonas muertas (m) debido a flujos de recirculación dentro del sistema.

Cuadro 11.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick sin grava.

Parámetros	valores
t1/tn	1.20
t2/tn	8.70
Tan α	0.13
P	0.27
M	0.73
m	-3.46

4.3 Evaluación con grava.

4.3.1 Análisis de la curva de tendencia DTR.

En el Cuadro 12, se muestra que el t_r es mayor en un 76.52 %, al t_n lo cual en la curva de DTR se muestra como una curva alargada, debido a factores ya mencionados en la prueba pasada.

De acuerdo con el Cuadro 13, que especifica los valores de las relaciones paramétricas y la interpretación del comportamiento DTR, se puede observar lo siguiente: la relación t_f/t_n con un valor por arriba del valor de flujo de mezcla completa y por debajo del valor de flujo pistón, indica la existencia del flujo dual con predominio de flujo pistón. La relación t_m/t_n , mayor a la unidad, indicando la presencia de zonas muertas.

Por el contrario, las relaciones paramétricas t_p/t_n , t_c/t_n y t_b/t_n , evidenciaron la tendencia de flujo mezclado, al igual, el valor de la excentricidad, indica y reafirma el predominio del flujo mezclado.

Al obtener el porcentaje de recuperación del trazador por medio de la ecuación 3, se obtuvo como resultado 87.51%.

En la Figura 42, se muestra la curva DRT de esta prueba con una salida de trazador temprana, con un crecimiento exponencial y una mayor concentración máxima a la salida del sistema. La segunda mitad de la curva que esta enseguida de punto máximo de concentración, tiene un de crecimiento muy grande, pero la curva a partir del minuto 300, la pendiente de esta fue más ligera hasta que se llegó a la concentración inicial a la prueba.

Abra de recalcar que en esta curva DRT, en el minuto 950 inicio la concentración con apreciables decaimientos, lo cual hace suponer la presencia de espacios muertos en el sistema que provocan tal efecto.

Cuadro 12.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de tendencia de la curva de distribución de trazador de la prueba con grava.

Parámetro Experimental	Tiempo (min)	Parámetro Experimental	Tiempo (min)
t _j	27.00	C _o	300.00
t ₁₀	47.50.	C _p	5.19
t _p	50.00	C _{p/10}	0.52
t _m	99.50	C _{p/2}	2.59
t _n	48.02		
t ₉₀	530.00		
t _f	1450.00		
t _c	52.00		
t _b	170.00		
t _r	204.58		

Cuadro 13.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR con grava.

Relación paramétrica	Criterio Relación paramétrica	Resultado Experimental	Interpretación
t_j/t_n	$t_j/t_n=0$ (Flujo mezcla completa) $t_j/t_n=1$ (Flujo pistón) $t_j/t_n<0.3$ (Corto circuito)	0.56	Predominio de flujo pistón y existencia de flujo mezclado
t_m/t_n	$t_m/t_n<1$ (Corto circuito) $t_m/t_n>1$ (Zonas muertas)	2.07	Presencia de Zonas muertas
t_p/t_n	$t_p/t_n=0$ (Predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_n=1$ y $t_p/t_n>0.5$ (Predominio flujo pistón)	1.04	Predominio de flujo pistón
t_c/t_n	$t_c/t_n=0.693$ (Flujo mezcla completa)	1.08	Predominio de flujo mezclado
t_b/t_n	$t_b/t_n=2.3$ (Flujo mezcla completa)	3.54	Predomina el flujo mezclado
E	E=0 (Flujo pistón) E>2.3 (Flujo mezcla completa)	28.67	Existencia de flujo de mezcla completa
Índice de Morril	MDI<2 (Flujo pistón)	11.15	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

