



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO CONCEPTUAL DE DOS HUMEDALES PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA LOCALIDAD EL  
ALBERTO EN IXMIQUILPAN, HIDALGO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

SOLEN MAGALY ROMERO BELTRÁN



México, D.F.

Año 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO  
VOCAL: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
SECRETARIO: ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA  
1er. SUPLENTE: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ  
2º SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:



Alma Concepción Chávez Mejía

SUSTENTANTE:



Solen Magaly Romero Beltrán

**“Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental que cuenta con certificación de la calidad ISO 9001:2008 otorgada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMNC) con registro RSGC 960 de fecha 11 de enero de 2016, vigente al 11 de enero de 2019”**

# DISEÑO CONCEPTUAL DE DOS HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA LOCALIDAD EL ALBERTO EN IXMIQUILPAN, HIDALGO

## RESUMEN

En esta investigación se realizó el diseño conceptual de dos humedales artificiales (HA) para la localidad de El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan, del estado de Hidalgo, México, como sistema de tratamiento de agua residual para su reúso agrícola y cumplimiento de la normatividad en cuanto a sus descargas en el río Tula.

Para su realización se llevó a cabo el muestreo en dos puntos estratégicos de la localidad, se efectuó la medición de los parámetros de calidad a 36 muestras simples y 6 compuestas, así como la determinación del gasto para el posterior dimensionamiento de los humedales.

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual mostraron una alta variabilidad, por lo que fue necesario realizar un análisis estadístico a los valores obtenidos en la medición de cada parámetro y así incluir todos los puntos evitando un sobredimensionamiento o en su defecto un subdimensionamiento de los humedales. El sistema de tratamiento de agua residual al que se llegó fue, para ambos casos, un humedal de flujo subsuperficial con macrófitas emergentes enraizadas, principalmente juncos de agua (*Juncus acutus*), con los que se cuenta en la localidad. Para el punto de muestreo llamado "Escuela" se tiene un área total de 376 m<sup>2</sup> y para el punto "Potabilizadora" se obtuvo como resultado un área de 117 m<sup>2</sup>.

Se concluye a partir del análisis de resultados que, debido a la variabilidad del gasto y la concentración de los parámetros medidos fue necesario considerar un pretratamiento para poder regularlos antes de la entrada al sistema de tratamiento de agua residual por medio de humedales.

En cuanto a los tiempos de retención y la relación largo y ancho obtenidos se encuentran dentro de los reportados en la literatura.

## ABSTRACT

In this research is presented an engineering design of two artificial wetlands located in the indigenous community of El Alberto in the municipality of Ixmiquilpan, Hidalgo State, Mexico. This two artificial wetlands were designed to treat the wastewater produced in the community aiming to meet the discharge national standard in the Tula River and also to reuse the treated water in agricultural labors.

In order to elaborate the wetlands design a sampling campaign was conducted in the community, water quality parameters were measured in 36 single samples and 6 composite samples, also the flow was measured. This two features, quality and quantity, were used to design the wetlands.

The results obtained from the characterization of the wastewater showed a high variability, so it were necessary to perform a statistical analysis of the values of each parameter to avoid wetlands oversized or undersized. For both cases the final design consist in a subsurface flow with rooted emerged macrophytes, mainly water rushes (*Juncus acutus*), present in the local flora. To the location called "Escuela" the total surface was 376 m<sup>2</sup>, and for the location called "Potabilizadora" the total surface was 117 m<sup>2</sup>.

According to the analysis of the data and due to the flow variability and the parameters assessed it was necessary to considerer a pretreatment stage to regulate the wastewater quality at the entrance of the system.

The retention time and the relation between wide and large obtained in this project are among the most common values reported in the literature.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE MAPAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	4
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1 ANTECEDENTES.....	5
2.1.1 <i>Distribución global del agua</i> .....	5
2.1.2 <i>Situación del agua en México</i> .....	6
2.1.3 <i>Normatividad</i> .....	14
2.1.4 <i>Problemática del agua en zonas rurales de México</i> .....	14
2.1.4 <i>Alternativas para el tratamiento de agua residual en zonas rurales</i> .....	15
2.1.5 <i>Humedales</i> .....	17
2.1.5.1 <i>Definición</i> .....	17
2.1.5.2 <i>Clasificación de los Humedales</i> .....	18
2.1.5.3 <i>Principales componentes</i> .....	22
2.1.5.4 <i>Procesos que se llevan a cabo en la remoción de contaminantes en los humedales</i> .....	27
2.1.6 <i>Parámetros de diseño</i> .....	29
2.1.7 <i>Ventajas y desventajas de los humedales artificiales</i> .....	29
2.1.8 <i>Eficiencias de remoción en los humedales artificiales</i> .....	31
2.2 SITIO DE ESTUDIO.....	34
2.2.1 <i>Localización</i> .....	34
2.2.2 <i>Condiciones climatológicas</i> .....	35
2.2.3 <i>Datos poblacionales</i> .....	36
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	39
3.1 PUNTOS DE MUESTREO.....	39
3.2 MUESTREO.....	40
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	42
3.4 DISEÑO TEÓRICO DEL HUMEDAL.....	46
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL .....	49
4.2 RESULTADOS DE LOS GASTOS MEDIDOS .....	59
4.3 DIMENSIONAMIENTO CONCEPTUAL DE LOS HUMEDALES .....	60
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS .....	67
ANEXO 1 MEMORIA FOTOGRÁFICA DEL MUESTREO.....	71
ANEXO 2 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	74
ANEXO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	85

## ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1 Regiones hidrológicas. ....	7
Mapa 2 Regiones hidrológico-administrativas. ....	7
Mapa 3 Ríos principales en México.....	8
Mapa 4 Ubicación del estado de Hidalgo, México.. ..	34
Mapa 5 Localización de la localidad de El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan.. ..	34
Mapa 6 Clima del estado de Hidalgo por regiones.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Agua residual generada, colectada y tratada.....	10
Tabla 2 Valores máximos y mínimos de diversos parámetros en el agua del río Tula. ....	13
Tabla 3 Composición típica del agua residual doméstica.....	23
Tabla 4 Listado de especies que comprenden el componente vegetal. ....	26
Tabla 5 Procesos que se producen en un humedal artificial.. ..	27
Tabla 6 Procesos que contribuyen a la remoción de contaminantes. ....	28
Tabla 7 Parámetros típicos de diseño para humedales artificiales.. ..	29
Tabla 8 Comparación entre diferentes sistemas de flujo.. ..	29
Tabla 9 Comparación entre humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical. ....	30
Tabla 10 Eficiencias de remoción (%) para los diferentes sistemas de tratamiento de agua residual.....	31
Tabla 11 Remoción de contaminantes en agua residual, en una PTAR.....	32
Tabla 12 Frecuencia de muestreo para el proceso generador de la descarga. ....	40
Tabla 13 Parámetros para el dimensionamiento de los humedales.....	46

Tabla 14 Resultados obtenidos en la caracterización del agua residual en el punto "Escuela" .....	49
Tabla 15 Resultados obtenidos en la caracterización del agua residual en el punto "Potabilizadora" .....	50
Tabla 16 Resultados obtenidos en la caracterización de las muestras compuestas, punto de muestreo "Escuela" .....	53
Tabla 17 Resultados obtenidos en la caracterización de las muestras compuestas, punto de muestreo "Potabilizadora" .....	54
Tabla 18 Resultados de metales en la caracterización del agua residual, límites máximos permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas.....	54
Tabla 19 Parámetros estadísticos de nitrógeno amoniacal, "Escuela" .....	55
Tabla 20 Parámetros estadísticos para el punto de muestreo "Escuela" .....	56
Tabla 21 Parámetros estadísticos para el punto de muestreo "Potabilizadora" .....	57
Tabla 22 Personal equivalente y carga orgánica para los puntos de muestreo .....	58
Tabla 23 Valores máximo, mínimo y media para cada punto de muestreo.....	60
Tabla 24 Parámetros del influente "Escuela" .....	60
Tabla 25 Parámetros del influente "Potabilizadora" .....	60
Tabla 26 Parámetros del efluente para ambos puntos de muestreo .....	61
Tabla 27 Resultados obtenidos en el dimensionamiento de los humedales .....	61

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Puntos de descarga de agua residual.. .....	9
Gráfica 2 Plantas de tratamiento de agua residual según su proceso de tratamiento. ....	10
Gráfica 3 Tabla comparativa de los valores medios obtenidos con respecto a la normatividad, punto de muestreo "Escuela" .....	51
Gráfica 4 Tabla comparativa de los valores medios obtenidos con respecto a la normatividad, punto de muestreo "Potabilizadora" .....	52
Gráfica 5 Distribución para el parámetro nitrógeno amoniacal, "Escuela" .....	56
Gráfica 6 Gastos medidos en el punto "Escuela".....	59
Gráfica 7 Gastos medidos en el punto "Potabilizadora" .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Transporte del agua residual proveniente de la Ciudad de México.....	12
Figura 2 Clasificación de HA en función de la carga orgánica y tipo de vegetación.. ....	18
Figura 3 Clasificación de HA en función de la carga orgánica y tipo de vegetación.. ....	18
Figura 4 Humedal artificial de flujo superficial.. .....	19

Figura 5 Humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	20
Figura 6 Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	21
Figura 7 Macrófitas acuáticas flotantes.. .....	21
Figura 8 Macrófitas acuáticas sumergidas.. .....	22
Figura 9 Macrófitas acuáticas emergentes.. .....	22
Figura 10 Balneario del "Parque EcoAlberto" .....	37
Figura 11 Parque recreativo "El Gran Cañón" .....	37
Figura 12 Ubicación de los puntos de muestreo.. .....	39
Figura 13 Descarga, punto de muestreo "Escuela" .....	41
Figura 14 Descarga, punto de muestreo "Potabilizadora" .....	41
Figura 15 Multiparámetro utilizado para la medición de parámetros <i>in situ</i> .....	43
Figura 16 Turbidímetro .....	43
Figura 17 Laboratorio para la medición de parámetros en el sitio de muestreo.....	44
Figura 18 Toma de muestra puntual para el punto "Escuela" 06:52 a.m. ....	51
Figura 19 Toma de muestra puntual para el punto "Escuela" 13:41 p.m. ....	51
Figura 20 Punto de muestreo "Escuela" sin gasto 23/04/2015.....	53
Figura 21 Junco de agua ( <i>Juncus acutus</i> ) en El Alberto .....	62
Figura 22 Esquema del tren de tratamiento del agua residual .....	63
Figura 23 Detalle de los humedales .....	64

# CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad enfrenta serios problemas en varios ámbitos; uno de ellos y de enorme importancia es el deterioro de los recursos naturales considerados hasta hace poco como renovables (SEMARNAT, 2014).

En las últimas décadas se ha observado un acelerado proceso de sobreexplotación de la mayoría de ellos; dentro de los más importantes destaca el recurso agua, cuyas fuentes de aprovechamiento, tanto superficial como subterránea, han tenido un deterioro constante, ocasionando que se presente baja o escasa disponibilidad del recurso en muchas regiones del mundo (SEMARNAT, 2014).

Parte de este problema se debe al acelerado crecimiento de la población y su desigual distribución en el planeta, de acuerdo con Toledo (2002) cerca del 75 % de la población humana se concentra en países y regiones donde sólo existe el 20 % de la disponibilidad de agua.

En nuestro país el problema de abastecimiento de agua y alcantarillado aún no está resuelto, de acuerdo con la SEMARNAT (2014) a diciembre de 2013, 8.9 millones de mexicanos no cuentan con el servicio de agua potable (8%) y de manera adicional 10.5 millones carecen del servicio de alcantarillado (9.4%).

De mayor importancia, es necesario ampliar las coberturas de los servicios entre la población más pobre o vulnerable, especialmente en zonas rurales<sup>1</sup> ya que para las personas en esta situación representan una pesada carga para acceder a los servicios antes mencionados.

La contaminación del agua es otro de los problemas que se presenta, los cuerpos acuáticos naturales y artificiales son altamente propensos a recibir agua contaminada con o sin tratamiento previo, lo cual origina el detrimento en la calidad de este recurso y con ello la pérdida de diversidad biótica nativa y su potencial como fuente de abastecimiento de agua para diversas actividades humanas (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

En México, el problema de la contaminación del agua y su baja disponibilidad para las diversas actividades económicas y productivas del país es cada vez más creciente, lo cual ha obligado a la búsqueda de alternativas de solución económicamente viables para su tratamiento y reúso.

De acuerdo con Luna-Pabello, *et al.*, (1997) los humedales son una alternativa para la depuración de agua residual de tipo doméstico y pueden solventar el problema de tratamiento en comunidades rurales generadas por pequeñas y medianas

---

<sup>1</sup> De acuerdo con el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2500 habitantes.

comunidades, su importancia y trascendencia radica fundamentalmente en que son más baratos y se adoptan mejor a las condiciones de México que los sistemas de tratamiento convencionales actualmente utilizados, aunado a ello, el sistema se puede combinar con otros procesos depuradores ya existentes, a fin de optimizar su rendimiento.

Adicionalmente, este sistema es altamente eficiente para eliminar bacterias patógenas del agua residual y ofrece un aspecto agradable a la vista, construyendo por sí mismo una reserva para la vida silvestre.

La comunidad El Alberto, cuenta con una población total de 834 habitantes de acuerdo con INEGI (2010a), comparte las condiciones actuales de migración de otras comunidades indígenas y rurales de la región, expulsando significativos flujos migratorios a Estados Unidos de América. Por este motivo, la comunidad se vio en la necesidad de crear una opción que les generara ingresos, en este caso el Ecoturismo, de acuerdo con Palomino *et al.*, (2008) este concepto se refiere a un turismo que está en contacto directo con la naturaleza, preocupado por la conservación de los recursos naturales y culturales del lugar.

Asimismo, ha representado una oportunidad para impulsar nuevas actividades económicas, que complementen el ingreso de las comunidades poseedoras del patrimonio cultural y natural, lo que a su vez supone elevar su calidad de vida y crear nuevas formas de relación con la naturaleza.

Es por ello que el problema que se pretende abordar en esta tesis versa sobre el diseño de humedales para el tratamiento de agua residual, teniendo como objetivo el diseño conceptual de dos plantas de tratamiento mediante humedales para dos puntos estratégicos de descarga de agua residual que confluyen en el río Tula, en la comunidad Hñahñu<sup>2</sup> de la localidad El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo, para su aprovechamiento en riego agrícola como una alternativa al agua cruda o de primer uso, así, la comunidad se hará responsable de las descargas de agua residual que genera.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos; en el primero de ellos se presenta una breve descripción de la situación del agua en materia de acceso, tratamiento y reúso, se describe el problema a tratar, la delimitación del problema y los objetivos planteados, así como los alcances y limitaciones del mismo.

La teoría involucrada en la realización de este trabajo, los antecedentes que existen sobre el tema así como la revisión y comparación con trabajos similares nacionales e internacionales son presentados en el segundo capítulo.

El tercer capítulo contiene la metodología empleada para la obtención de los resultados presentados en el trabajo, en este se presenta la selección de los puntos

---

<sup>2</sup> Pueblo indígena *otomí*.

de muestreo, la realización del mismo, la caracterización del agua residual y por último el diseño conceptual de las plantas de tratamiento de agua residual.

En el cuarto capítulo se incluye el análisis de los resultados obtenidos de los parámetros evaluados en la caracterización del agua residual, se analiza el diseño propuesto de los humedales y se demostrará o refutará la hipótesis planteada.

En el último de los capítulos se incluyen las conclusiones que se obtuvieron con la realización del trabajo y una serie de recomendaciones para futuras investigaciones y acciones que se podrían llevar a cabo a partir de los resultados obtenidos. Se presentan una serie de anexos donde se podrá conocer a detalle el análisis estadístico de los resultados obtenidos, la memoria fotográfica del muestreo así como los procedimientos utilizados en la caracterización del agua residual.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La localidad de El Alberto en Ixmiquilpan, Hidalgo, se encuentra localizada a orillas del río Tula. La calidad del agua del río se ha visto afectada por las descargas de agua residual que recibe provenientes de la Ciudad de México desde hace más de 100 años y de las comunidades aguas arriba del mismo, así como las generadas por la misma comunidad, todas estas sin un tratamiento previo, lo cual genera un desequilibrio en el ecosistema y representa riesgos importantes a la salud de los habitantes de todas las comunidades que tienen contacto con el cuerpo de agua. En la mayoría de las ocasiones, el agua de río se utiliza para el riego de cultivos que son consumidos localmente o se comercializan usualmente con destino a la Ciudad de México.

Particularmente en la localidad de El Alberto se tiene un contacto directo con el agua del río ya que se llevan a cabo actividades recreativas debido al Ecoturismo que se ofrece en la comunidad, por lo que los visitantes también se ven afectados con la calidad del agua del río Tula.

Aunado a ello, la comunidad no cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual generada y sus descargas, sin cuantificar, se vierten al río Tula, esto genera una aportación más de agua residual, y por consiguiente, un decremento de la calidad del agua.

Para contrarrestar el efecto negativo generado por las descargas de la comunidad hacia el río Tula y reducir los riesgos que implica el uso de agua contaminada en el riego de cultivos, se eligieron dos puntos de descarga estratégicos en los que se implementarán plantas de tratamiento de agua residual por medio de humedales artificiales, para obtener agua con una calidad adecuada para su reuso en actividades productivas.

La comunidad recibirá entonces beneficios derivados del reuso y aprovechamiento de un recurso seguro para riego, les permitirá evitar sanciones por las descargas del agua residual comunal sin tratamiento previo en aguas nacionales, disminuirá el

impacto negativo en la salud por el uso de agua contaminada y fortalecerá su compromiso de convertirse en una comunidad respetuosa del ambiente, lo cual permitirá hacer conciencia y promoverá en comunidades cercanas el tratamiento del agua residual.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 OBJETIVOS GENERALES

Proponer el diseño conceptual de dos humedales para el tratamiento del agua residual de dos descargas generadas en la localidad El Alberto en Ixmiquilpan, Hidalgo.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Establecer los puntos de descarga de agua residual en donde se instalarán las plantas de tratamiento.

Determinar la calidad del agua residual que servirá de base para el diseño conceptual.

Proponer un prototipo de humedal para ambos puntos de muestreo, de acuerdo a los resultados obtenidos de los parámetros medidos en la caracterización del agua y su reúso.

### 1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

En este trabajo se propondrá el diseño conceptual de dos humedales en dos puntos de descarga seleccionados, ubicados en la comunidad Hñahñu en la localidad El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo.

Se realizará el muestreo del agua residual para su posterior caracterización, obteniendo una base de datos con los parámetros fisicoquímicos y biológicos que nos permitirá proponer un prototipo de humedal en ambos puntos.

Debido a que no se cuenta con los planos de la red de alcantarillado de la localidad, no se sabe con certeza cuantas casas están conectadas a la red de drenaje de los puntos de muestreo, por lo que se realizará una estimación de usuarios por medio del flujo medido.

Los usos y costumbres de la comunidad Hñahñu deberán tomarse en cuenta para el diseño del monitoreo de la calidad del agua, ya que este puede verse influenciado.