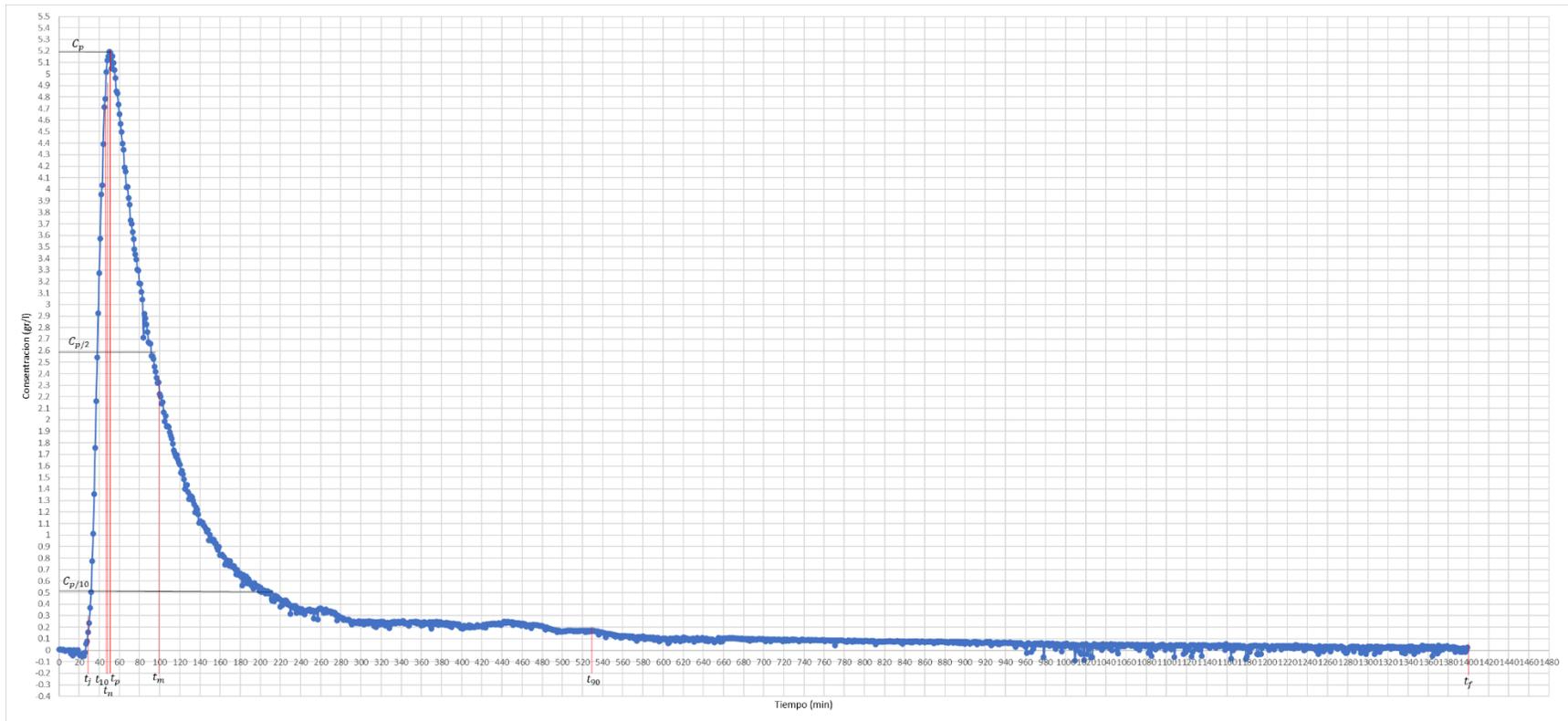


Figura 42.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba con grava.

4.3.2 Modelo de dispersión.

Los datos de la aplicación de este modelo y el número de dispersión calculado, se presenta en el Cuadro 14. Los valores del módulo de dispersión tienden a indicar una dispersión grande (flujo de mezcla completa). Los valores del módulo de dispersión de 0.2 indica un grado de dispersión grande, 0.025 dispersión intermedia, 0.002 dispersión pequeña, y tendiente a cero es una dispersión nula (Flujo pistón) (Levenspiel, 2004). Según lo anterior, el valor obtenido en esta prueba refleja un alto grado de dispersión, este valor del módulo de dispersión, en comparación con el de la prueba sin grava, es menor y también confirma la existencia combinada de flujo pistón y mezcla completa. En esta prueba se presenta un mayor porcentaje de flujo pistón en relación con la prueba sin grava.

Cuadro 14.- Resultados del método de dispersión con grava.

TRH Experimental (tr) (Min)	σ^2 (Minutos)²	$\sigma(\Theta)^2$	Módulo de Dispersión D/VL	Coefficiente de Dispersión D (m²/s)
204.58	57851.85	1.38	0.31	0.05

4.3.3 Modelo de Wolf-Resnick.

El Cuadro 15, muestra los resultados del modelo de Wolf -Resnick los cuales presentan un régimen de flujo dual: flujo mezclado y flujo pistón, pero con un 57.62% mayor el flujo mezclado, lo cual coincide con la primera y las cuatro últimas relaciones paramétricas del análisis de la DTR. En cuanto al cálculo del volumen de espacios muertos (m), se obtiene un valor de -10.08, lo que se atribuye a la presencia de zonas muertas estancadas y algunos fenómenos de recirculación interna.

Cuadro 15.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick con grava.

Parámetros	valores
t1/t _n	3.30
t2/t _n	21.20
Tan α	0.05
P	0.30
M	0.70
m	-10.08

4.4 Evaluación con grava y planta.

4.4.1 Análisis de la curva de tendencia DTR.

Según los datos registrados en los Cuadros 16 y 17, la relación paramétrica t_j/t_n , es inferior al parámetro de 0.3, indicando predominio de flujo mezcla completa y la existencia de cortocircuitos hidráulicos. El tiempo de la máxima concentración del trazador aplicado se detectó en un tiempo muy corto a comparación de las pruebas anteriores. La relación paramétrica t_m/t_n fue, superior al parámetro establecido de 1, lo que indica la presencia de zonas muertas.

La relación paramétrica t_c/t_n , por debajo del valor de mezcla completa y la excentricidad, indicaron la existencia de flujo dual. El resultado para el índice Morril ratifica la presencia en mayor medida de flujo de mezcla completa.

Cuadro 16.- Parámetros experimentales de tiempos y concentraciones para el análisis de tendencia de la curva de distribución de trazador de la prueba con grava y planta.