Una vez diseñados los humedales, se expondrán los resultados a los miembros de la comunidad para que posteriormente se apruebe la construcción y operación de las plantas de tratamiento de agua residual, lo cual queda fuera de los alcances de este trabajo.

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 ANTECEDENTES

#### 2.1.1 DISTRIBUCIÓN GLOBAL DEL AGUA

El agua es un componente muy importante para la vida, entorno a ella se desarrollan actividades sociales y económicas, es un recurso natural con valor ecológico y económico.

De acuerdo con Toledo (2002) en el artículo El agua en México y en el mundo se menciona que:

De los aproximadamente 113 000 km<sup>3</sup> de agua que se precipitan cada año sobre la Tierra en el ciclo hidrológico<sup>3</sup>, cerca de 71 000 km<sup>3</sup> se evaporan y retornan a la atmósfera, el resto, unos 42 000 km<sup>3</sup>, recargan los acuíferos o retornan a los océanos por la vía de los ríos. Constituyen los recursos acuáticos renovables, las aguas dulces del planeta. Sin embargo, los volúmenes realmente disponibles de estos recursos sólo se estiman entre 9000 a 14 000 km<sup>3</sup>. Y lo que es más: un monto sustancial, aproximadamente el 70%, es necesario para sostener los ecosistemas terrestres, lo que reduce a un 30%, unos 4200 km<sup>3</sup>, las disponibilidades reales para todos los usos humanos directos (...) Sin embargo, los recursos acuáticos del planeta varían considerablemente en espacio y tiempo (...).

La mayoría de los recursos de agua dulce del planeta se concentran en sólo seis países: Brasil, Rusia, Canadá, EE.UU., China e India. Más del 40% de los ríos del mundo se concentran en estos países. El mayor de ellos, el Amazonas, contribuye con el 16% de los montos totales descargados por los ríos del planeta. El 27% del agua dulce de la Tierra corresponde a los aportes de cinco grandes cuencas<sup>4</sup> de agua: Amazonas, Ganges-Bramaputra, Congo, Yantzé y Orinoco. Los ríos con flujos promedios superiores a los 100 km<sup>3</sup> por año concentran el 46% de los recursos de agua dulce de la Tierra. Pero estos flujos son estacionales. Cerca del 45 al 55% tienen lugar en los periodos lluviosos del año. La cantidad de recursos acuáticos en los continentes varía de acuerdo con las estaciones del año. Por ejemplo: la mayor parte de los flujos en los ríos de Europa ocurren entre abril y julio (46%), en Asia, durante junio y octubre (54%), en África en septiembre-diciembre

---

<sup>3</sup> El ciclo hidrológico se define como: Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación. (OMM/UNESCO, 2012).

<sup>4</sup> Cuenca. Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial. (OMM/UNESCO, 2012).

(44%), Sudamérica durante abril-julio (45%) y Australia y Oceanía durante enero-abril (46%). En promedio cerca del 46% del total global de las descargas de los ríos ocurren entre mayo y agosto.

### 2.1.2 SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

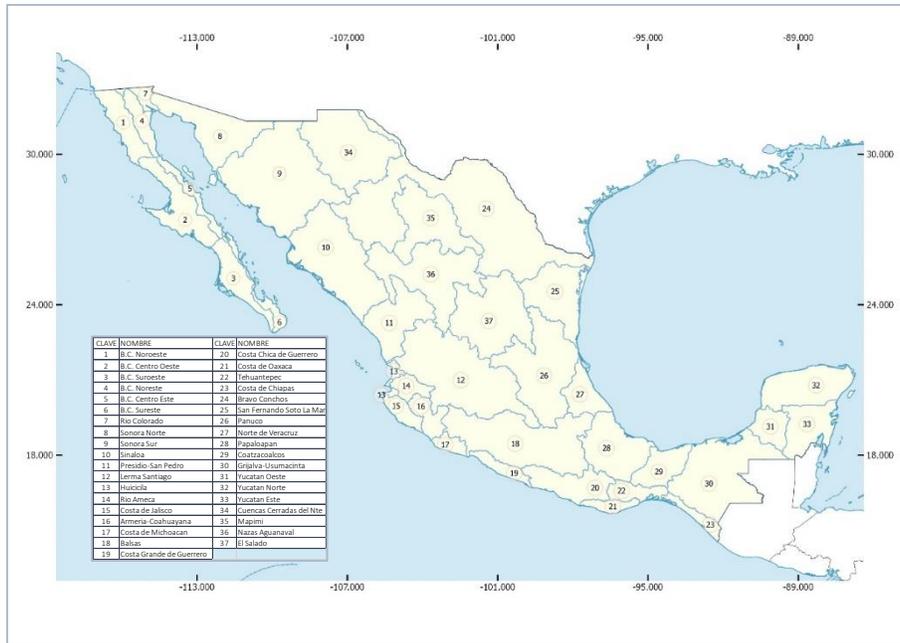
En países en desarrollo como el nuestro, nos enfrentamos a una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada gestión.

En el ciclo hidrológico, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por los ríos y arroyos delimitados por las cuencas, o bien se infiltra en los acuíferos (CONAGUA, 2014a).

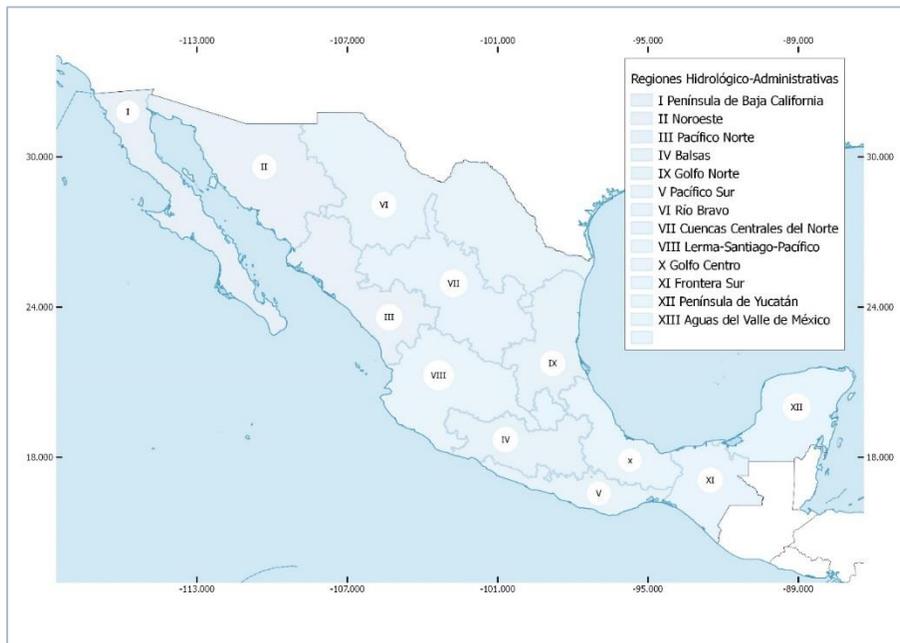
Anualmente, México recibe alrededor de 1 489 000 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. Se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmósfera. El 22.2% escurre por ríos y arroyos, donde adicionalmente se tienen entradas y salidas con los países vecinos. El 6.2% restante se infiltra y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las entradas y salidas de agua con países vecinos, se cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable al año, a lo que se denomina también disponibilidad natural media (CONAGUA, 2014b).

Para propósitos de administración y preservación de las aguas nacionales, a partir de 1997, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha definido 731 cuencas hidrológicas, consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH) cuya distribución y nombres puede observarse en el mapa 1.

A su vez, las regiones hidrológicas se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) cuyos límites respetan los municipales, para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos. La distribución de las RHA se muestra en el mapa 2.



MAPA 1 REGIONES HIDROLÓGICAS. FUENTE: CONAGUA, 2014.



MAPA 2 REGIONES HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVAS. FUENTE: CONAGUA, 2014.

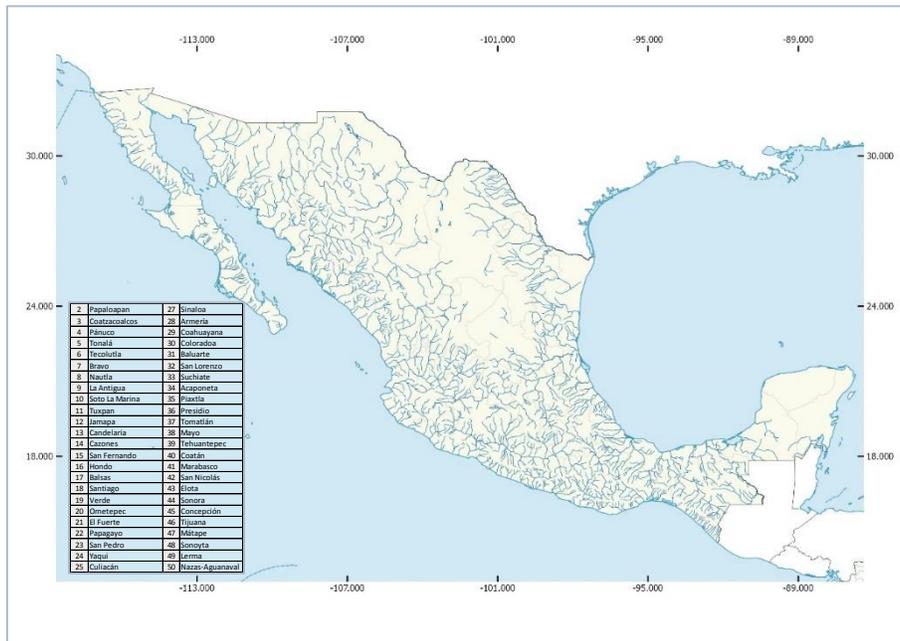
En lo que se refiere al agua subterránea, de acuerdo con CONAGUA (2014b) el país está compuesto por 653 acuíferos. La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios.

Alrededor del 37% del volumen total concesionado para usos consuntivos<sup>5</sup> (30 374 millones de metros cúbicos por año al 2013), pertenece a este origen.

El mayor problema de esta fuente de abastecimiento es la extracción excesiva (se extrae más agua de la que se infiltra), debido a ella del 2001 al 2014 el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106 de un total de 653.

Otra fuente de abastecimiento, son las fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) de las cuales el 63% del agua utilizada en el país es para uso consuntivo.

Los ríos y arroyos de México constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud. Por los cauces de los 50 ríos principales cuya distribución se observa en el mapa 3, por estos fluye el 87% del escurrimiento superficial de la República y sus cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país.



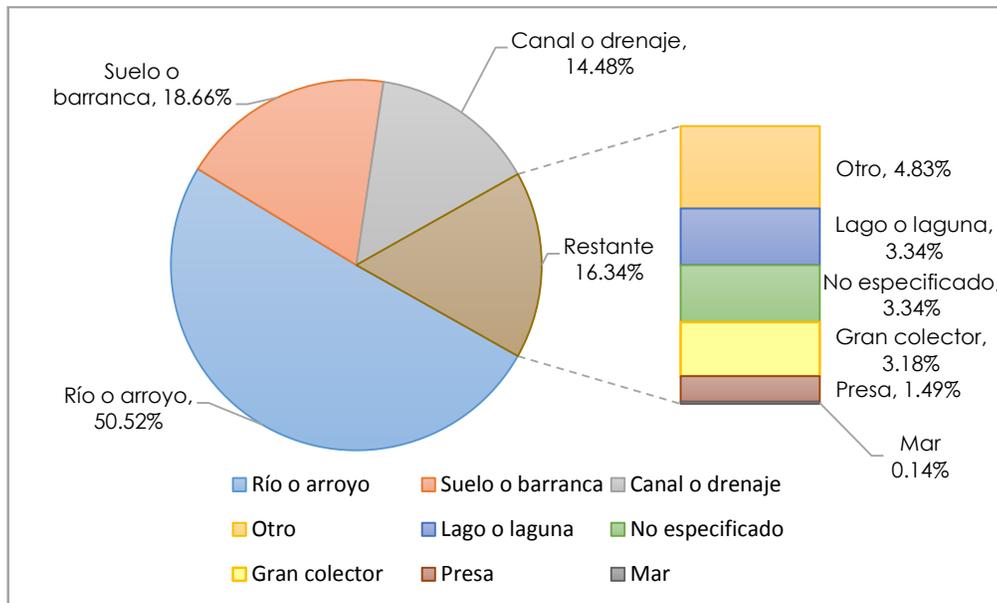
MAPA 3 RÍOS PRINCIPALES EN MÉXICO. FUENTE: CONAGUA, 2014.

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de agua residual sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial agrícola o pecuario, lo que ha ocasionado grados variables de contaminación que limitan el uso directo del agua, generando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (CONAGUA, 2014b).

<sup>5</sup> De acuerdo con (CONAGUA, 2007) se han agrupado los usos del agua en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, es decir agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas.

En las últimas décadas el número de habitantes en nuestro país se ha incrementado de manera constante (1.4% de 2000 a 2010)<sup>6</sup>, concentrándose en las principales ciudades, propiciando el incremento en el consumo de agua potable y en consecuencia generando un mayor volumen de agua residual.

Existen diversos puntos de descarga para el agua residual los cuales se muestran en la gráfica 1, en donde se puede observar que el principal punto son los ríos o arroyos con más del 50% de las descargas totales.



GRÁFICA 1 PUNTOS DE DESCARGA DE AGUA RESIDUAL. FUENTE: INEGI, 2013. ELABORACIÓN PROPIA.

En el contexto nacional, se estima que aproximadamente el 54% del agua residual generada es descargada al ambiente sin ningún tratamiento adecuado, en la tabla 1 se muestra el agua residual generada, colectada y el agua residual tratada a partir del año 2003 al 2013.

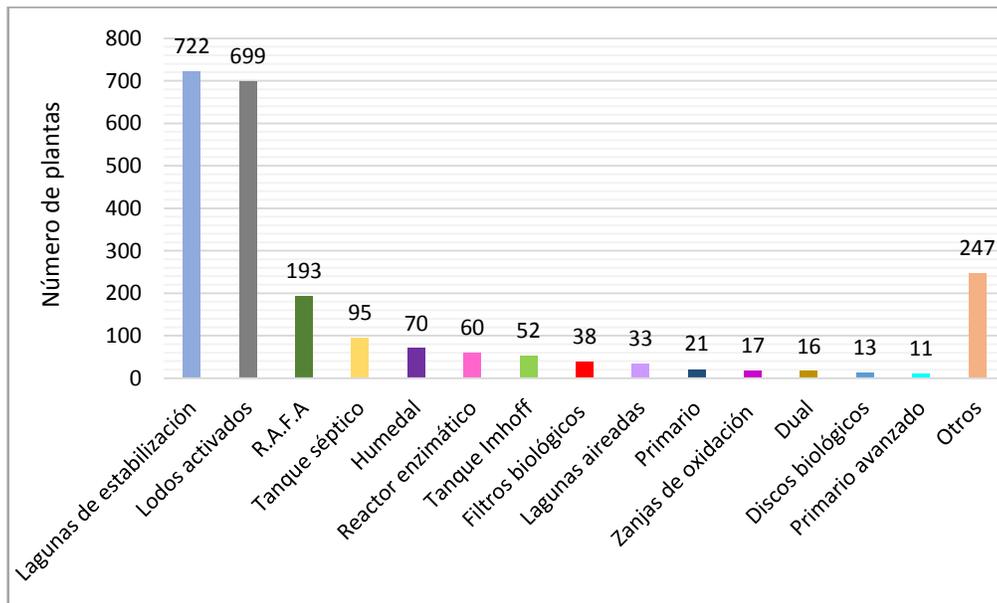
Se puede observar el avance que se ha tenido en el tratamiento del agua residual ya que en 2003 tan solo se trataba aproximadamente el 23%, comparado con el año 2013, que un 46% del agua residual generada recibe un tratamiento. No obstante se debe seguir trabajando para que dichas cifras sigan en aumento.

En México, se cuenta con 2287 plantas de tratamiento de agua residual de las cuales el tratamiento por medio de humedales equivale al 3.06% del total de las mismas, es decir se cuenta con 70 plantas de tratamiento de agua residual mediante humedales. Los métodos más utilizados en el país se muestran en la gráfica 2.

<sup>6</sup> INEGI (2010a).

TABLA 1 AGUA RESIDUAL GENERADA, COLECTADA Y TRATADA. FUENTE: SEMARNAT (2014).

AÑO	AGUA RESIDUAL GENERADA (m³/s)	AGUA RESIDUAL COLECTADA (m³/s)	AGUA RESIDUAL TRATADA (m³/s)	% DE TRATAMIENTO CON BASE EN EL AGUA COLECTADA
2003	255.30	203.01	60.24	29.67
2004	255.17	205.06	64.54	31.47
2005	265.63	205.02	71.78	35.01
2006	242.10	205.84	74.39	36.14
2007	242.81	207.13	79.29	38.28
2008	235.84	208.01	83.64	40.21
2009	237.46	209.09	88.13	42.15
2010	235.08	209.07	93.60	44.77
2011	236.35	210.14	97.64	46.46
2012	229.73	210.17	99.75	47.46
2013	230.16	211.06	105.94	50.19



GRÁFICA 2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SEGÚN SU PROCESO DE TRATAMIENTO. FUENTE: SEMARNAT Y CONAGUA, 2014.

El objetivo del tratamiento del agua residual es producir un efluente reutilizable en el ambiente, tener una mejora en el nivel de vida de la sociedad al contar ésta con mayor disponibilidad de agua de calidad, se fomenta el fortalecimiento del equilibrio ecológico de sus cuerpos de agua y se reduce la incidencia de enfermedades de origen hídrico (Jiménez y Ramos, 1999).

Parte del agua residual tratada se destina al uso agrícola y a la actividad industrial, buscando liberar volúmenes de agua de primer uso en beneficio de la población.

Un ejemplo de la descarga de agua residual generada al ambiente, sin ningún tratamiento adecuado se observa en el caso del río Tula, que constituye el colector general del río Pánuco en sus orígenes. Su nacimiento es en el cerro de San Pablo, forma parte de la Sierra de la Catedral, que constituye el parteaguas entre las cuencas del río Pánuco y Lerma (SARH, 1980).

Los recursos hídricos del río Tula han sufrido un deterioro en su calidad debido a las descargas de agua residual doméstica, industrial y comercial procedente de la Ciudad de México y la zona conurbana.

A finales del siglo XVIII ésta comenzó a ser enviada a esta zona a través de tres conductos principales: el Interceptor Poniente (1789), el Gran Canal (1898) y el Emisor Central (1975).

Posteriormente el agua residual se utilizó para el riego de cultivos por lo que en 1920 se construyó un sistema para distribuir y regular el flujo del agua residual para la agricultura que incluyó la presa Requena y que fue completado en 1936 por las presas Taxhimay y Endhó (Jiménez y Marín, 2004). En la figura 1 se muestra el transporte del agua residual desde su origen hasta su destino.