Parámetro Experimental	Tiempo (min)	Parámetro Experimental	Concentración (g/l)
tj	11.00	Co	300.00
t10	20.50	Cp	8.60
tp	19.00	Cp/10	0.86
tm	56.00	Cp/2	4.30
tn	48.02		
t90	203.00		
tf	988.00		
tc	29.00		
tb	137.00		
tr	86.92		

En la Figura 43, la tendencia de la curva de DTR, muestra que el tiempo de permanencia del trazador tiende a infinito, lo que implica la presencia de un gran volumen de espacios muertos y/o recirculación en el seno del humedal, por lo que las partículas del trazador permanecen más tiempo en el sistema. Se puede apreciar el flujo pistón en mayor porcentaje comparado con las dos anteriores pruebas.

En esta prueba se obtuvo una recuperación del 87.91 %.

Cuadro 17.- Relaciones paramétricas experimentales de tiempos para el análisis de la DTR con grava y planta.

Relación paramétrica	Criterio Relación paramétrica	Resultado Experimental	Interpretación
t_j/t_n	$t_j/t_n=0$ (Flujo mezcla completa) $t_j/t_n=1$ (Flujo pistón) $t_j/t_n<0.3$ (Corto circuito)	0.23	Predominio de flujo mezclado y existencia de corto circuito
t_m/t_n	$t_m/t_n<1$ (Corto circuito) $t_m/t_n>1$ (Zonas muertas)	1.16	Presencia de Zonas muertas
t_p/t_n	$t_p/t_n=0$ (Predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_n=1$ y $t_p/t_n>0.5$ (Predominio flujo pistón)	0.39	Predominio de flujo mezclado
t_c/t_n	$t_c/t_n=0.693$ (Flujo mezcla completa)	0.60	Predominio de flujo mezclado
t_b/t_n	$t_b/t_n=2.3$ (Flujo mezcla completa)	2.85	Predomina el flujo mezclado
E	$E=0$ (Flujo pistón) $E>2.3$ (Flujo mezcla completa)	20.01	Existencia de flujo de mezcla completa
Índice de Morril	$MDI<2$ (Flujo pistón)	9.90	Refuerza el criterio de existencia de flujo de mezcla completa

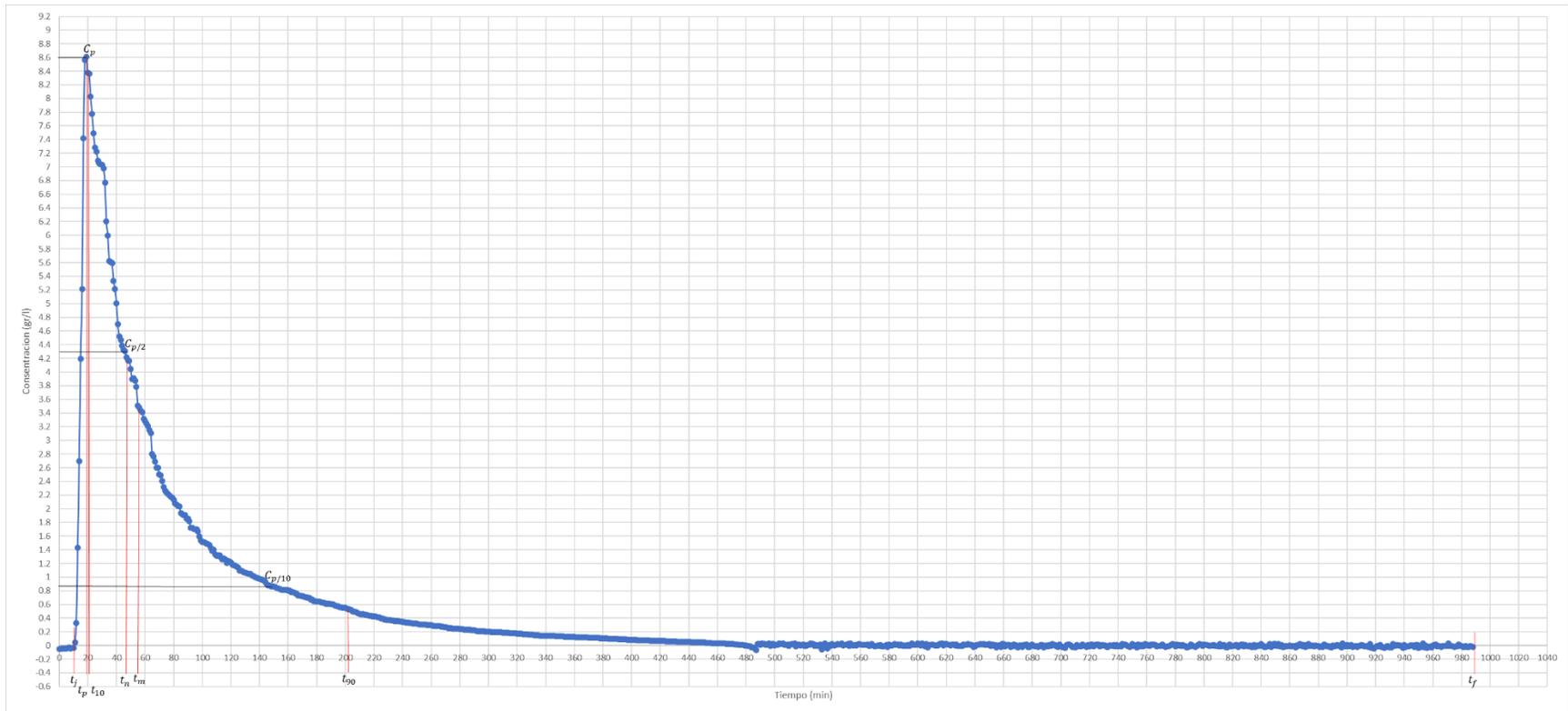


Figura 43.- Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR), prueba con grava y plantas.

4.4.2 Modelo de dispersión.

Los datos de la aplicación de este modelo se muestran en el Cuadro 18. Los resultados del modelo de dispersión presentaron un grado de dispersión grande con un valor de 0.20, lo que también confirma la presencia combinada de flujo de mezcla completa y flujo pistón, con predominio de flujo de mezcla completa.

Cuadro 18.- Resultados del método de dispersión con grava y planta.

TRH experimental (tr) (Min)	σ^2 (Minutos)²	$\sigma(\Theta)^2$	Módulo de Dispersión D/VL	Coefficiente de Dispersión D (m²/s)
86.92	5521.38	0.73	0.20	0.03

4.4.3 Modelo de Wolf-Resnick.

En el Cuadro 19 se presentan los resultados del modelo de Wolf-Resnick. Según estos, se puede deducir un régimen caracterizado por un sistema de flujo dual, presentándose un 37.30% de predominio de flujo mezclado en relación con el flujo pistón. Un volumen de espacios muertos de -2.89, que se atribuye a la presencia de grandes zonas muertas.

Cuadro 19.- Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick con grava y planta.

Parámetros	valores
t1/tn	1.50
t2/tn	7.00
Tan α	0.18
P	0.38
M	0.61
m	-2.89

V. DISCUSIONES

En el Cuadro 20, se observa que la prueba sin grava presenta un mayor tiempo de residencia, tanto teórico como experimental, en las siguientes dos pruebas (Con grava, grava y plantas) los tiempos fueron disminuyendo.

Para el tiempo teórico, la disminución de la segunda y tercera prueba fue de 57% en relación de la primera prueba y para el tiempo experimental la disminución fue de un 28.05 % y 57.51 % en relación de la primera contra la segunda, y de la segunda contra la tercera respectivamente. Lo anterior es debido a que el espacio poroso del sistema fue en disminución y como consecuencia también el módulo y el coeficiente de dispersión disminuyeron conforme la porosidad decrecía. Resultados similares se encontraron en la investigación de Rodríguez *et al.*, (2004) el cual menciona que al disminuir la porosidad del medio filtrante la dispersión del sistema disminuye.

En la prueba con grava y plantas, se tomó el mismo tiempo de residencia teórico de la prueba con grava, pero en el resultado del t_r , tuvo una brusca reducción de 57.51% en comparación con la diferencia entre la primera y segunda prueba. Alasino *et al.*, (2015), mencionan en su investigación que el incremento en el volumen radicular tiene un efecto sobre los tiempos de residencia, ya que al aumentar el primero disminuye el segundo.

Comparando los resultados de la primera prueba contra la segunda, los módulos y los coeficientes de dispersión en esta investigación tuvieron una gran reducción con respecto a la diferencia de la segunda y tercera prueba, esto sucede debido a que, al no tener un medio filtrante el sistema cuenta con mayor volumen, por consiguiente, un mayor tiempo de residencia y una mayor oportunidad de mezcla. Maraña, (2015), encontró en su investigación que al disminuir el espacio poroso

se propician caminos preferenciales del flujo, lo cual provoca la disminución de la distribución del trazador dentro del sistema.

Por otro lado, se puede apreciar que, al disminuir el espacio poroso del sistema, el flujo pistón aumenta, tendencia similar se observa en las investigaciones de Sánchez *et al.*, (2009) y Pérez *et al.*, (2007), quienes mencionan que, al cambiar el medio filtrante de mayor a menor porosidad el flujo pistón se incrementa.

En cuanto al porcentaje de recuperación del trazador, se puede apreciar que, conforme se fueron realizando las pruebas esta fue en aumento quedando en un rango de 82.80% a 87.91% estando dentro del rango de aceptación. La recomendación establecida por Teefy, (1995) indica que la tasa de recuperación del trazador debe de estar dentro del rango de 75% al 90%, para considerar la prueba válida. Porcentajes por debajo del 90% indican la presencia de zonas muertas. Ferrer (2013), recomienda que la tasa de recuperación del trazador debe de estar por arriba del 80 por ciento para que la prueba sea considerada como válida.

Para la variable de zonas muertas, en las tres pruebas se obtuvieron números negativos concordando con lo observado por Rojas *et al.*, 2010; Lindarte *et al.*, 2015, quienes observaron valores negativos en m por el cambio del medio filtrante disminuyendo la porosidad. Lindarte (2015) probó cuatro tipos de materiales filtrantes, encontrando en 3 de 4 pruebas realizadas, valores negativos del valor m .