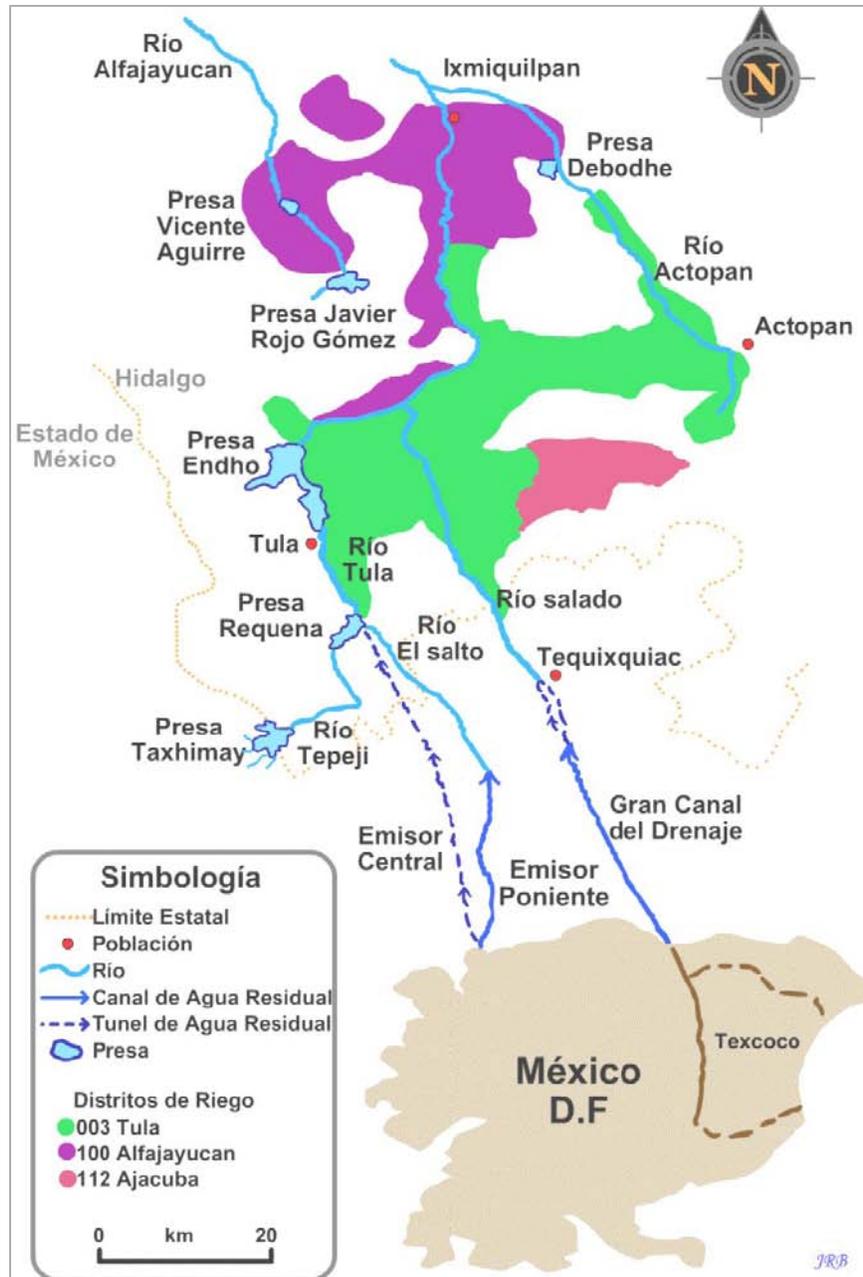


FIGURA 1 TRANSPORTE DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO. FUENTE: JIMÉNEZ Y MARÍN, 2014.

Para conocer cómo se modifica la calidad del agua en el río Tula debido a las aportaciones de agua residual Montelongo *et al.* (2008) reporta un estudio de la calidad del agua realizando muestreos en diversos puntos del mismo, comenzando en la salida de la presa Taxhimay hasta la confluencia de la presa Endhó. En la tabla 2 se muestran los valores mínimos y máximos de los parámetros medidos.

TABLA 2 VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE DIVERSOS PARÁMETROS EN EL AGUA DEL RÍO TULA.  
FUENTE: ADAPTACIÓN DE MONTELONGO *ET AL.*, 2008.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
DBO <sub>5</sub>	mg /L	1.16	486.81
OD	mg/L	0.05	8.80
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	211.00	1426.00
ALCALINIDAD	mg/L	---	458.01
FÓSFORO TOTAL	mg/L	0.38	5.99
GRASAS Y ACEITES	mg/L	0.90	18.10
NITRÓGENO AMONIAICAL	mg/L	0.09	64.00
NITRATOS	mg/L	0.30	6.24
NITRITOS	mg/L	0.01	1.30
COLIFORMES FECALES	NMP/100 mL	2.10 x10 <sup>4</sup>	2.40 x10 <sup>11</sup>

La mayor cantidad de materia orgánica la aporta el Emisor Central, agua sin tratamiento proveniente de la Ciudad de México y zona conurbana.

Los valores de DBO variaron desde 1.16 hasta 486.81 mg/L; el oxígeno disuelto entre 0.05 y 8.80 mg/L, esto implica afectación para el desarrollo de la vida acuática. Las grasas y aceites presentaron variaciones desde 0.90 hasta 18.10 mg/L y el nitrógeno amoniacal fuera de los límites establecidos para protección de la vida acuática con valores desde 0.09 a 64 mg/L. Los metales cadmio, plomo, hierro, manganeso y zinc están en concentraciones por encima de lo permisible y en algunos tramos había presencia de mercurio de acuerdo a lo reportado en Montelongo *et al.*, (2008).

De acuerdo con los valores obtenidos se puede observar cómo el agua superficial presenta un grado de contaminación debido a las continuas descargas de agua residual que recibe. También se obtuvieron valores muy bajos atribuido al fenómeno de autodepuración y dilución del río, desafortunadamente el proceso de purificación natural del agua del valle no es suficiente ya que, aguas abajo de la presa Endhó, el río Tula recibe nuevamente descargas de las pequeñas comunidades de la región y el agua vuelve a estar contaminada con nitrógeno amoniacal, materia orgánica y bacterias (Jiménez y Marín, 2004).

### 2.1.3 NORMATIVIDAD

En México, la Comisión Nacional del Agua de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es el órgano encargado de administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes, para lograr su uso sustentable, con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general.

El Estado mexicano ha creado un marco jurídico que se encarga del establecimiento de normas de calidad que regulan los estándares mínimos de la calidad del agua, en lo que se refiere al reúso y descarga del agua residual, la SEMARNAT expidió las Normas Oficiales Mexicanas nombradas a continuación:

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Tanto grandes como pequeñas comunidades están obligadas a cumplir con la normatividad establecida, lo que está llevando a muchos municipios y localidades a tratar sus descargas para mantener el equilibrio ecológico y preservar sus fuentes de abastecimiento por medio del reúso liberando el agua de primer uso para consumo humano.

### 2.1.4 PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN ZONAS RURALES DE MÉXICO

El siglo XX fue de urbanización en México. En 1900, la nación en su mayoría era rural, pues 81 de cada 100 habitantes vivían en localidades rurales; para 1930, el porcentaje se redujo a 74.4% y en 1970 se dio la circunstancia de que el país contaba con similares cifras de población rural y urbana; a partir de ahí se impuso esta última. De este modo, para el año 2010, esta cifra disminuyó hasta ubicarse en 22% y para el 2013 disminuye al 21%, como consecuencia del mayor crecimiento de la población urbana (INEGI, 2010b). No obstante las comunidades rurales por su propia situación geográfica y desarrollo presentan una serie de problemas específicos que hacen difícil la provisión de sistemas tanto de abastecimiento de agua potable como de tratamiento de agua residual.

Para diciembre de 2013 se registró una cobertura nacional de agua potable del 92.3 y 90.9% en alcantarillado. En las comunidades rurales se tiene una cobertura de agua potable del 81.6% y de alcantarillado del 71.2% (SEMARNAT, 2014).

En zonas rurales y pequeñas localidades, el problema del abastecimiento de agua y tratamiento del agua residual es complejo, debido a dificultades comunes en estas áreas tales como:

- Bajo nivel socioeconómico.
- Viviendas aisladas.
- Limitado acceso a nuevas tecnologías.
- Limitado o nulo acceso a recursos financieros.
- Los sistemas son operados a través de brigadas conformadas por miembros de la comunidad, lo que resulta en bajo nivel técnico de los operadores.
- Carencia de supervisión, control y apoyo técnico de instituciones públicas o empresas de agua y saneamiento de mayor tamaño.

La complejidad del sistema de abastecimiento de agua en esas zonas está vinculada a factores locales, como las fuentes de abastecimiento disponibles, la oferta de agua, la dispersión de las viviendas, factores climáticos, entre otros (Lampoglia *et al.*, 2008).

Para la disposición del agua residual se tiene un problema similar ya que en la medida que el tamaño de la comunidad aumenta y la dispersión de las viviendas es mayor, la implementación de la red de alcantarillado es más complicada.

En muchos países todavía es común que una proporción importante del agua residual generada no reciba tratamiento antes de verterse en los cuerpos de agua superficiales, lo cual tiene consecuencia a que muchas comunidades pequeñas no cuentan con las posibilidades del saneamiento y los beneficios de este.

Es importante buscar alternativas de pequeña escala que atiendan a las necesidades específicas de cada comunidad. Éstas deben ser fáciles de operar, no deben requerir mano de obra especializada, ni involucrar altos costos de mantenimiento.

Es significativo construir nueva infraestructura de tratamiento de agua residual e impulsar el saneamiento alternativo en comunidades rurales ya que la primera ventaja que obtendrían al efectuar el reúso es económica.

#### 2.1.4 ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN ZONAS RURALES

De acuerdo con Lampoglia *et al.*, (2008) los factores que se consideran clave para lograr la sostenibilidad de una infraestructura de abastecimiento como de saneamiento en zonas rurales son principalmente un sistema de baja complejidad, capacidad de los beneficiarios para la administración, operación y mantenimiento de la solución adaptada, tamaño de la comunidad, apoyo externo para la solución de problemas fuera del alcance de la comunidad y calidad del diseño así como de la infraestructura.

Una alternativa de solución la ofrece el uso de humedales artificiales (HA), los cuales resultan altamente competitivos frente a tecnologías convencionales como son sistemas de lodos activados, filtros percoladores e inclusive lagunas de oxidación, que son de los sistemas de tratamiento secundario más económicos.

La eficiencia de estos sistemas permite obtener una calidad de agua para distintos tipos de reuso, tales como descarga en embalses, ríos y lagos, como protección de vida acuática silvestre, o para riego agrícola. Comúnmente cumplen con la normatividad Nacional o internacional vigente, siempre y cuando sean adecuadamente diseñados y operados (Luna-Pabello y Ramírez, 2009).

Una de las limitantes para la implementación de estos sistemas de tratamiento de agua residual es la necesidad de contar con suficiente área para llevar a cabo su construcción, lo cual no los hace viables para zonas urbanas, en tanto que para zonas rurales con áreas de terrenos disponibles es una opción más viable.

Es común considerar, en las pequeñas comunidades, el agua tratada como un recurso en lugar de un residuo, es por ello que existe una gran posibilidad de recuperar los costos de tratamiento, con beneficios directos a la población al aligerar el pago de derechos y contar con mayor disponibilidad de agua de mejor calidad (Jímenez y Ramos, 1999).

Para poder darle un adecuado tratamiento al agua residual es importante establecer quiénes son los usuarios interesados y cuál es el nivel de tratamiento requerido.

## 2.1.5 HUMEDALES

### 2.1.5.1 DEFINICIÓN

Los humedales naturales como marismas, pantanos o ciénegas son ecosistemas que surgen cuando la saturación del terreno por agua produce sustratos hídricos y permite el establecimiento de biota, principalmente plantas enraizadas, con adaptaciones para tolerar la anegación (Keddy, 2004).

Los HA son sistemas de tratamiento de agua residual diseñados para reproducir los procesos de eliminación y transformación de contaminantes que ocurren en un humedal natural, pero dentro de un ambiente controlado (Vymazal, 2011).

Son sistemas de fitodepuración de agua residual. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual del influente es depurada progresiva y lentamente.

La fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández *et al.*, 2004). Constituyen "fitosistemas", porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento del agua residual.

El tratamiento de agua residual para depuración se realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recolección, tratamiento y evacuación al lugar de disposición (Fernández *et al.*, 2004).

El funcionamiento de los HA se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, 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 de servir como material filtrante.

En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Kolb, 1998).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999).

## 2.1.5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES

Los sistemas de humedales artificiales de acuerdo con Kadlec y Scott (2009) pueden dividirse en HA de flujo Subsuperficial (HAFSS) y de flujo Superficial (HAFS). No obstante, de acuerdo con Luna-Pabello y Aburto-Castañeda (2014) si se considera la concentración de contaminantes orgánicos o carga orgánica influente y el tipo de vegetación susceptible de ser incorporada a cada tipo de HA, es posible obtener las opciones que se muestran en la figura 2.

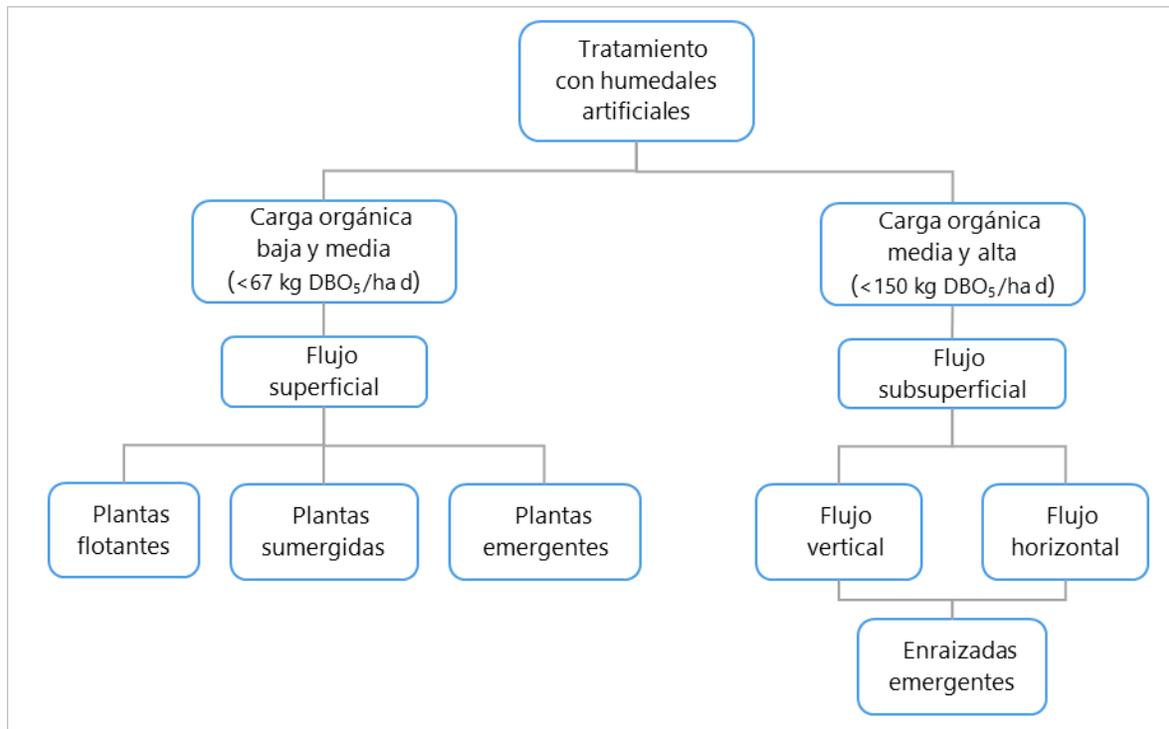


FIGURA 2 CLASIFICACIÓN DE HA EN FUNCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y TIPO DE VEGETACIÓN. FUENTE: ADAPTACIÓN DE KADLEC Y SCOTT, 2009; LUNA-PABELLO Y ABURTO-CASTAÑEDA, 2014.

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0.6 m) y tienen plantas (Delgadillo *et al.*, 2010).

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen. En la figura 3 se muestra la representación del sistema.

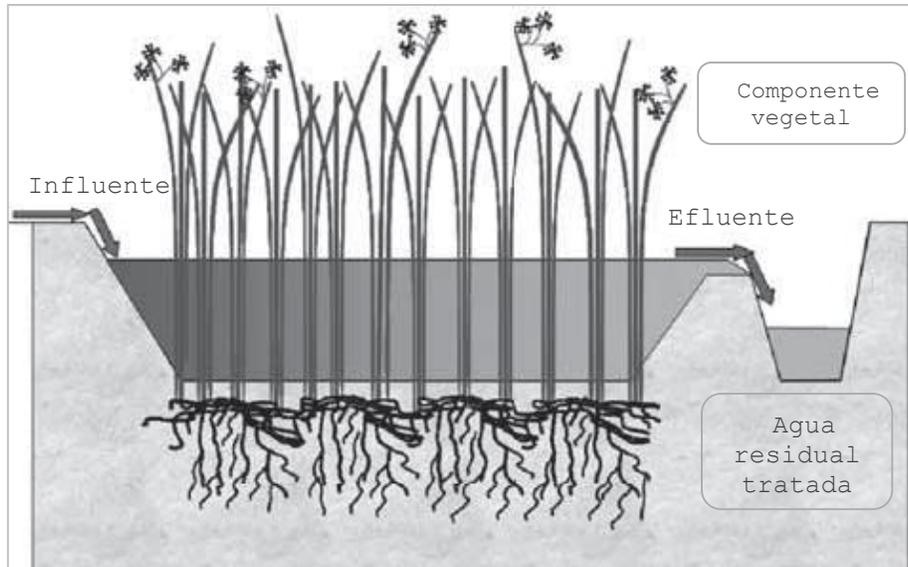


FIGURA 4 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL. FUENTE: DELGADILLO *ET AL.*, 2010.

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua en el humedal se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con las raíces de las plantas. El flujo de agua discurre de forma subterránea, favoreciendo que el agua a tratar no quede expuesta al ambiente y permiten la depuración de cargas elevadas de contaminantes orgánicos (Luna Pabello y Aburto-Castañeda, 2014). Tienen la ventaja de no producir olores ni mosquitos y de ocupar menos terreno y los procesos que se llevan a cabo en su interior son anaeróbicos<sup>7</sup> (Lahora, 2003).

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: (a) en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical.

En los humedales de flujo horizontal el agua fluye por gravedad, esta ingresa en el extremo superior y es recolectada por medio de tuberías y/o vertederos en el opuesto inferior, deben ser construidos con una ligera pendiente de aproximadamente 0.5% de acuerdo con Crites y Tchobanoglous (1998).

El agua residual es tratada a medida que fluye lateralmente a través de un medio granular de relleno y entre las raíces de las plantas. La profundidad del lecho varía entre 0.5 y 1 m.

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño, teniendo de forma similar en la salida del humedal.

<sup>7</sup> Proceso anaeróbico. Proceso que se lleva a cabo sin presencia de oxígeno.

El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, entre 3 mm y 32 mm (Montelongo *et al.*, 2008).

Los humedales de flujo vertical reciben el agua residual de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación, el agua se infiltra verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recolectan a través de una tubería de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación del agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias<sup>8</sup>.

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 (Montelongo *et al.*, 2008).

En las figuras 4 y 5 se muestran los esquemas de los humedales de flujo horizontal y vertical respectivamente.