En las pruebas realizadas en el sistema, se puede apreciar un predominio de flujo de mezcla completa, con ligeros cambios en el parámetro de zonas muertas (Cuadro 21).

Cuadro 20 .- Comportamiento hidrodinámico para cada prueba.

	Sin grava	Con grava	Grava y planta
Porosidad	1.00	0.43	0.43*
Tiempo de retención hidráulico teórico	111.67	48.02	48.02*
Tiempo de retención hidráulico experimental (Min)	284.34	204.58	86.92
Por ciento de recuperación de trazador inyectado	82.80	87.51	87.91
Zonas muertas y/o cortocircuitos Curva de tendencia	Predomina la presencia de cortocircuitos y zonas muertas y recirculación	Mayor presencia de zonas muertas y poca presencia de cortocircuitos	Predominio de zonas muertas, presencia de cortocircuito
Tipo de flujo Wolf Resnick	Mezcla completa: 73.11% Pistón: 26.89%	Mezcla completa: 70.23 % Pistón: 29.76 %	Mezcla completa: 61.46 % Pistón: 38.53 %
Módulo de dispersión	4.33	0.31	0.20
Coefficiente de dispersión	0.51	0.05	0.03

* sin considerar el volumen ocupado por las raíces.

Cuadro 21.- Comparación de los resultados de las relaciones paramétricas experimentales de los tiempos, con el método de momentos en las tres pruebas.

Relación paramétrica	Criterio Relación paramétrica	Sin grava	Con grava	Con grava y planta
t_j/t_n	$t_j/t_n=0$ (Flujo mezcla completa) $t_j/t_n=1$ (Flujo pistón) $t_j/t_n<0.3$ (Corto circuito)	0.19	0.56	0.23
t_m/t_n	$t_m/t_n<1$ (Corto circuito) $t_m/t_n>1$ (Zonas muertas)	1.56	2.07	1.16
t_p/t_n	$t_p/t_n=0$ (Predominio flujo mezcla completa) $t_p/t_n=1$ y $t_p/t_n>0.5$ (Predominio flujo pistón)	0.77	1.04	0.39
t_c/t_n	$t_c/t_n=0.693$ (Flujo mezcla completa)	1.11	1.08	0.60
t_b/t_n	$t_b/t_n=2.3$ (Flujo mezcla completa)	4.48	3.54	2.85
E	$E=0$ (Flujo pistón) $E>2.3$ (Flujo mezcla completa)	10.81	28.67	20.01
Índice de Morril	$MDI<2$ (Flujo pistón)	9.33	11.15	9.90

En la Figura 44, se aprecia la comparación de las curvas DTR normalizadas, donde se observa los cambios en las distribuciones del trazador durante cada prueba. Debido a la disminución del espacio poroso se observa una disminución en los tiempos de residencia, mostrando que al disminuir el espacio poroso se eleva la concentración del trazador en la salida. Así mismo las curvas de DTR normalizadas se vuelven más angostas y con una cola más extendida a los tiempos finales de las pruebas, coincidiendo con los resultados obtenidos por Hart *et al.*, (2012).

En la Figura 45, se puede observar que en las DTR experimentales, al disminuir el espacio poroso, se incrementó la concentración del trazador a la salida del sistema por lo que la duración de las pruebas disminuyó.

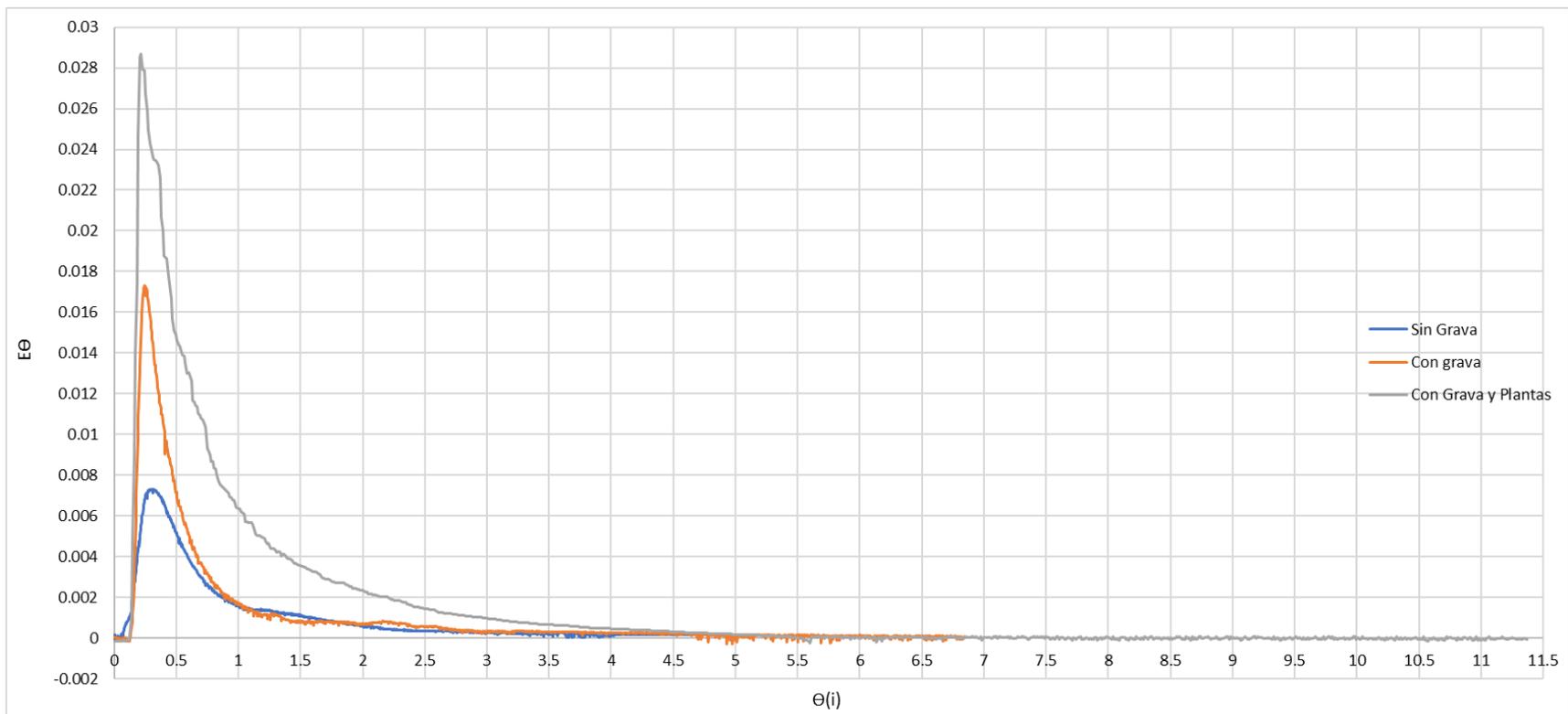


Figura 44.- Comparación de las curvas DTR normalizadas.