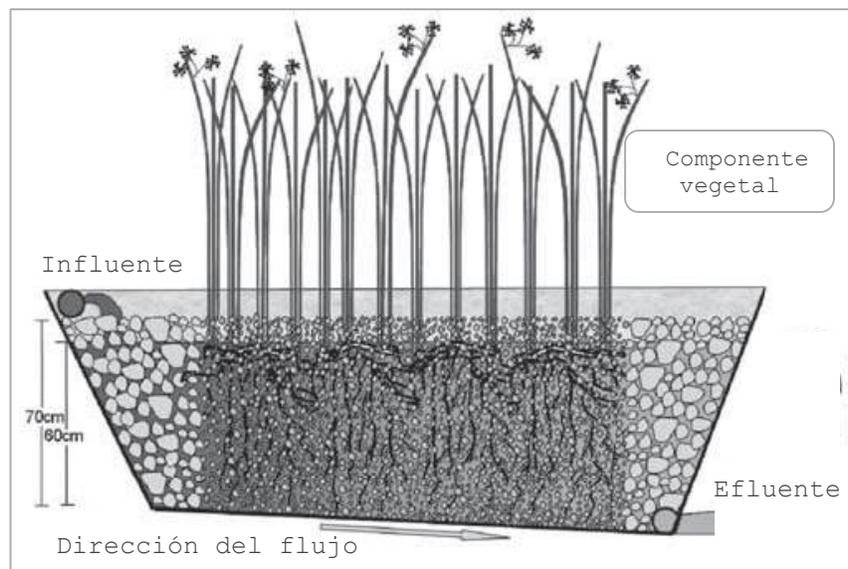


FIGURA 5 HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL. FUENTE: DELGADILLO *ET AL.*, 2010.

<sup>8</sup> Proceso aerobio. Proceso que se lleva a cabo en presencia de oxígeno.

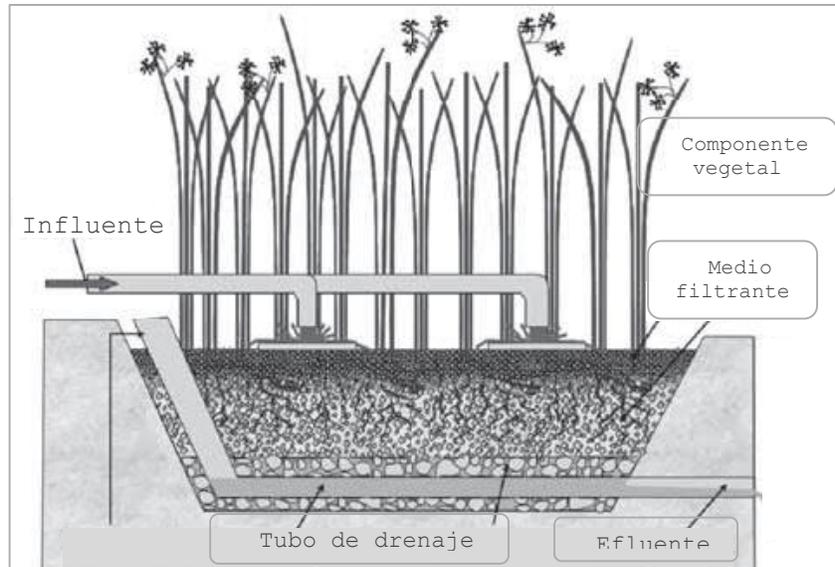


FIGURA 6 HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO VERTICAL. FUENTE: DELGADILLO *ET AL.*, 2010.

Los humedales artificiales pueden ser clasificados también según el tipo de macrófitas que emplean en su funcionamiento, considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados de acuerdo con Montelongo *et al.* (2008) y Seoáñez (1999) en:

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: están enraizados en el sustrato que se encuentra sumergido en el agua, sus hojas pueden ser flotantes o aéreas. Las macrófitas de libre flotación no están enraizadas al sustrato, flotan libremente sobre o dentro del agua. El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna gibba*) son las especies más utilizadas para este sistema. En la figura 6 se muestran tres ejemplos de macrófitas de hojas flotantes (a-c) y dos ejemplos de macrófitas de libre flotación (d y e).

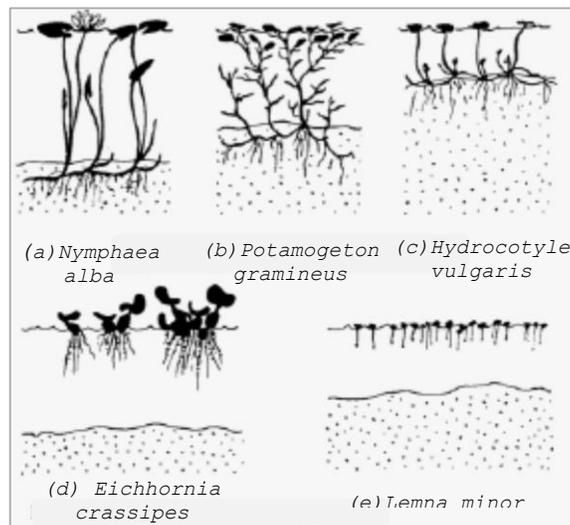


FIGURA 7 MACRÓFITAS ACUÁTICAS FLOTANTES. FUENTE: ADAPTACIÓN DE KADLEC Y SCOTT, 2009.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar). Existe una serie de factores que condicionan la distribución de esta vegetación, como la calidad del agua, la profundidad, la temperatura y tienden a establecerse en las áreas de los humedales con menor conductividad. Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y angiospermas, en la figura 7 se muestran algunos ejemplos.

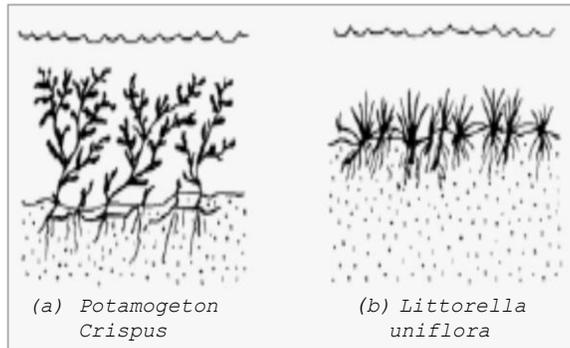


FIGURA 8 MACRÓFITAS ACUÁTICAS SUMERGIDAS. FUENTE: ADAPTACIÓN DE KADLEC Y SCOTT, 2009.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: crecen en suelos anegados permanente o temporalmente; se han adaptado a tener parte de ellas en el agua y parte en el aire.

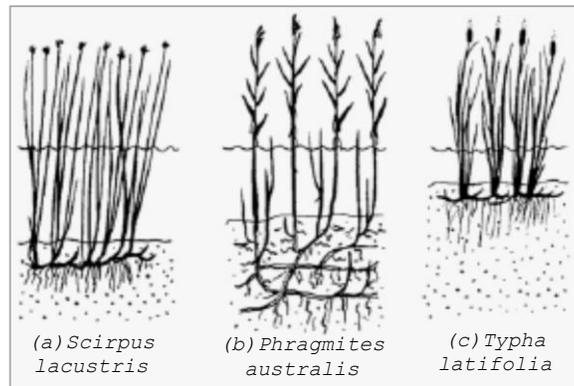


FIGURA 9 MACRÓFITAS ACUÁTICAS EMERGENTES. FUENTE: ADAPTACIÓN DE KADLEC Y SCOTT, 2009.

### 2.1.5.3 PRINCIPALES COMPONENTES

Los humedales artificiales están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, lecho o medio de soporte, vegetación y microorganismos depuradores.

El agua residual es la que proviene del sistema de drenaje de una población, y que se recolecta por una red de alcantarillado que debe conducirla hacia la planta de tratamiento para su posterior reuso o disposición final (Rolim, 2000).

La composición del agua residual se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en ella. En La tabla 3 se presentan datos típicos de los indicadores de contaminación contenidos en el agua residual doméstica. En función de las concentraciones de estos constituyentes, se clasifica el agua residual como concentrada, media y baja.

TABLA 3 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA. FUENTE: METCALF Y EDDY, 1996.

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN	UNIDADES	CONCENTRACIÓN		
		BAJA	MEDIA	ALTA
SÓLIDOS TOTALES (ST)	mg/L	350	720	1200
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)	mg/L	250	500	850
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	mg/L	100	220	350
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mL/L	5	10	20
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, (DBO <sub>5</sub> , 20 °C)	mg/L	110	220	400
CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)	mg/L	80	160	290
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	mg/L	250	500	1000
NITRÓGENO (TOTAL EN LA FORMA N)	mg/L	20	40	85
NITRÓGENO ORGÁNICO	mg/L	8	15	35
AMONIACO LIBRE	mg/L	12	25	50
FÓSFORO (TOTAL EN LA FORMA P)	mg/L	4	8	15
FÓSFORO ORGÁNICO	mg/L	1	3	5
FÓSFORO INORGÁNICO	mg/L	3	5	10
CLORUROS	mg/L	30	50	100
SULFATO	mg/L	20	30	50
ALCALINIDAD (COMO CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	50	100	200
GRASAS	mg/L	50	100	150
COLIFORMES TOTALES	UFC/100 mL	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>

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

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

De acuerdo con Lara (1999), el sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Sirven como medio de soporte para muchos de los organismos que habitan en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal y sirve como material filtrante
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelícula).

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas<sup>9</sup> enterrados. Las plantas son organismos fotoautótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

Se debe tener en cuenta que la vegetación acuática, en todas sus variedades, es un conjunto de especies que tienen en común su adaptación al agua como medio, en diferente intensidad de contacto, que abarca desde macrófitas emergentes, con una parte de ellas en el agua y parte de ellas fuera, hasta macrófitas sumergidas en su totalidad.

---

<sup>9</sup> Un rizoma es un tallo subterráneo que crece paralelo al suelo, es decir de forma horizontal. De este tallo, hacia arriba crecen las ramas aéreas verticales y hacia abajo las raíces de la planta.

La vegetación a implantar en los humedales artificiales es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración del agua residual, ya que el tratamiento se basa en gran parte en los procesos que estas realizan.

La vegetación que se implanta en un humedal artificial de acuerdo con Seoáñez (1999), tiene las siguientes funciones y aplicaciones:

- Busca utilizar el agua del humedal como medio y los nutrientes que contenga.
- Los vertidos de agua residual que se aportan al humedal contienen, por una parte nutrientes, y por otra, componentes que dificultan el desarrollo de las masas vegetales y a las que se tienen que adaptar.
- Gestiona el depósito de sedimentos.
- Retiene y procesa los nutrientes presentes.
- Retiene y procesa muchos productos, que puede incorporar a sus ciclos metabólicos.
- Tiende a regular y a limitar los extremismos del medio: pH, sólidos en suspensión, productos disueltos materia orgánica, etc., dentro de ciertos límites.
- Los tallos, hojas y raíces sumergidas en la columna de agua proveen superficie para el establecimiento de comunidades microbianas.

Las plantas toman los nutrientes, tales como N y P, a través de su sistema de raíces, estos pueden ser acumulados en su biomasa, además de este proceso las raíces liberan sustancias que influyen en la caracterización de la comunidad microbiana al nivel de la rizósfera (zona del suelo bajo la influencia directa de las raíces de las plantas). Por ejemplo, el junco de laguna (*Scirpus lacustris*) libera antibióticos, provocando la disminución de coliformes, salmonella y enterococos, todos ellos microorganismos típicamente presentes en el agua residual; la menta acuática (*Mentha aquatica*), el carrizo (*Phragmites australis*) y el junco de laguna producen exudados con propiedades antimicrobianas (Vymazal, 2011).

Para la implementación del componente vegetal en los humedales artificiales es necesario estudiar la vegetación de los humedales más próximos ya sean naturales o artificiales, para así conocer si sus condiciones ambientales son similares, así como la existencia de especies autóctonas (originarias de la zona) que puede o no admitir el nuevo humedal en condiciones ecológicas aceptables.

Por otra parte, es necesario conocer los objetivos de tratamiento del humedal y la calidad deseada del efluente, para poder saber qué especies son capaces de sobrevivir en un ambiente hídrico contaminado, dadas las condiciones del influente.

A continuación se muestran en la tabla 4 algunos ejemplos de las especies vegetales normalmente usadas y su función dentro de los diferentes tipos de humedales.

TABLA 4 LISTADO DE ESPECIES QUE COMPRENDEN EL COMPONENTE VEGETAL. FUENTE: LUNA-PABELLO Y ABURTO -CASTAÑEDA, 2014.

<b>EN HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIALES</b>		
NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	FUNCIÓN
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	Depuradora
<i>Equisetum hyemale</i>	Cola de caballo, arricillo y cañuela	Ornato
<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro	Depuradora
<b>EN HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL HIDRÓFITAS ENRAIZADAS EMERGENTES</b>		
NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	FUNCIÓN
<i>Schoenoplectus californicus</i>	Junco triangular o totora	Depuradora
<i>Juncus effusus</i>	Tulillo o junco	Depuradora
<i>Juncus acutus</i>	Junco espinoso	Depuradora
<b>HIDRÓFITAS ENRAIZADAS DE HOJAS FLOTANTES</b>		
NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	FUNCIÓN
<i>Nymphae mexicana</i>	Atlacuetzón, ninfa	Depuradora
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Malacate	Depuradora
<i>Polygonum amphibium</i>	Achillillo macho	Depuradora
<i>Sagittaria demersa</i>	Papa de agua, bayoneta, cola de pato	Depuradora
<i>Potamogeton pusillus</i>	Pasto de agua, lila de agua	Depuradora
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Cola de zorro, bejuquillo	Depuradora
<b>HIDRÓFITAS LIBRES FLOTADORAS</b>		
NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	FUNCIÓN
<i>Wolffia columbiana</i>	Chichicastle, lentejilla	Depuradora
<i>Lemna gibba</i>	Chichicastle, lentejilla	Depuradora

Los microorganismos son considerados como la clave en los procesos de transformación y remoción de contaminantes dentro de los humedales artificiales, cualquier factor que pueda afectar su composición, concentración o eficiencia degradativa tiene un impacto en el desempeño del humedal artificial.

Los microorganismos son los encargados de llevar a cabo el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán

los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).

Por otro lado, los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara, 1999).

En los humedales para el tratamiento de agua residual se debe utilizar un recubrimiento en la base de estos, para prevenir la infiltración de agua contaminada en el manto subterráneo. Los materiales del recubrimiento pueden ser de tierra o arcilla con una permeabilidad muy baja, por ejemplo la bentonita, asfalto, o plásticos sintéticos. El recubrimiento debe ser fuerte, grueso, y liso, y debe ser protegido de la perforación por piedras filosas o grava.

2.1.5.4 PROCESOS QUE SE LLEVAN A CABO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES

En los humedales se lleven a cabo distintos mecanismos de remoción de los contaminantes del agua residual, entre los que destacan la filtración, adsorción, fijación, reacciones químicas, sedimentación, entre otros.

La depuración del agua residual ocurre por la interacción entre los componentes del humedal y un amplio número de procesos físicos, químicos y biológicos dentro de este, con la intervención del Sol como fuente principal de energía.

La tabla 5 resume el conjunto de los procesos que se identifican en un humedal artificial.

TABLA 5 PROCESOS QUE SE PRODUCEN EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL. FUENTE: SEOÁNEZ, 1999.

FASE	PROCESO
ACCIÓN BACTERIANA	Conversión y transformación de contaminantes. En la transformación aerobia de los residuos orgánicos se consume oxígeno. Se realizan también transformaciones de productos orgánicos tóxicos. Siempre se reduce la DBO.
ABSORCIÓN DE OXÍGENO	Si la lámina líquida del humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo toma de la atmósfera, en una aireación natural.
DESORCIÓN DE OXÍGENO	Situación contraria al proceso anterior.

SEDIMENTACIÓN	Se debe al movimiento lento del líquido, que hace que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo. En ciertos casos se produce una floculación. En otros se produce turbulencias (en la entrada) que hacen que estos sólidos se distribuyan uniformemente por todo el humedal.
DEGRADACIÓN NATURAL	La supervivencia de muchos organismos tiene un plazo limitado, por lo que gran parte de ellos muere pasado un período de tiempo en el humedal. Por otra parte, la acción fotoquímica provoca la oxidación de muchos componentes orgánicos.
ADSORCIÓN	Muchos contaminantes químicos tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá, en gran parte, de la cantidad y composición de estos presentes en la fase líquida en forma de suspensión. Esta adsorción se complementa después casi siempre con la posterior sedimentación.
VOLATILIZACIÓN	Los contaminantes volátiles presentes en el líquido se transfieren a la atmósfera.
REACCIONES QUÍMICAS	Aparte de las reacciones fotoquímicas que ya se han indicado en la degradación natural, en el humedal existen fenómenos de hidrólisis, oxidaciones diversas, reducciones, etc.
EVAPORACIÓN	Aparte de la volatilización y de la desorción de oxígeno, muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar, y lo mismo ocurre con parte de la masa del humedal, que puede ver reducido así su volumen.

Los procesos antes mencionados se llevan a cabo para la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual, en la tabla 6 se muestran algunos ejemplos de los procesos de remoción para los contaminantes más importantes y que sirven como indicadores.

TABLA 6 PROCESOS QUE CONTRIBUYEN A LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES. FUENTE: ADAPTACIÓN DE ARIAS ET AL., 2003.

CONTAMINANTE	PROCESO DE REMOCIÓN
MATERIA ORGÁNICA	Conversión biológica por intervención de bacterias facultativas, anaerobias y aerobias, absorción, filtración y por sedimentación.
MATERIA EN SUSPENSIÓN	Filtración y sedimentación.
NITRÓGENO	Procesos de nitrificación y desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
FÓSFORO	Reducción por filtración, sedimentación, adsorción, asimilación por parte de las plantas y los microorganismos.
METALES PESADOS	Absorción a las plantas y a las raíces, sedimentación
PATÓGENOS	Por muerte natural, depredación, sedimentación, radiación UV y secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

2.1.6 PARÁMETROS DE DISEÑO

El dimensionamiento y las características físicas del humedal artificial dependen, entre otros factores, de la localización de la planta y las condiciones climáticas del sitio, de las características de la calidad del agua del influente, de la calidad del agua del efluente deseada.

La tabla 7 presenta algunos valores típicos que se utilizan como parámetros para el diseño, los cuales no son estrictamente obligatorios, pero brindan información típica de las condiciones normales de diseño.

TABLA 7 PARÁMETROS TÍPICOS DE DISEÑO PARA HUMEDALES ARTIFICIALES. FUENTE: ARIAS ET AL., 2003.

TIPO FLUJO	UNIDADES	SUBSUPERFICIAL	HORIZONTAL	VERTICAL
CARGA ORGÁNICA DBO <sub>5</sub> , INFLUENTE	kg/ha d	< 150	< 112	< 112
CARGA HIDRÁULICA	cm/d	< 5	< 5	< 5
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA	d	> 5	5 - 15	1 - 2
RELACIÓN LARGO ANCHO	---	03:01	10:01	NA
PROFUNDIDAD	m	< 0.6	< 0.6	> 1.0
PENDIENTE	%	< 0.1	< 0.1	NA

2.1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Para conocer las ventajas y desventajas que tienen los diferentes tipos de humedales artificiales, se presenta a continuación dos tablas comparativas. La primera compara humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial (tabla 8), y la segunda compara humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal (tabla 9).

TABLA 8 COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE FLUJO. FUENTE: DELGADILLO ET AL., 2010.

	FLUJO SUPERFICIAL	FLUJO SUBSUPERFICIAL
TRATAMIENTO	Tratamiento de flujos secundarios (agua previamente tratada por otros sistemas, lodos activados, biodiscos, etc.)	Tratamiento de flujos primarios (agua pretratada por medio de tanques IMHOFF, fosas sépticas)
OPERACIÓN	Opera con baja carga orgánica	Operan con altas tasas de carga orgánica
OLOR	Puede ser controlado	No existe
INSECTOS	El control es caro	No existe

PROTECCIÓN TÉRMICA	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante.
ÁREA	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
COSTO	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%
USOS GENERALES	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de agua residual, principalmente para casa aisladas y núcleos menores de 200 habitantes
OPERACIÓN	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario)	Puede usarse como tratamiento secundario

TABLA 9 COMPARACIÓN ENTRE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL Y VERTICAL.  
FUENTE: DELGADILLO ET AL., 2010.

	HORIZONTAL	VERTICAL
FUNCIONAMIENTO	Continuo	Discontinuo
EFICIENCIA	Más superficie	Menos superficie
CARGA SUPERFICIAL	4-6 g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d	20-40 g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d
NITRIFICACIÓN	Complicada	Se consigue
OPERACIÓN	Sencilla	Más compleja

Cabe destacar que los sistemas de flujo horizontal de acuerdo con Arias *et al.* (2003), son buenos para la eliminación de sólidos en suspensión y bacterias, reducción de DBO<sub>5</sub>, son aceptables para desnitrificar (paso final para la remoción de nitrógeno, conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico, óxido nitroso y gas nitrógeno), mientras que su capacidad para nitrificar (transformación de iones amonio a nitritos, posteriormente de nitritos a nitratos) es pobre (baja disponibilidad de oxígeno dentro de los lechos). Los humedales con flujo vertical tienen buena capacidad para nitrificar, lo cual redundaría en una buena capacidad para eliminar DBO<sub>5</sub> y DQO, mientras que su capacidad para retener sólidos es menor y son susceptibles a taponamientos, si no se seleccionan los medios filtrantes adecuados.

Hablando en términos generales las ventajas y desventajas que presentan los humedales artificiales con respecto a los otros sistemas de tratamiento de agua residual de acuerdo con Luna y Ramírez (2009) son:

Ventajas: bajos costos de operación y mantenimiento, participación de miembros de la comunidad a beneficiar (construcción, operación y mantenimiento), aspecto natural, estéticamente agradables, atrae vida silvestre, bajo costo energético, baja generación de subproductos no deseados, calidad de agua acorde con los requerimientos establecidos con las normas internacionales vigentes, costos de inversión menores en comparación con los sistemas convencionales, tiempo de vida útil por encima de los 25 años, operan con requerimientos de energía mínimos, debido a que el flujo depende de la gravedad, no sufren fácilmente desequilibrios por cambios en la concentración y flujos del agua residual suministrada, ofrecen resultados satisfactorios cuando el influente contiene detergentes, materiales tóxicos metales y/o hidrocarburos, si son operados correctamente no hay generación de malos olores, es posible su construcción de manera modular.

Desventajas: amplias áreas requeridas para su construcción, altos tiempos de tratamiento del agua, durante periodos de paros o no alimentación del agua puede ser propenso a sufrir daños, largos periodos de estabilización.

2.1.8 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

La literatura reporta distintas eficiencias de remoción para este tipo de sistema de tratamiento de agua residual, en la tabla 10 se compara el rendimiento de algunos de los sistemas de tratamiento de agua residual por medio de la remoción de algunos contaminantes que se encuentran presentes.

TABLA 10 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN (%) PARA LOS DIFERENTES SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL. FUENTE: SEOÁNEZ, 1999.

SISTEMA	DQO <sub>T</sub>	DBO <sub>T</sub>	SS <sub>T</sub>	N	P	C
FOSA SÉPTICA	30-60	20-60	50-90	0-60	0-75	10-90
LECHO FILTRANTE	90-95	80-98	50-90	10-90	35-55	--
ZANJA FILTRANTE	65-90	90-98	--	25-98	80-98	--
HUMEDAL	55-80	60-98	60-98	30-70	20-60	99-99.9
TANQUE IMHOFF	--	30-65	35-85	--	--	--
LECHO BACTERIANO	70-80	60-96	50-95	20-70	5-30	80-95
LECHO DE TURBA	60-75	60-85	85-95	20-75	20-30	99-99.5
FILTRO DE ARENA	70-90	80-99	40-99	25-90	20-80	98-99.9
RIEGO POR ENCHARCAMIENTO	75-85	90-99	95-99	85-90	85-90	99-99.8
INFILTRACIÓN –PERCOLACIÓN	60-75	80-99	80-99	30-90	90-95	99-99.9
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	90-95	90-99	95-99	40-95	90-95	95.5-99.9
BIODISCOS	70-85	80-85	75-98	30-80	20-30	80-90

AIREACIÓN PROLONGADA	70-90	85-99	85-99	60-90	20-70	90-95
LAGUNAS AIREADAS	70-90	60-97	70-92	10-60	25-40	99-99.5
LAGUNAS AEROBIAS	50-60	65-90	90-95	60-70	10-20	99-99.9
LAGUNAS ANAEROBIAS	20-40	50-85	60-80	30-40	10-20	99-99.9
LAGUNAS FACULTATIVAS	50-85	60-96	50-90	60-70	10-40	99-99.8
TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO	70-98	70-98	70-95	20-60	90-98	99-99.8

Donde  $DQO_T$  es la demanda química de oxígeno total,  $DBO_T$  la demanda bioquímica de oxígeno total, N es el nitrógeno, P el fósforo y C el carbono.

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2010), para una planta de tratamiento donde el efluente secundario es tratado por medio de un humedal con macrófitas *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), se esperan los valores que se muestran en la tabla 11.

TABLA 11 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL, EN UNA PTAR. FUENTE: METCALF Y EDDY 2010.

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS				
PARÁMETRO	UNIDADES	CONCENTRACIÓN		
		INFLUENTE	EFLUENTE SECUNDARIO	% REMOCIÓN
DBO	mg/L	149	13	74
SST	mg/L	131	9.8	55
COT	mg/L	72	14	64
ST	mg/L	1322	1183	10
TURBIEDAD	NTU	88	14	74
AMONICAL-N	mg/L	21	9.5	52
NITRATOS-N	mg/L	0.1	1.4	0
NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL	mg/L	30.6	13.9	53
FOSFATOS-P	mg/L	5.1	3.4	28
ARSÉNICO	mg/L	0.0031	0.0025	19

BORO	mg/L	0.38	0.42	0
CADMIO	mg/L	0.0005	0.0012	0
CALCIO	mg/L	72.2	66.7	7
CLORURO	mg/L	232	238	0
CROMO	mg/L	0.004	0.002	32
COBRE	mg/L	0.07	0.043	33
HIERRO	mg/L	0.53	0.18	59
PLOMO	mg/L	0.008	0.008	0
MAGNESIO	mg/L	38.1	39.3	0
MANGANESO	mg/L	0.062	0.039	37
MERCURIO	mg/L	0.0002	0.0001	33
NÍQUEL	mg/L	0.01	0.004	33
SELENIO	mg/L	0.003	0.002	16
PLATA	mg/L	0.003	0.001	75
SODIO	mg/L	192	198	0
SULFATO	mg/L	283	309	0
ZINC	mg/L	0.076	0.024	64

Con las eficiencias reportadas en la tabla 11 para los humedales artificiales como tratamiento de agua residual, se observa que éstos resultan altamente competitivos en la remoción de los contaminantes usualmente presentes en el agua residual doméstica, además este sistema de tratamiento requiere amplias áreas para su construcción con la cual se cuenta en la localidad de El Alberto, los costos son menores con respecto a las demás tecnologías, es de fácil operación para los habitantes de la comunidad, los miembros de la comunidad pueden participar en la construcción del humedal y estos resultan atractivos a la vista.

Con lo antes mencionado se puede afirmar o establecer que los humedales son la mejor opción para el tratamiento del agua residual de la comunidad de El Alberto.

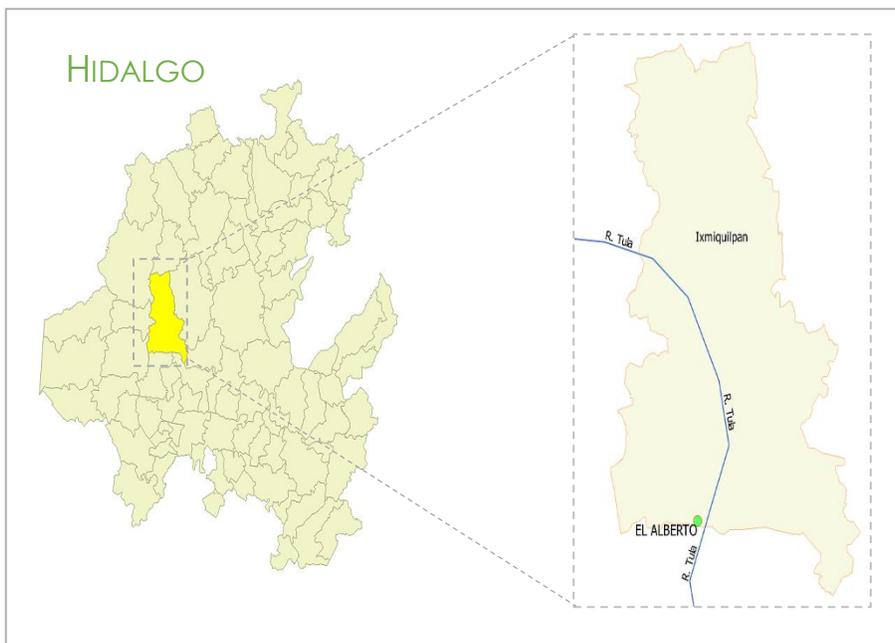
## 2.2 SITIO DE ESTUDIO

### 2.2.1 LOCALIZACIÓN

La localidad de El Alberto se localiza en el estado de Hidalgo, al sur del municipio de Ixmiquilpan a orillas del río Tula como a continuación se muestra en los mapas 4 y 5.



MAPA 4 UBICACIÓN DEL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



MAPA 5 LOCALIZACIÓN DE LA LOCALIDAD DE EL ALBERTO EN EL MUNICIPIO DE IXMIQUILPAN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De acuerdo con INEGI (2010a) la localidad de El Alberto tiene las siguientes coordenadas geográficas:

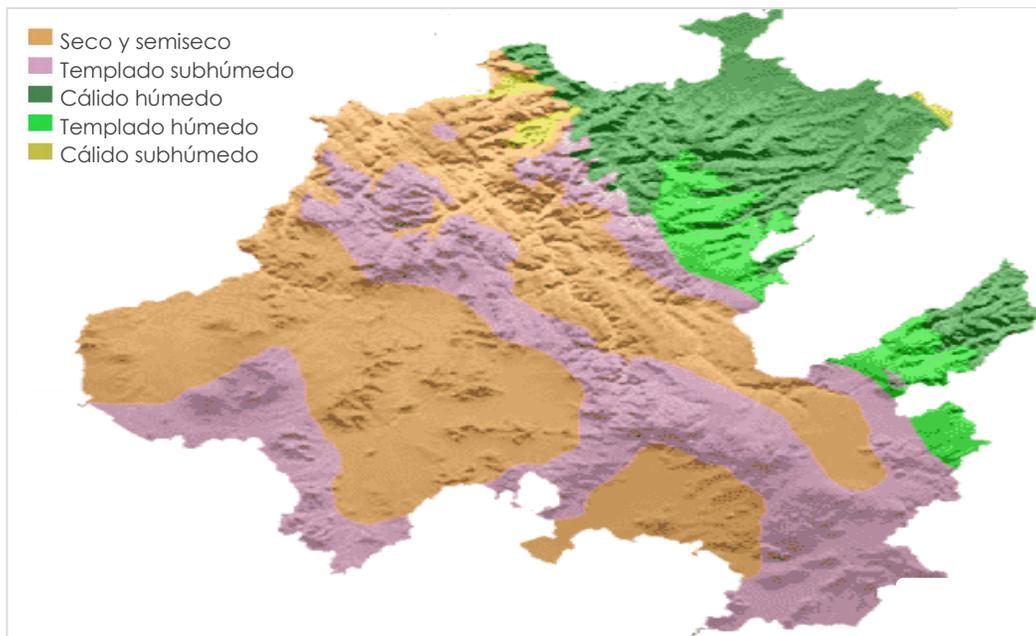
Latitud: 20° 24' 52" N

Longitud: 99° 13' 21" O

Altitud: 1799 m s.n.m.

### 2.2.2 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

De acuerdo con García de Miranda (1988) en el país existen una gran diversidad de climas, los cuales, de manera muy general pueden clasificarse según su temperatura, en cálido, templado y frío; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en húmedo, subhúmedo y seco. De acuerdo con INEGI, el 39% del estado de Hidalgo presenta clima seco y semiseco, el 33% templado subhúmedo, el 16% cálido húmedo, 6% cálido subhúmedo y el restante 6% templado húmedo, estos últimos se presentan en la zona de la huasteca. En el mapa 6 se representan los porcentajes antes mencionados.



MAPA 6 CLIMA DEL ESTADO DE HIDALGO POR REGIONES. FUENTE: INEGI, 2010.

De acuerdo con el mapa anterior para la región de la localidad de El Alberto corresponde un clima seco y semiseco que favorece el crecimiento de plantas cactáceas como el maguey pulquero, nopal, agave, así como el mezquite, copal, abeto, pino, encino, oyamel y el enebro.

La temperatura media anual es de 17.7 °C, la temperatura mínima es alrededor de 9.3 °C que se presenta en el mes de enero y la máxima se presenta en abril y mayo que en promedio es de 26.1 °C. La lluvia se presenta en verano, en los meses de junio a septiembre, con un número de días con lluvia de 56.9, la precipitación

media es de 363 mm anuales, la evaporación total anual es de 1938.8 mm; de acuerdo con la estación meteorológica del servicio meteorológico nacional, 13069 El Mezquital km 150, con datos del periodo 1951-2010, que se encuentra operando a 7 kilómetros de la localidad.

### 2.2.3 DATOS POBLACIONALES

La localidad de El Alberto de acuerdo con INEGI (2010a), cuenta con una población total de 834 habitantes de los cuales 397 son hombres y 437 mujeres. Del total de sus habitantes 632 hablan lengua indígena, lo cual destaca la fuerte presencia del pueblo indígena otomí que se autodenomina Hñahñu. La población cuenta con los servicios básicos de drenaje y energía eléctrica, cuenta con un total de viviendas de 396, de las cuales 217 son viviendas particulares habitadas, 213 disponen de agua entubada y solo 168 disponen de drenaje.

La estructura social, es fuerte y se rige por los hombres que se encuentran en la comunidad cuando no los emplean en EUA. Se distinguen por su liderazgo y uniforme toma de decisiones a través de la "Asamblea Comunitaria", ente conformada por las autoridades de cada rubro (primaria, secundaria, delegado, comisariado, representante municipal, etc.), que asigna y atiende el debido cumplimiento de las tareas establecidas y los compromisos adquiridos dentro de la misma comunidad (Palomino *et al.*, 2008).

La localidad cuenta con un parque ecoturístico llamado "Parque EcoAlberto", este proyecto nació como respuesta a la falta de fuentes de empleo e ingresos; habiendo partido más del 50% del total de su población a Estados Unidos, y tras haber dejado sus tierras y sus familias, se vieron en la necesidad de crear una opción que les generara ingresos. Este cuenta con un balneario y un parque de actividades recreativas. Así la oferta turística la integran:

- Actividades: paseo en lancha por el río, tirolesa, caminata, recorridos por el pueblo y campismo. Así como, la caminata nocturna del "Sueño Americano", la comunidad El Alberto realiza esta caminata nocturna en homenaje a los migrantes, con el propósito de hacer conscientes de su travesía, para lograr el sueño americano y al mismo tiempo compartir las tradiciones, que los han mantenido unidos como comunidad.
- Servicios: albercas, baños y regaderas, vestidores, estacionamiento, tienda, servicio de alimentos tradicionales y cabañas.

Los miembros de la comunidad adquieren responsabilidades y tareas dentro de esta para beneficio de todos por lo que no reciben salario por sus servicios prestados.

En las figuras 9 y 10 se muestran las infraestructuras con las que cuentan en la localidad, que forman parte del "Parque Ecoalberto".



FIGURA 10 BALNEARIO DEL "PARQUE ECOALBERTO"

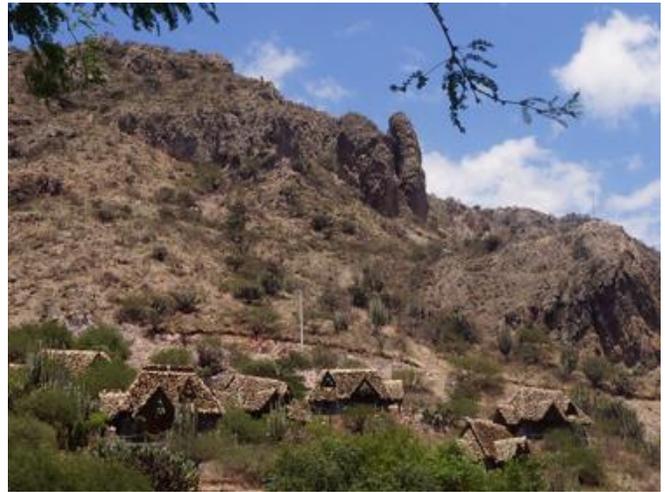


FIGURA 11 PARQUE RECREATIVO "EL GRAN CAÑÓN"

La localidad de El Alberto además de contar con el ecoturismo forma parte del proyecto "Mejoramiento de los servicios de saneamiento, agrícola, turístico y ecológico hacia un manejo sustentable en la comunidad indígena Hñahñu, El Alberto, Ixmiquilpan (Hidalgo, México)" aprobado en el año 2015 por el programa Alianza de América del Norte para la Acción Comunitaria Ambiental (NAPECA, por sus siglas en inglés) la cual tiene como propósito respaldar a organizaciones no gubernamentales sin fines de lucro de Canadá, Estados Unidos y México que trabajan con comunidades locales, con miras a generar un sentido compartido de responsabilidad en la protección del medio ambiente.

Entre las metas a cumplir en el proyecto antes mencionado se encuentra el mejoramiento del sistema de saneamiento y alcantarillado de la comunidad para las actividades domésticas y turísticas, mediante el diseño y la construcción de plantas de tratamiento de agua residual que garanticen la calidad del agua tratada antes de su reuso o descarga en el río Tula.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 PUNTOS DE MUESTREO

Se establecieron los puntos de muestreo en dos zonas estratégicas de la localidad El Alberto, debido a que no se cuenta con planos de la red de alcantarillado, se siguió la recomendación de una comitiva local con conocimiento de los puntos donde convergían el mayor número de usuarios conectados en la red, tomando en cuenta la futura ubicación de las plantas de tratamiento de agua residual y siendo las descargas de estos puntos directas al río Tula.