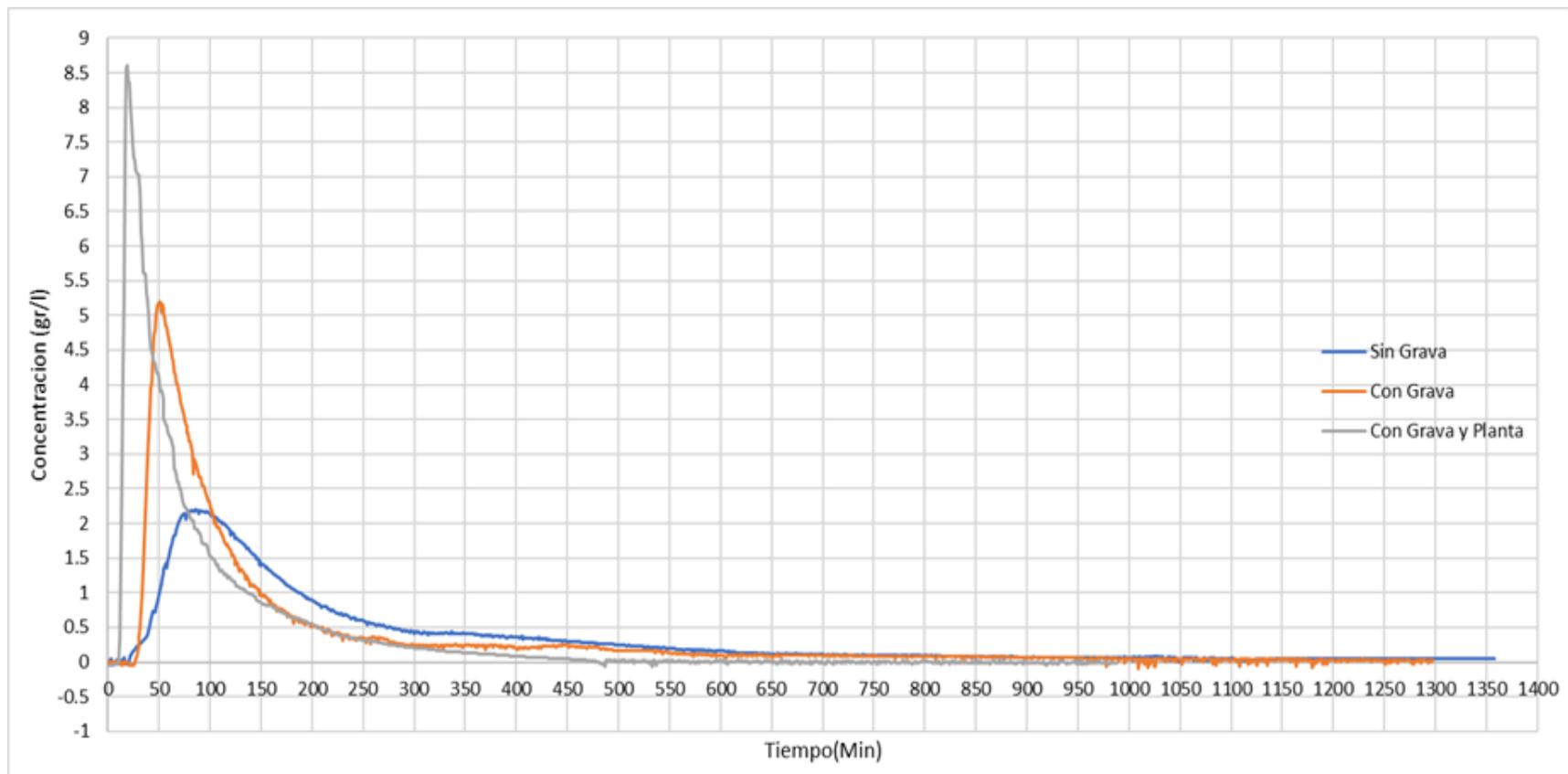


Figura 45.- Comparación de las curvas DTR experimentales.

VI. CONCLUSIONES

Los tiempos de residencia tanto teórico como experimental fueron decreciendo debido a la disminución de la porosidad e incremento de la densidad de raíz. Con ello, también el porcentaje de flujo pistón fue en aumento, pero aun con predominio del porcentaje de flujo completamente mezclado.

Debido a la disminución del espacio poroso del medio filtrante, las curvas de DTR presentan menor tiempo de residencia y una mayor concentración a la salida. Lo anterior se ve reflejado en el módulo de dispersión y el coeficiente de dispersión, ya que estos valores también fueron disminuyendo conforme se disminuyó el espacio poroso. Por ello, se concluye que el espacio poroso tiene una gran influencia sobre los tiempos de residencia, al igual que en la dispersión del flujo en el sistema.

Entre las pruebas de con grava y con grava y planta, se suponía que no habría una diferencia en los tiempos de retención hidráulico tan pronunciada, pero en la comparación de las curvas de DTR normalizadas, indica lo contrario, es decir, que hubo una diferencia en tiempos debida a la disminución de espacio poroso dentro del sistema, que se atribuye al incremento de volumen radicular de la planta.

Para finalizar, se encontró una coherencia de los resultados del comportamiento hidrodinámico del sistema a través del método de momentos, modelo de dispersión y modelo Wolf-Resnick.

Por lo anterior se concluye que, al adicionar grava como medio filtrante y planta como medio depurador, se modifica la hidrodinámica del sistema.

VII. RECOMENDACIONES

Después de haber analizado la información, se recomienda aumentar el tiempo de residencia en el humedal artificial con el objetivo de incrementar el valor de la dispersión por todo el lecho poroso del sistema. Lo anterior se logra reduciendo el gasto de entrada, ya que estos parámetros son inversamente proporcionales. Esto es importante, debido a que en la literatura se demuestra que a mayor tiempo de residencia del sistema mayor es el módulo y coeficiente de dispersión, por lo que se incrementa la eficiencia en la remoción de contaminantes coincidiendo con los resultados que encontraron Larriva *et al.*, (2017), Pérez *et al.*, (2007), que de manera general mencionan que el incremento en la dispersión contribuye a que todos los contaminantes se distribuyan por todo el sistema habiendo una mayor absorción por las plantas, mayor adhesión por el lecho filtrante y mayor actividad microbiana.

Se recomienda continuar con las investigaciones sobre el efecto del crecimiento radicular en la hidrodinámica de estos sistemas.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., Larrosa, N. (2013). Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. Universidad Autónoma de Córdoba, Argentina. 94-103 pp.
- Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., Vidal, Gladys. (2018). Humedales de tratamiento: Alternativas de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 54-85pp.
- Arreguin, F., Trueba, V., Martínez, P. (2004). El agua en México, una visión institucional. 251-260 pp.
- Carabias, J. y R. (2005). Landa. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte. México.
- CNA (2000). El agua en México. Avances y perspectivas. CNA, México, 240-278 pp.
- CNA, SEMARNAT. (2004) Estadísticas del Agua en México. Edición 2004. México, 145-170pp.
- CONAGUA, SEMARNAT. (2007). Estadísticas del Agua en México. Edición 2007. Conagua. México.
- CONAGUA, SEMARNAT. (2012). Subdirección General de Programación, Conagua, Semarnat. México.
- Cooper, P. (1999). A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. Wat. Sci. and Tech. 40(3). 1-9 pp.

- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
- Cunil, F., Iborra, M., Tejero, J. (2010) Reactores químicos. Universidad de Barcelona. 52- 69 pp. CYTED. (2002). Agua potable para comunidades rurales, reusó y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas.
- CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS (CRICYT). (2007). Macrófitas, Gobierno de Mendoza.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia. 31-59 pp.
- Eddy, I., Burton, F., Stensel, H. (2003). Ingeniería de aguas residuales. 4ta ED. McGraw-Hill, Nueva York. 210-240 pp.
- FAO. (2010). Experiencias en prácticas de manejo de aguas servidas para la producción agrícola a pequeña escala. Santiago, Chile, 65-92 pp.
- Ferrer, G., Moran, C., Aldana, G. Pérez, J. (2013). Determinación del tiempo retención hidráulico en humedales construidos de flujo horizontal usando un trazador químico. Univ. Zulia. Vol. 36, No. 3. 262-270pp.
- Gaona, R. (2006). El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. Edición 2006. México, DF, 15-23 pp.
- García, G., Cantú, P. (2009). Escenario del agua en México. CULCYT. 33-39 pp.
- García, M., Pérez, J. A. (1985). Aguas Residuales. Composición y aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Granada. 8-16 pp.