En la figura 11 se muestra la ubicación de los sitios de muestreo seleccionados. En el sitio 1 se encuentra el punto nombrado "Potabilizadora" con las coordenadas geográficas: latitud  $20^{\circ} 25' 6.7''$  N y longitud  $99^{\circ} 13' 54.9''$  O, en el sitio 2 se ubicó el punto de muestreo "Escuela" con coordenadas geográficas: latitud  $20^{\circ} 24' 47''$  N y longitud  $99^{\circ} 13' 4.8''$  O. Se nombraron a los puntos de muestreo de la manera anterior debido a las construcciones representativas presentes en cada lugar.

Debido al tamaño de la localidad El Alberto, no se cuenta con una representación geográfica de los límites de esta por lo que el punto 3 representa la ubicación de las coordenadas geográficas que el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) proporciona como información para la localidad.

Del lado derecho inferior de la misma figura se encuentra localizado el balneario que forma parte del "Parque EcoAlberto".

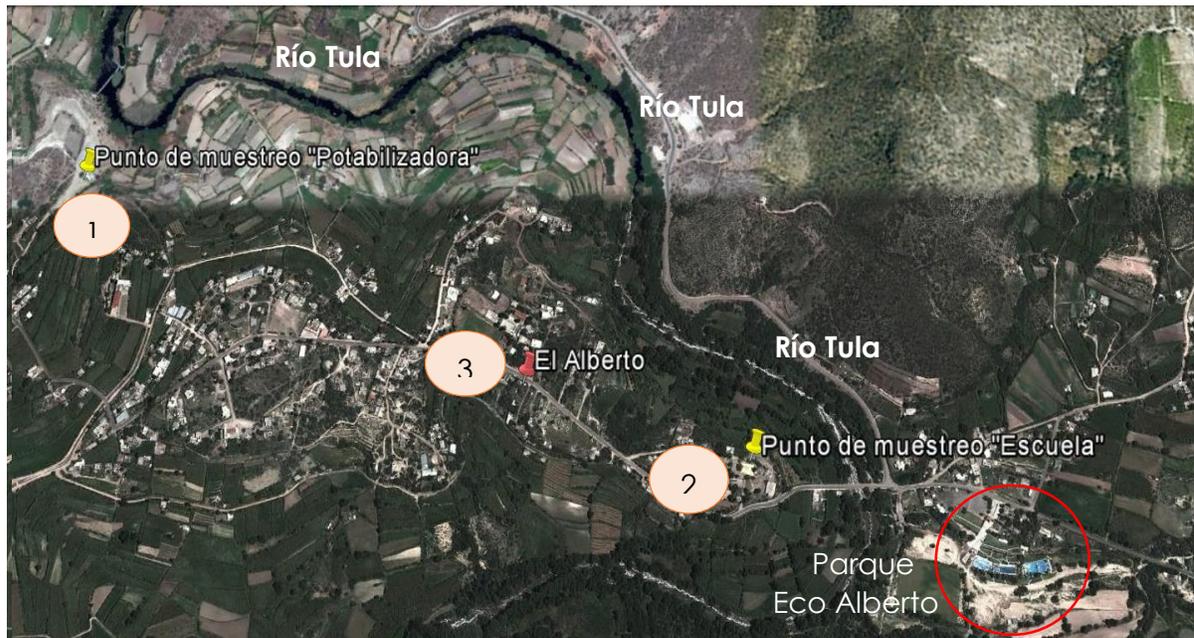


FIGURA 12 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.2 MUESTREO

La toma de muestras en los puntos de muestreos “Potabilizadora” y “Escuela” se realizaron del 20 al 24 de abril del 2015, con un horario de 6:00 a 21:00 h.

Para el punto “Potabilizadora” se tomaron muestras los días 20, 22 y 24 de abril del 2015 y para el punto “Escuela” los días 21, 23 y 24 de abril del 2015. En paralelo en ambos punto se realizó la medición del gasto de la descarga durante los 5 días de la semana para la obtención de un gasto promedio.

Los muestreos se realizaron cada 3 horas de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, para poder cubrir las 24 horas que opera el proceso generador de la descarga y cumplir con el número de muestras simples que se muestra a continuación en la tabla 12.

TABLA 12 FRECUENCIA DE MUESTREO PARA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA.  
FUENTE: NOM-001-SEMARNAT-1996.

FRECUENCIA DE MUESTREO			
HORAS POR DÍA QUE OPERA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA	NÚMERO DE MUESTRAS SIMPLES	INTERVALO ENTRE TOMA DE MUESTRAS SIMPLES (HORAS)	
		MÍNIMO	MÁXIMO
MENOR QUE 4	Mínimo 2	N.E.	N.E.
DE 4 A 8	4	1	2
MAYOR QUE 8 Y HASTA 12	4	2	3
MAYOR QUE 12 Y HASTA 18	6	2	3
MAYOR QUE 18 Y HASTA 24	6	3	4

N.E. No especificado

De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, una muestra simple es aquella que se toma en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición.

El volumen de cada muestra simple necesaria para formar la muestra compuesta se determinó mediante la ecuación 1:

$$VMS_i = VMC \times \left( \frac{Q_i}{Q_T} \right) \quad (1)$$

Donde:

$VMS_i$  = volumen de cada una de las muestras simples "i", (L)

$VMC$  = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, (L)

$Q_i$  = gasto medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, (L/s)

$Q_T = \sum Q_i$  hasta  $Q_n$ , (L/s)

Para nuestro caso se requerían de 10 L de muestra compuesta para poder realizar la caracterización del agua residual.

Una muestra compuesta es la que resultó de mezclar el número de muestras simples resultantes del muestreo. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples debió ser proporcional al gasto de la descarga en el momento de su toma lo cual se ve reflejado en la ecuación 1.

Se obtuvo entonces, 6 muestras simples y una muestra compuesta por cada día de muestreo. Dando un total de 36 muestras simples y 6 muestras compuestas.

En las figuras 12 y 13 se muestran ambos puntos de muestreo.



FIGURA 13 DESCARGA, PUNTO DE MUESTREO "ESCUELA"



FIGURA 14 DESCARGA, PUNTO DE MUESTREO "POTABILIZADORA"

El Anexo 1 contiene la memoria fotográfica de la realización del muestreo, la toma de muestras, la recolección y el almacenamiento, así como la medición del gasto en para ambos puntos.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

La caracterización del agua residual estuvo encaminada a determinar: a) las características físicas, químicas y biológicas del agua y las concentraciones de los constituyentes del agua residual, y b) los medios óptimos para reducir las concentraciones de contaminantes (Metcalf y Eddy, 1996).

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 las características físicas son aquellas que se detectan sensorialmente y tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua, para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos, el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio; las características químicas son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana; las características biológicas son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana, para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

Para la caracterización del agua residual se nos asignó un área de trabajo donde se montó un pequeño laboratorio donde se midieron los siguientes parámetros de calidad *in situ* para cada muestra simple:

- Temperatura
- pH
- Conductividad
- Salinidad
- Oxígeno disuelto
- Turbiedad

La determinación de la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento y análisis de laboratorio, por ejemplo la actividad biológica y el grado de saturación de oxígeno disuelto se relacionan con la temperatura. Su medición se realizó por medio de un multiparámetro.

El pH es la medida de la intensidad ácida o básica de una disolución, su determinación fue mediante el multiparámetro.

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, esta depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y a la temperatura a la cual se haga la determinación. Su medición se realizó por medio del multiparámetro.

Cuando en el agua el constituyente principal es cloruro de sodio y la concentración es mayor de lo usual, se dice que el agua es salina. La salinidad se

puede expresar como el número de gramos de sal por kilogramo de muestra. La determinación de esta se realizó por medio del multiparámetro.

El oxígeno disuelto es un indicador de la contaminación y de la capacidad de dar soporte a la vida vegetal y animal; generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Este parámetro se determinó por medio del multiparámetro.

En la figura 14 se muestra el equipo utilizado para la determinación de los parámetros antes mencionados.



FIGURA 15 MULTIPARÁMETRO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS *IN SITU*

La turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión, puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño. La determinación de este parámetro se realizó con el turbidímetro que se muestra en la figura 15.



FIGURA 16 TURBIDÍMETRO

En la figura 16 se muestra el montaje del laboratorio provisional en la localidad de El Alberto.



FIGURA 17 LABORATORIO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN EL SITIO DE MUESTREO

Las muestras fueron almacenadas temporalmente en el sitio de muestreo para la determinación de los parámetros *in situ* y posteriormente eran transportadas diariamente al Instituto de Ingeniería, UNAM para su almacenamiento en la cámara fría del Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) y poder realizar la caracterización de las muestras simples y compuestas de los siguientes parámetros:

- Alcalinidad
- Dureza
- Nitrógeno amoniacal
- DQO
- DBO<sub>5</sub>
- Ortofosfatos
- COT
- SST

La alcalinidad del agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, para reaccionar con iones hidrógeno o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH<sup>-</sup>). La alcalinidad es debida generalmente a la presencia de los iones bicarbonato, carbonatos e hidróxidos. Su determinación se realizó por el método volumétrico de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 y al “*Standar Methods for the Examination of water and wastewater*”, APHA Método 2320.

Se considera que la dureza total es aproximadamente igual a la dureza producida por los iones calcio y magnesio, un agua dura es aquella que requiere cantidades considerables de jabón para producir espuma y producen incrustaciones en las tuberías, calentadores, calderas y otras unidades en las cuales se incrementa la temperatura del agua. La determinación de este parámetro se realizó mediante el

método volumétrico de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001 y al APHA Método 3500, 3500 (Ca) y 3500 (Mg).

El nitrógeno orgánico está asociado a la materia orgánica: proteínas, urea, ácidos nucleicos, etc., el nitrógeno amoniacal es una de las formas de nitrógeno que se encuentran en el agua, los compuestos de amonio suministran amoniaco a las plantas para más producción de proteínas y los compuestos del nitrógeno no utilizados son arrojados en los excretos, estos y la materia remanente de animales muertos y plantas son convertidos en amoniaco por las bacterias. El nitrógeno amoniacal se determinó por medio de método de silicato 10031 de acuerdo con el manual (HACH, 2003).

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro de contaminación que mide el material orgánico total contenido en una muestra, mediante oxidación química, es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte. Su determinación fue mediante el método de digestión 8000, (HACH , 2003).

La demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias, en un periodo de cinco días y a una temperatura de 20° C. Su determinación fue de acuerdo a las Normas Mexicanas NMX-AA-028-SCFI-2001 y NMX-012-SCFI-2001.

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales; actualmente es considerado como uno de los nutrientes que controla el crecimiento de algas, por la que un exceso de fósforo produce un desarrollo exorbitado de algas, el cual es causa de condiciones inadecuadas para ciertos usos benéficos del agua. Una de las formas de importancia del fósforo presente en el agua residual son los ortofosfatos, estos están presentes debido al uso de detergentes. La determinación de este parámetro se realizó por medio del método de molibvanadato 8114, (HACH , 2003).

El carbono orgánico total (COT) es una medida del control de materia orgánica del agua, es especialmente utilizable en pequeñas concentraciones, en presencia de un catalizador, el carbón orgánico se oxida a  $CO_2$ . El COT se determinó por medio del método directo 10128, (HACH , 2003).

Los sólidos suspendidos totales (SST) se refieren al material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro y secados a una temperatura de 103 a 105 °C. Este parámetro se determinó de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001.

Para más detalle de los procedimientos utilizados en la caracterización del agua residual consultar el Anexo 2.

Adicionalmente a los parámetros antes mencionados, también se realizó el análisis de los parámetros biológicos coliformes fecales y huevos de helmintos, obtenidos con ayuda del personal encargado del área de microbiología del LIA.

Las muestras compuestas fueron enviadas al laboratorio certificado IDECA para la determinación de los parámetros grasas y aceites (G y A) y metales pesados, establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que en el LIA no se cuenta con el material y reactivos para su determinación.

### 3.4 DISEÑO TEÓRICO DEL HUMEDAL

Se consideraran los parámetros que se muestran en la tabla 13 del influente y efluente respectivamente para poder realizar el dimensionamiento del humedal, además de conocer el tipo de flujo que este tendrá. Los valores del efluente son de acuerdo a la calidad requerida.

TABLA 13 PARÁMETROS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

Parámetros	
INFLUENTE	EFLUENTE
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>
TEMPERATURA	SST
SST	GyA
CARGA ORGÁNICA	N <sub>total</sub>
GASTO	

Para poder realizar el dimensionamiento de los humedales se utilizaron las siguientes ecuaciones de acuerdo con el Manual de prácticas FD-16, "*Natural Systems for Wastewater Treatment*".

La cinética para un humedal con plantas hidrófitas con un flujo subsuperficial está descrita por las siguientes ecuaciones que permiten el dimensionamiento de los humedales. Con la ecuación 2 se obtiene el área de los humedales:

$$A = \left[ \frac{Q * (\ln C_i - \ln C_e)}{kt * d * f} \right] \quad (2)$$

Donde:

Q = gasto promedio del influente, (m<sup>3</sup>/d)

C<sub>i</sub> = concentración de DBO<sub>5</sub> en el influente, (mg/L)

C<sub>e</sub> = concentración de DBO<sub>5</sub> en el efluente, (mg/L)

$d$  = altura del humedal, (m)

$f$  = fracción porosa del medio

$kt$  = constante a la temperatura del sistema, ( $d^{-1}$ ); la cual se calcula con la ecuación 3.

$$kt = kt_{20} * 1.06^{(T-20)} \quad (3)$$

Donde:

$kt_{20}$  = constante a la temperatura estándar de 20 °C

El tiempo de retención hidráulico está dado por la ecuación 4.

$$TRH = \frac{A*d}{Q} \quad (4)$$

La obtención del volumen que se tendrá en el humedal se calcula con la ecuación 5.

$$V = A * d \quad (5)$$

Para poder calcular los parámetros ancho y largo es necesario obtener de la literatura los parámetros siguientes:

- Conductividad hidráulica del medio ( $ks$ )
- Pendiente del lecho ( $s$ )

Y calcular los parámetros:

- a) Velocidad a través del área con la ecuación 6.

$$v = ks * s \quad (6)$$

- b) El área de la sección transversal del lecho con la ecuación 7.

$$Ac = \frac{Q_p}{v} \quad (7)$$

Donde:

$Q_p$  = flujo promedio considerando el porcentaje de evaporación, ( $m^3/d$ )

Con las ecuaciones 7 y 8 se calculan los parámetros ancho y largo respectivamente.

$$W = Ac * d \quad (7)$$

$$L = \frac{A}{w} \quad (8)$$

## CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual a partir de los métodos antes mencionados se muestran en las siguientes tablas, en las cuales se presenta en mínimo, máximo y la media para cada parámetro de las muestras puntuales. La tabla 14 muestra los parámetros para el caso de "Escuela" y la tabla 15 muestra el caso de "Potabilizadora".

TABLA 14 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN EL PUNTO "ESCUELA"

PARÁMETROS	UNIDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA
Temperatura	°C	24.70	17.60	21.86
pH	---	8.00	7.00	7.28
Turbiedad	UTN	479.50	7.08	150.65
Conductividad	μS/cm	2220.00	788.00	1588
Salinidad	%	1.00	0.10	0.77
OD	mg/L	5.80	0.40	3.98
Ortofosfatos	mg/L	2.70	12.10	7.12
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	450.40	370.33	417.64
COT	mg/L	545.00	71.00	153.91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	100.00	0.20	32.52
DBO <sub>5</sub>	mg/L	620.30	3.41	95.22
DQO	mg/L	1105.00	30.00	247.68
SST	mg/L	250.00	8.00	90.09
G y A	mg/L	39.00	<5	25.20
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	1.90E+06	3.50E+03	3.58E+05
Huevos de Helminetos	HH/L	1.80	0.20	0.74

TABLA 15 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN EL PUNTO "POTABILIZADORA"

PARÁMETROS	UNIDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA
Temperatura	°C	25.00	18.90	22.49
pH	---	8.00	7.00	7.25
Turbiedad	UTN	191.30	13.88	49.01
Conductividad	μS/cm	2180.00	1689.00	1951.47
Salinidad	%	1.10	1.00	1.04
OD	mg/L	4.70	2.00	3.25
Ortofosfatos	mg/L	9.10	2.10	5.21
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	690.61	450.40	579.92
COT	mg/L	135.00	37.00	88.59
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	19.00	2.90	11.22
DBO <sub>5</sub>	mg/L	64.10	6.20	25.63
DQO	mg/L	560.00	27.00	101.44
SST	mg/L	260.00	6.00	61.31
G y A	mg/L	7.00	<5	5.83
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	4.53E+05	4.00E+04	1.45E+05
Huevos de Helminfos	HH/L	1.60	0.20	0.86

La variabilidad que se obtuvo en los resultados de la calidad del agua residual fue alta, como se puede observar en el parámetro de DQO en el punto de muestreo "Escuela" ya que se tiene un valor máximo de 1105 mg/L y un valor mínimo de 30 mg/L, esta variabilidad en la calidad del agua se obtuvo en la mayoría de los parámetros medidos para ambos casos, un ejemplo de esto se muestra en las figuras 17 y 18 para la toma de la muestra puntual en diferentes horarios del día en el punto de muestreo "Escuela".

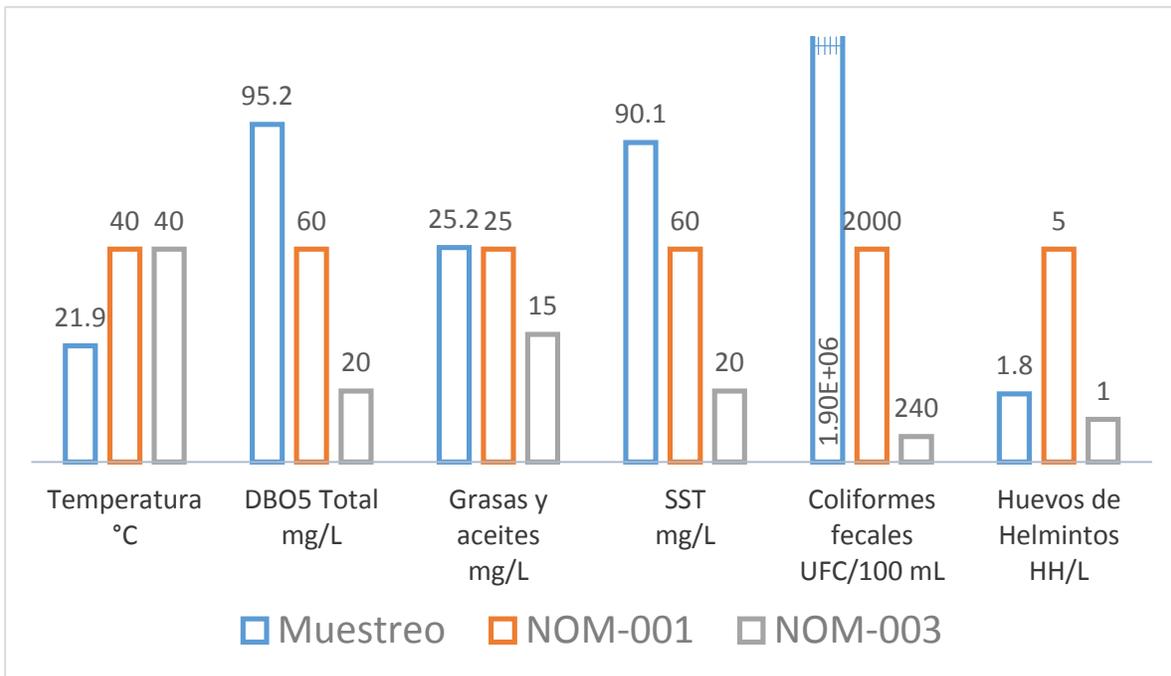


FIGURA 18 TOMA DE MUESTRA PUNTUAL PARA EL PUNTO "ESCUELA" 06:52 A.M.

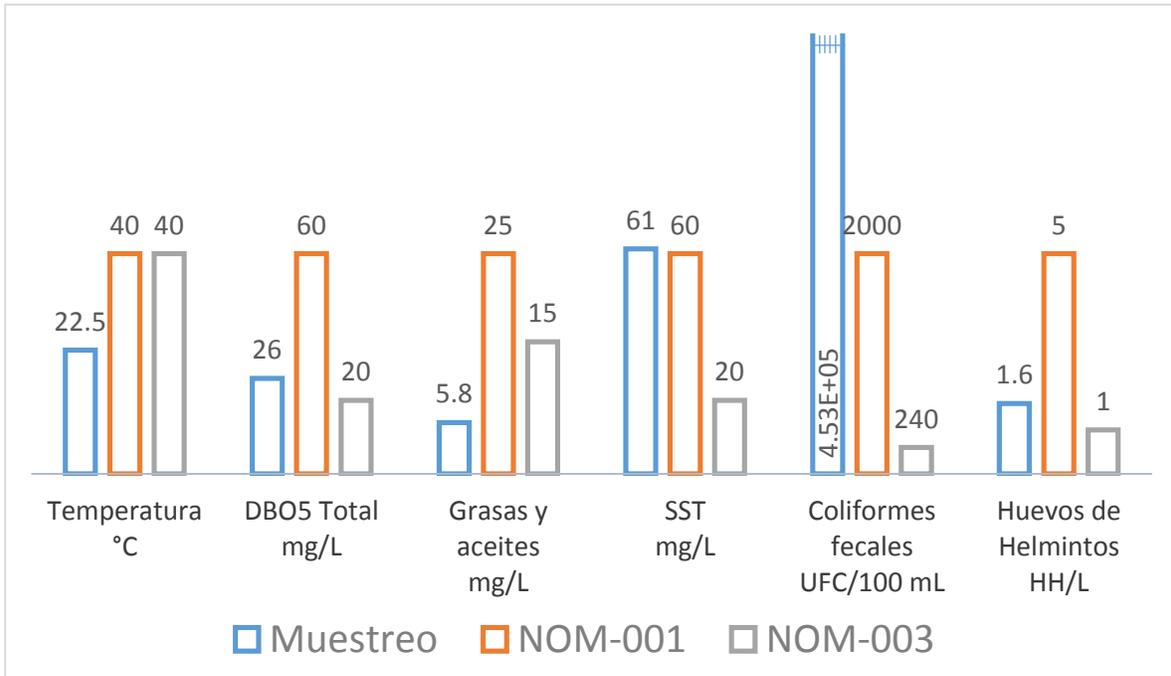


FIGURA 19 TOMA DE MUESTRA PUNTUAL PARA EL PUNTO "ESCUELA" 13:41 P.M.

En las gráficas 3 y 4 se muestra la comparación para cada punto de muestreo de los valores máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001 Y NOM-003 con relación al valor promedio obtenido en la caracterización del agua residual.



GRÁFICA 3 TABLA COMPARATIVA DE LOS VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON RESPECTO A LA NORMATIVIDAD, PUNTO DE MUESTREO "ESCUELA"



GRÁFICA 4 TABLA COMPARATIVA DE LOS VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON RESPECTO A LA NORMATIVIDAD, PUNTO DE MUESTREO "POTABILIZADORA"

En la gráfica 3 correspondiente al punto de muestreo "Escuela" se observa que el valor promedio de los valores obtenidos en la caracterización del agua está por encima del límite máximo permisible establecido en las normas antes mencionadas por lo que es necesario establecer un sistema de tratamiento de agua residual para cumplir con ambas normas.

Para el punto de "Potabilizadora" se cumplen con ciertos parámetros como es la DBO<sub>5</sub> y los huevos de Helmintos, con base a lo establecido en la NOM-001. De acuerdo con los límites máximos permisibles con respecto a la normatividad de reúso, los valores obtenidos sobrepasan dichos valores.

Para ambos casos los valores obtenidos en el parámetro de coliformes fecales, están muy por encima de lo establecido en ambas normas, por lo que es necesario implementar el sistema de tratamiento para ambos puntos de descarga.

En las tablas 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos medidos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental para las muestras compuestas para ambos puntos de muestreo.

TABLA 16 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS COMPUESTAS, PUNTO DE MUESTREO "ESCUELA"

PARÁMETROS	UNIDADES	MC1	MC2	MC3
Ortofosfatos	mg/L	9.50	SD	3.30
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	390.34	SD	410.36
COT	mg/L	266.00	SD	62.00
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	>100	SD	5.00
DBO <sub>5</sub>	mg/L	475.00	SD	13.00
DQO	mg/L	463.85	SD	48.00
SST	mg/L	100.00	SD	42.00
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	538.00	SD	458.00

SD = Sin dato

Para el punto de muestreo "Escuela no se obtuvo muestra compuesta del día 23 de Abril del 2015, ya que se obtuvieron únicamente 3 muestras puntuales debido a que en ciertos horarios del muestreo el gasto de la descarga era cero como se muestra en las figuras 19, la falta de gasto fue a causa de una reunión que se llevó acabo en la escuela cercana al punto de muestreo, por parte de los pobladores de El Alberto.



FIGURA 20 PUNTO DE MUESTREO "ESCUELA"  
SIN GASTO 23/04/2015

TABLA 17 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS COMPUESTAS, PUNTO DE MUESTREO "POTABILIZADORA"

PARÁMETROS	UNIDADES	MC1	MC2	MC3
Ortofosfatos	mg/L	4.60	3.30	4.20
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	610.54	590.50	590.52
COT	mg/L	71.00	107.00	92.00
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	6.60	10.00	12.90
DBO <sub>5</sub>	mg/L	49.63	34.12	96.15
DQO	mg/L	42.00	71.35	76.00
SST	mg/L	38.00	200.00	260.00
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	538.00	618.00	678.00

Para el caso de los metales se obtuvieron los valores medios que se muestran en la tabla 18, para el punto de muestreo "Escuela" (MC-E) y para las muestras compuestas del punto "Potabilizadora" (MC-P), en comparación con lo establecido en la normatividad.

TABLA 18 RESULTADOS DE METALES EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL, LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDOS POR LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS

PARÁMETROS	UNIDADES	MC-E	MC-P	NOM-001	NOM-003
Arsénico	mg/L	0.0044	0.0069	0.20	0.40
Boro	mg/L	< 0.05	< 0.05	---	---
Cadmio	mg/L	< 0.005	< 0.005	0.20	0.40
Cianuros	mg/L	< 0.001	< 0.001	2.00	3.00
Cobre	mg/L	0.0090	0.0137	6.00	6.00
Cromo	mg/L	< 0.008	< 0.008	1.00	1.50
Mercurio	mg/L	0.00045	0.0009	0.01	0.02
Níquel	mg/L	< 0.02	< 0.02	4.00	4.00
Plomo	mg/L	< 0.02	0.0900	0.40	1.00
Zinc	mg/L	0.1175	0.1073	20.00	20.00

Los valores de metales obtenidos en las muestras compuestas están por debajo del límite máximo permisible establecido en ambas normas.

Debido a la alta variabilidad en los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual es necesario realizar un análisis estadístico de los parámetros, para así poder incluir el valor máximo y mínimo en el valor del diseño de los humedales sin que haya un sobredimensionamiento o subdimensionamiento en el sistema de tratamiento.

De acuerdo con Metcalf y Eddy (1996), en la obtención de las características estadísticas de una serie de datos es necesario ver si los datos se ajustan a una distribución normal o si son datos sesgados. En la mayoría de los casos prácticos, la determinación del tipo de distribución se lleva a cabo representando los datos en diferentes gráficas probabilísticas y comprobando si pueden o no ser ajustados por una recta. Si se trata de una distribución normal, los parámetros que se emplean para caracterizar la serie de datos incluyen, entre otros, la media, la mediana, la moda, la desviación estándar, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis. Si se trata de una distribución sesgada, resultan relevantes tanto la media geométrica como la desviación estándar.

Para nuestro caso se obtuvo una distribución normal en todos los parámetros medidos en las muestras puntuales, a continuación se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en el análisis estadístico.

La tabla 19 muestra los valores de los parámetros estadísticos para el punto de muestreo "Escuela" correspondiente al parámetro nitrógeno amoniacal.

TABLA 19 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE NITRÓGENO AMONICAL, "ESCUELA"

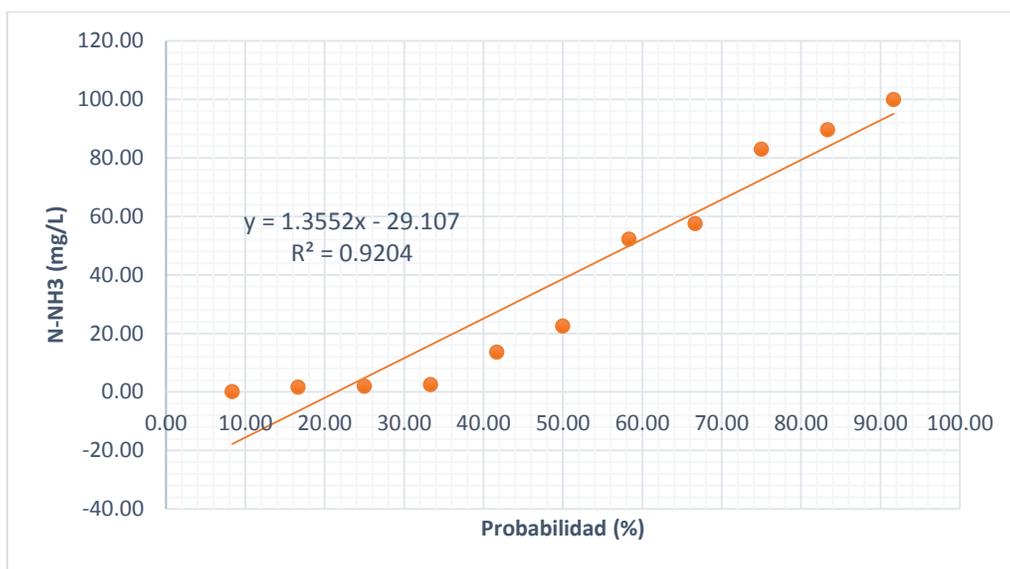
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	VALOR
MEDIA ( $\bar{x}$ )	32.52
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (s)	34.74
COEFICIENTE DE ASIMETRÍA ( $\alpha_3$ )	1.24
COEFICIENTE DE CURTOSIS ( $\alpha_4$ )	2.90
FACTOR DE PROBABILIDAD	87.5 %
VALOR DE NITRÓGENO AMONICAL CORRESPONDIENTE AL FACTOR DE PROBABILIDAD	85.5 mg/L

El parámetro  $\alpha_3$  será positivo o negativo si la distribución es sesgada a la derecha o a la izquierda, respectivamente. Para una distribución simétrica,  $\alpha_3 = 0$ , en este caso se tiene un valor de 1.24 es decir una distribución ligeramente sesgada a la derecha.

Cuando el valor de  $\alpha_4 = 3$  se dice que los datos se distribuyen de forma normal, si  $\alpha_4 > 3$  entonces la distribución es más empinada que la curva normal y si  $\alpha_4 < 3$  entonces la distribución es más aplanada que la curva normal, por lo tanto se tiene una distribución más aplanada que la normal.

El factor de probabilidad, se refiere al factor diario semanal al cual se calcula el valor diario máximo semanal de nitrógeno amoniacal resultado del análisis estadístico.

En la gráfica 5 se muestra los datos de nitrógeno amoniacal para el punto "Escuela" ajustados por una recta.



GRÁFICA 5 DISTRIBUCIÓN PARA EL PARÁMETRO NITRÓGENO AMONIACAL, "ESCUELA"

A continuación se muestra una tabla resumen para cada punto de muestreo de los resultados obtenidos en el análisis estadístico de los parámetros analizados.

TABLA 20 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS PARA EL PUNTO DE MUESTREO "ESCUELA"

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS				
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE SIMETRÍA	COEFICIENTE DE CURTOSIS	VALOR AL 87.5 %
Temperatura	21.86	2.44	-0.35	1.6	25.09
pH	7.28	0.42	0.87	1.95	7.77
Turbiedad	150.65	173.61	0.91	2.04	361.30
Conductividad	1588.00	408.42	-0.31	2.35	2129.80

Salinidad	0.77	0.25	-1.88	5.82	0.98
OD	3.98	1.63	-0.87	2.82	5.87
Ortofosfatos	7.12	3.34	0.24	1.35	11.51
Dureza total	417.64	31.36	-0.29	1.57	458.59
COT	153.91	143.26	1.98	5.64	202.14
Nitrógeno Amoniacal	32.52	34.74	1.24	2.90	85.74
DBO <sub>5</sub>	95.22	188.16	2.16	6.14	272.65
DQO	247.68	324.72	1.81	4.98	590.72
SST	90.09	91.95	0.93	2.09	202.14

TABLA 21 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS PARA EL PUNTO DE MUESTREO "POTABILIZADORA"

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS				
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE SIMETRÍA	COEFICIENTE DE CURTOSIS	VALOR AL 87.5 %
Temperatura	22.49	1.79	-0.37	2.14	24.84
pH	7.25	0.30	0.83	2.76	7.61
Turbiedad	49.01	43.73	2.17	7.24	95.12
Conductividad	1951.47	135.64	-0.34	2.15	2128.75
Salinidad	1.04	0.05	0.35	1.06	1.10
OD	3.25	0.75	-0.16	2.25	4.21
Ortofosfatos	5.21	2.11	0.24	2.18	7.98
Dureza total	579.92	61.34	-0.004	2.59	658.41
COT	88.59	25.15	0.03	2.56	121.03
Nitrógeno Amoniacal	11.22	5.12	-0.11	1.73	18.04
DBO <sub>5</sub>	25.63	21.43	0.52	1.48	52.22
DQO	101.44	120.03	3.45	13.33	190.55
SST	61.31	57.48	2.41	9.09	120.25

Para más detalle de la metodología empleada en la obtención de los resultados del análisis estadístico para los parámetros medidos en ambos puntos de muestreo consultar el Anexo 3.

Debido a la variabilidad de los datos obtenidos en ambos casos es necesario considerar implementar un pretratamiento para poder regular tanto el flujo como la concentración de los contaminantes y eso no afecte al sistema de tratamiento de agua principal. El pretratamiento propuesto es una fosa séptica, debido a su fácil operación y bajo consumo de energía, para la cual se consideró de acuerdo con Seoáñez (1999) un 20% de remoción de DBO<sub>5</sub> en el influente.

Para la implementación de la fosa séptica se consideró el biodigestor ya fabricado de la marca Rotoplas, considerando principalmente los costos de construcción. Para ambos casos se seleccionó el biodigestor de con capacidad de 7,000 L con base al número de personal equivalente (usuarios), el cual debido a que no se cuenta con los planos de la red de alcantarillado se calculó con la ecuación 9 a partir del gasto, la concentración de DBO<sub>5</sub> obtenida en la caracterización y con el valor de DBO<sub>5</sub> que una persona aporta al día, donde el producto del gasto por la concentración de DBO<sub>5</sub> es la carga orgánica.

$$Personal\ Equivalente = \frac{Q \cdot DBO_5}{c} \tag{9}$$

Donde:

Q = gasto, (m<sup>3</sup>/d)

DBO<sub>5</sub> = concentración de DBO<sub>5</sub>, (g/L)

C = aportación de DBO<sub>5</sub> por persona al día, (60 g/hab d).

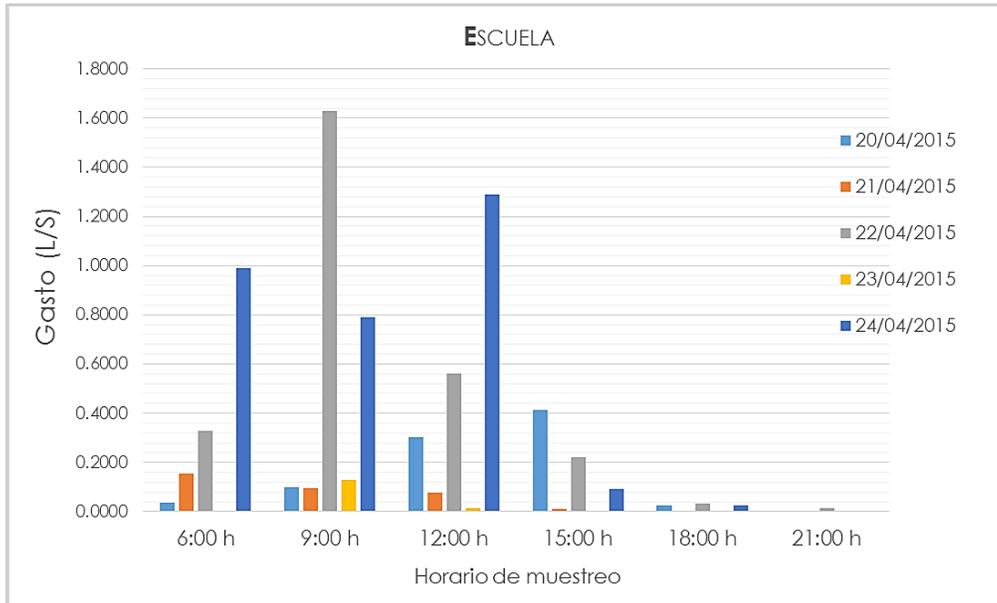
En la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para el personal equivalente (usuarios) y la carga orgánica calculada en cada caso.