- Giácoman, G.; Rejón, L. y Aguilar, S. (2006). Evaluación de las características hidráulicas de un reactor de lecho fluidizado para el tratamiento aerobio de las aguas residuales, XV Congreso Nacional de Ingeniería sanitaria y Ciencia Ambiental, Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (FEMISCA). 14-34 pp.
- Giraldi, D., Michieli, M., Zaramella, M., Marion, A., Iannelli, R. (2007). Hydrodynamics of vertical subsurface flow constructed wetlands: Tracer tests with rhodamine WT and numerical modelling. University of Pisa, Italy. 265- 273 pp.
- Rodríguez, M., Jacome, A., Molina, J., Suarez, J. (2012). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. Ingeniería Investigación y Tecnología. 224-232pp.
- Hernández, E. (2003), Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de aguas potables "LO DE COY". Universidad San Carlos. Guatemala. 23- 65 pp.
- Iglesias, D. (2015). La valoración económica y mercantilización del agua de consumo humano en el Estado de México. Algunos determinantes. Estado de México.
- Jiménez, B., Marín, L. (2004). EL AGUA EN MÉXICO VISTA DESDE LA ACADEMIA. Academia Mexicana de Ciencias. 1er Ed. 15-21pp.
- Kadlec, R. (2000). The inadequacy of first-order treatment wetland models. Ecological Engineering: 105-119pp.
- Kadlec, R y Wallace, S. (2009). Treatment Wetlands. Group Publishers. Boca Raton, Florida.

- Larriva, J., González, O. (2017). Cinética de la remoción de DBO5 en humedales con flujo sub-superficial horizontal. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Habana, Cuba.19-29 pp.
- Levenspiel, O. (1962). Chemical Reaction Engineering. New York, Ed. Jhon Wiley and Sons, 253-309 pp.
- Levenspiel, O. (1998). Ingeniería de las reacciones químicas. 2a Ed. México, D.F. Limusa Wiley.
- Levenspiel, O. (2002). Ingeniería de las reacciones químicas. 3a Ed. Barcelona: Ed. Reverté. 638-640 pp.
- Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las reacciones químicas. 4a Ed. Limusa Wiley Publishers. México.
- Lindarte, J., Zarate, P. (2015). Evaluación hidrodinámica de un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala piloto utilizando como medios filtrantes antracita, carbón activado y coque y su efecto en un agua residual. Universidad de Bogotá, Colombia. 17-33 pp.
- Maraña, E. (2015). Determinación del tiempo de residencia de las aguas en los humedales artificiales de flujo vertical. Facultad de ingeniería, UNIVERSIDAD DE CARTAGENA. 32-40pp.
- Marín, D. (2007). Cinética e hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Marín, L. (2007). Determinación experimental de la distribución de tiempos de residencia en un estanque agitado con pulpa. 9-14 pp.
- METCALF y EDDY. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen 2. México.

- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. 1er ed. Universidad Autónoma de Hidalgo. Mineral de reforma, Hidalgo, Mex.50-125 pp.
- Peralta, G. (2008). Análisis y optimización del flujo del acero líquido en un distribuidor de colada continua tipo delta de cuatro salidas. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 16-26 pp.
- Pérez, A., Torres, P. (2007). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. Número 45. Cali, Colombia. 29-38 pp.
- Pérez, E. (2009). Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango. Centro de investigación de materiales avanzados, s.c.15-20pp.
- Pérez, J., (1992). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. CEPIS/OPS, Manual de evaluación. Cali. Colombia. 24-31 pp.
- PNUMA (Programa de las naciones unidas para el medio ambiente). (2007). Perspectivas del medio ambiente mundial GEO4 medio ambiente para el desarrollo. 115-157 pp.
- Rojas, A., García, A. (2010). Análisis de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación. Tecnología Química, vol. XX, núm. 1. Universidad de Oriente. Santiago, Cuba. 61-68pp.
- Rodríguez, A. (2017). Diseño de un humedal artificial para el municipio arcos de las salinas (Teruel). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Sánchez, J., Cardona, S. (2009). Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de pequeña escala. Número 20, Medellín, Colombia. 65-80 pp.

- Sánchez, J., Cardona, S. (2009). Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de pequeña escala. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 65-77pp.
- Shiklomanov, A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. Water International, Vol 25(1). 11-32 pp.
- Teefy, S. (1995). Tracer studies in Water Treatment Facilities: A Protocol and case Studies. Alameda country wáter district. 6-30 pp.
- Subdirección de Operación de Proyectos UAAAN. (2011). Campos experimentales. Dirección de investigación, Saltillo, Coahuila, Mex. 5-7pp.
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México. 11-17 pp.
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. 215-230pp.