TABLA 22 PERSONAL EQUIVALENTE Y CARGA ORGÁNICA PARA LOS PUNTOS DE MUESTREO

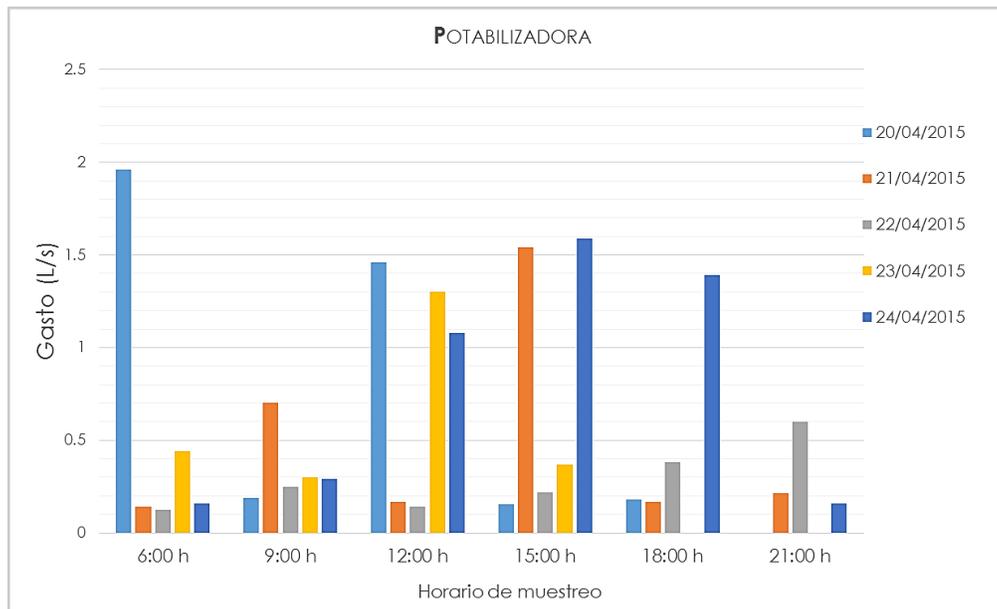
PUNTO DE MUESTREO	PERSONAL EQUIVALENTE (USUARIOS)	CARGA ORGÁNICA (g DBO <sub>5</sub> /d)
ESCUELA	36	2149
Potabilizadora	34	2067

## 4.2 RESULTADOS DE LOS GASTOS MEDIDOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la medición de los gastos medidos durante la realización del muestreo, en la gráfica 6 se presentan los correspondientes al punto de muestreo "Escuela" y la gráfica 7 para el punto "Potabilizadora".



GRÁFICA 6 GASTOS MEDIDOS EN EL PUNTO "ESCUELA"



GRÁFICA 7 GASTOS MEDIDOS EN EL PUNTO "POTABILIZADORA"

En la tabla 23 se muestran los valores máximo, mínimo y media para cada caso respectivamente.

TABLA 23 VALORES MÁXIMO, MÍNIMO Y MEDIA PARA CADA PUNTO DE MUESTREO

<b>GASTOS "ESCUELA"</b>	<b>VALOR (L/s)</b>
MÁXIMO	1.63
MÍNIMO	0.00095
MEDIA	0.2618
<b>GASTO "POTABILIZADORA"</b>	<b>VALOR (L/s)</b>
MÁXIMO	1.96
MÍNIMO	0.125
MEDIA	0.58

### 4.3 DIMENSIONAMIENTO CONCEPTUAL DE LOS HUMEDALES

El diseño conceptual de los humedales se realizó con base a las ecuaciones mencionadas en el capítulo 3 y de acuerdo a los valores del influente obtenidos en el análisis estadístico. En las tablas 24 y 25 se muestran los valores del influente utilizados para el dimensionamiento de las plantas de tratamiento del punto "Escuela" y "Potabilizadora" respectivamente.

TABLA 24 PARÁMETROS DEL INFLUENTE "ESCUELA"

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
GASTO	0.262 L/s
TEMPERATURA	29.05 °C
DBO <sub>5</sub>	272.65 mg/L
SST	202.14

TABLA 25 PARÁMETROS DEL INFLUENTE "POTABILIZADORA"

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
GASTO	0.58 L/s
TEMPERATURA	24.84 °C
DBO <sub>5</sub>	52.22 mg/L
SST	120.25

Los valores del efluente se reportan en la tabla 26, de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-003, que son los valores más bajos de ambas normas con las que se deben cumplir, los cuales son para ambos puntos de muestreo.

TABLA 26 PARÁMETROS DEL EFLUENTE PARA AMBOS PUNTOS DE MUESTREO

PARÁMETRO	VALOR
DBO <sub>5</sub>	20 mg/L
SST	20 mg/L
G Y A	< 15 mg/L
N TOTAL	< 15 mg/L

En la tabla 27 se muestran los resultados obtenidos del dimensionamiento para ambos humedales, haciendo la comparación de los valores obtenidos para las muestras simples con el análisis estadístico y el valor medio de las muestras compuestas.

Para cada uno de los puntos de muestreo se colocaran dos celdas para garantizar el buen funcionamiento de ambos sistemas para poder darles mantenimiento sin necesidad del paro total de la planta, se colocaran en paralelo teniendo estas las mismas características.

TABLA 27 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

DIMENSIONAMIENTO "ESCUELA "	VALOR MUESTRA SIMPLE	VALOR MUESTRA COMPUESTA
ÁREA (m <sup>2</sup> )	376.04	358.57
TRH (d)	8.31	7.93
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	188.02	179.28
ANCHO (m)	6.13	6.13
LARGO (m)	61.38	58.53
RELACIÓN LARGO/ANCHO	10	9.55
DIMENSIONAMIENTO "POTABILIZADORA "	VALOR MUESTRA PUNTUAL	VALOR MUESTRA COMPUESTA
ÁREA (m <sup>2</sup> )	116.93	135.48
TRH (d)	2.53	2.93
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	58.47	67.74

ANCHO (m)	6.09	6.09
LARGO (m)	19.19	22.24
RELACIÓN LARGO/ANCHO	3.15	3.65

De acuerdo con la tabla anterior se observa que los resultados obtenidos en el dimensionamiento con los datos de las muestras simples son similares a los obtenidos con las muestras compuestas, lo cual muestra la importancia del análisis estadístico y la representatividad de la muestra compuesta para cada día de muestreo.

En cuanto a la vegetación utilizada en el humedal, en la comunidad de El Alberto se cuenta con macrófitas ya adaptadas a la región como es el junco de agua (*Juncus acutus*), el cual es adecuado para el tipo de humedal que se tiene. Como se muestra en la figura 20.



FIGURA 21 JUNCO DE AGUA  
(*JUNCUS ACUTUS*) EN EL ALBERTO

En la figura 21 se representa un esquema del tren de tratamiento de agua residual, integrado por el pretratamiento (biodigestor Rotoplas) y el humedal.

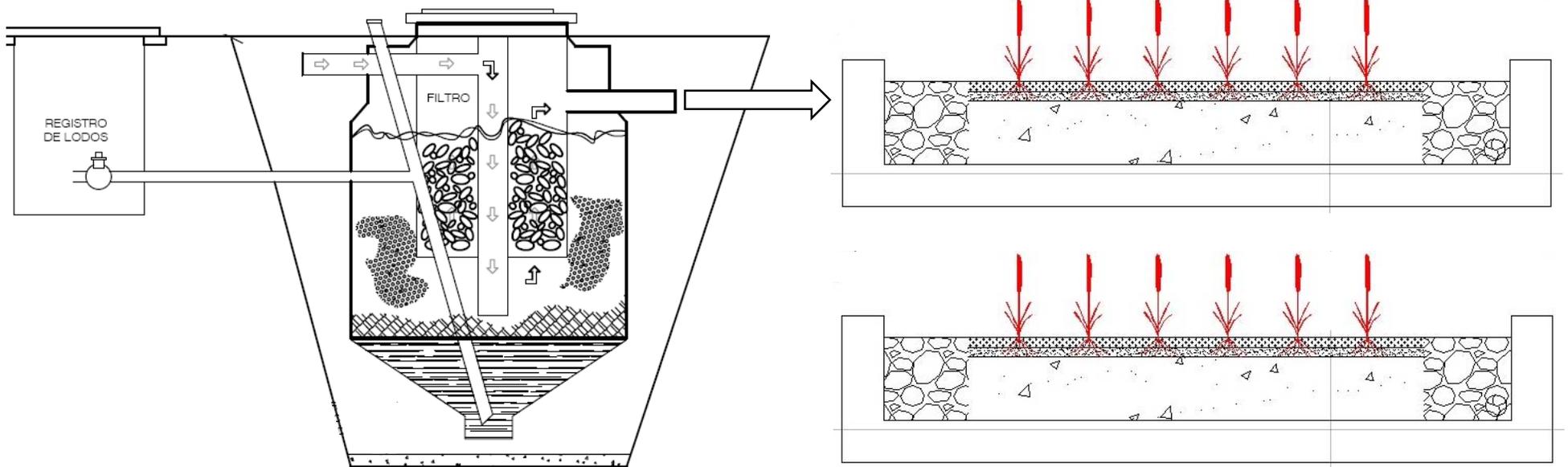


FIGURA 22 ESQUEMA DEL TREN DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

En la figura 23 se muestra un detalle de los humedales y la representación de la colocación de las dos unidades en paralelo.

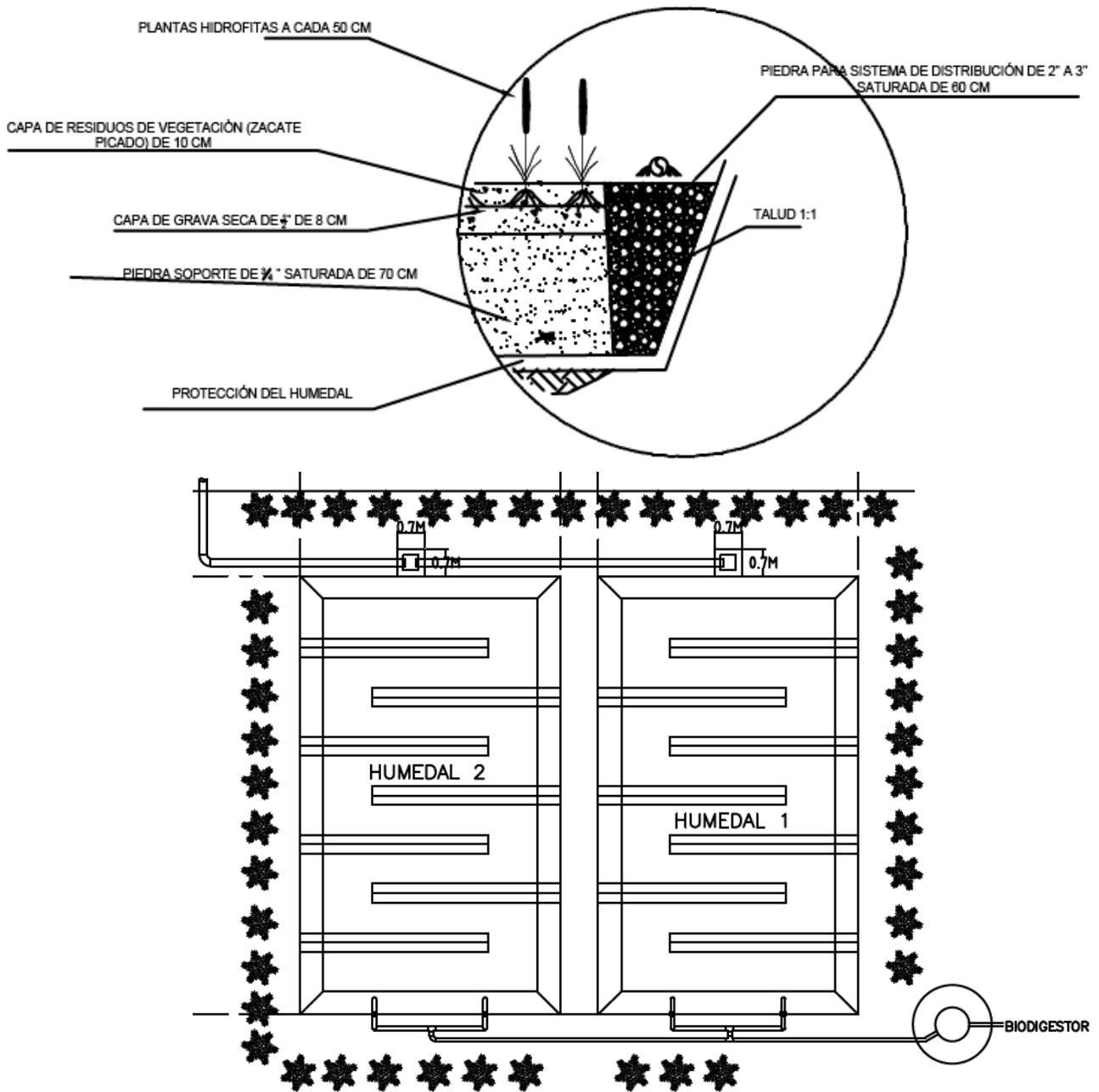


FIGURA 23 DETALLE DE LOS HUMEDALES

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se establecieron los puntos de muestreo nombrados "Escuela" y "Potabilizadora".
- Debido a la variabilidad del gasto (Q) y la concentración de los parámetros medidos es necesario considerar un pretratamiento para poder regularlos antes de la entrada al sistema de tratamiento de agua residual por medio de humedales.
- Para el diseño conceptual de los humedales en ambos casos se tiene un diseño de humedal de flujo subsuperficial, horizontal con un área de 376 m<sup>2</sup> para el punto "Escuela" y de 117 m<sup>2</sup> para "Potabilizadora".
- Los tiempos de retención hidráulica obtenidos se encuentran dentro de los intervalos reportados en la literatura con valores de 8 y 3 d para "Escuela" y "Potabilizadora" respectivamente.
- La relación largo/ancho obtenidos (10 y 3) están dentro de los reportados en la literatura con los cuales dependiendo del terreno en donde implementarán los humedales se pueden variar las dimensiones del largo y ancho siempre y cuando respetando esta relación.
- El dimensionamiento de los humedales depende directamente con la calidad del agua residual que se tiene.

A partir del conocimiento adquirido y el generado durante la elaboración de este documento se hacen las siguientes recomendaciones:

- Es necesario tener conocimiento previo del sistema de alcantarillado correspondiente al gasto de la descarga a tratar para poder tener valores más precisos a cerca del número de usuarios conectados a la red.
- Conocer los usos y costumbres de la población del sitio de estudio para no tener contratiempos y alteraciones significativas en el muestreo y por consiguiente en la caracterización del agua residual.
- Mantener involucrada a la población en el proyecto que se lleva a cabo para poder contar con su apoyo durante su realización y en el mantenimiento del mismo, teniendo así un buen funcionamiento de las plantas de tratamiento.
- Contar con el número adecuado de muestras tanto simples como compuestas para poder llevar a cabo una buena y representativa determinación de la calidad del influente.

## REFERENCIAS

- APHA, American Public Health Association. (1905). *Standar Methods for the Examination of water and wastewater*.
- Arias, I., Carlos, A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*(13), 17-24.
- Arias, O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Barcelona: Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Tesina.
- CONAGUA. (2007). *Usos del agua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014a). *Estadísticas del agua en México 2014*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014b). *Atlas del Agua en México 2014*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). *"Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. Water Resources and Environmental Engineering.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Nelson Antequera Durán.
- Diario Oficial de la Federación. (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001, determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001, determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.

- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001, determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001, determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.
- Fernández, J. (2004). *Manual de fitodepuración*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- García de Miranda, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México, D.F.: Offset Larios S.A.
- HACH . (2003). *Water Analysis Handbook*. Loveland, Colorado, U.S.A: HACH COMPANY.
- INEGI. (2010a). *Censo de Población y Vivienda*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2010b). *Volumen y crecimiento. Población total según tamaño de localidad para cada entidad federativa*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2013). *Agua potable y saneamiento. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales. Tabulados Básicos*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jiménez Cisneros, B. E., & Ramos Hernandez, J. (1999). *Reúso posible del agua residual en México*.
- Jiménez, B., & Marín, L. (2004). *El agua en México vista desde la academia*. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Kadlec, R., & Scott, W. (2009). *Treatment Wetlands* (Segunda ed.). CRC Press.
- Keddy, P. A. (2004). *Wetland Ecology*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Kolb, P. (1998). *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*. Universität für Bodenkultur: Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur.
- Lahora, A. (2003). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99-112). Almería: Instituto de Estudios Almerienses.
- Lampoglia, T., Agüero, R., & Barrios, C. (2008). *Orientaciones sobre agua y saneamiento para zonas rurales*. Asociación Servicios Educativos Rurales.

- Lara, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría*. Barcelona: Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Luna Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 32-55.
- Luna Pabello, V. M., & Ramírez Carrillo, H. F. (2009). Humedales artificiales, una ecotecnología sustentable para la depuración de aguas residuales. *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, 194-202.
- Luna Pabello, V. M., Durán de Bazúa, C., Ramírez Carrillo, H. F., Fegnolío Limón, F. E., & Sánchez García, H. (1997). Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, II(IX), 50-52.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. México: MacGraw Hill.
- Montelongo Casanova, R., Gordillo Martínez, A. J., Otazo Sánchez, E. M., Villagómez Ibarra, J. R., Acevedo Sandoval, O. A., & Prieto García, F. (2008). Modelación de la calidad del agua del río Tula, estado de Hidalgo, México. *Dyna*(154), 5-18.
- Mop FD-16. (1989). *Natural Systems for Wastewater Treatment (Manual of Practice, Fd-16)*.
- OMM/UNESCO. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Ginebra, Suiza.
- Palomino Villavicencio, B., López Pardo, G., & Betanzos Alemán, P. M. (2008). "Ecoturismo Indígena en México" Caso de estudio: La comunidad Hñahñu de El Alberto en Ixmiquilpan, Hidalgo, México. *Negotia Revista de investigación de negocios*, 4(14), 2-13.
- Rolim, S. (2000). *Sistemas de Lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.: McGraw Hill.
- SARH. (1980). *Evaluación del Impacto Ambiental del Transporte y Uso de las Aguas Residuales del Área Metropolitana del Valle de México, en la Agricultura*. México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- SEMARNAT. (2014). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México, D.F.
- Seoáñez Calvo, M. (1999). *Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño*. Mundi-Prensa.

- Shiklomanov, I. (1993). World fresh water resources. En *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. de Peter H. Gleick. New York: Oxford University Press.
- Toledo, A. (2002). El agua en Mexico y en el mundo. *Gaceta Ecológica, INE-SEMARNAT México*, 9-18.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 48-49.

# ANEXO 1 MEMORIA FOTOGRÁFICA DEL MUESTREO

## Punto de muestreo "Potabilizadora"



IMAGEN 2 TOMA DE MUESTRA



IMAGEN 1 TOMA DE MUESTRA Y MEDICIÓN DEL GASTO



IMAGEN 3 TRASVASE DE LA MUESTRA DE AGUA RESIDUAL



IMAGEN 4 TOMA DE MUESTRA PARA EL PARÁMETRO DE GRASAS Y ACEITES



IMAGEN 5 RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA DE AGUA RESIDUAL



IMAGEN 6 RECOLECCIÓN DE MUESTRA SIMPLE



IMAGEN 7 TOMA DE MUESTRA PARA EL PARÁMETRO DE COLIFORMES FECALES



IMAGEN 8 ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Punto de muestreo "Escuela"



IMAGEN 9 RECOLECCIÓN DE MUESTRA Y MEDICIÓN DE GASTO



IMAGEN 10 PUNTO DE MUESTREO



IMAGEN 11 RECOLECCIÓN DE MUESTRA SIMPLE



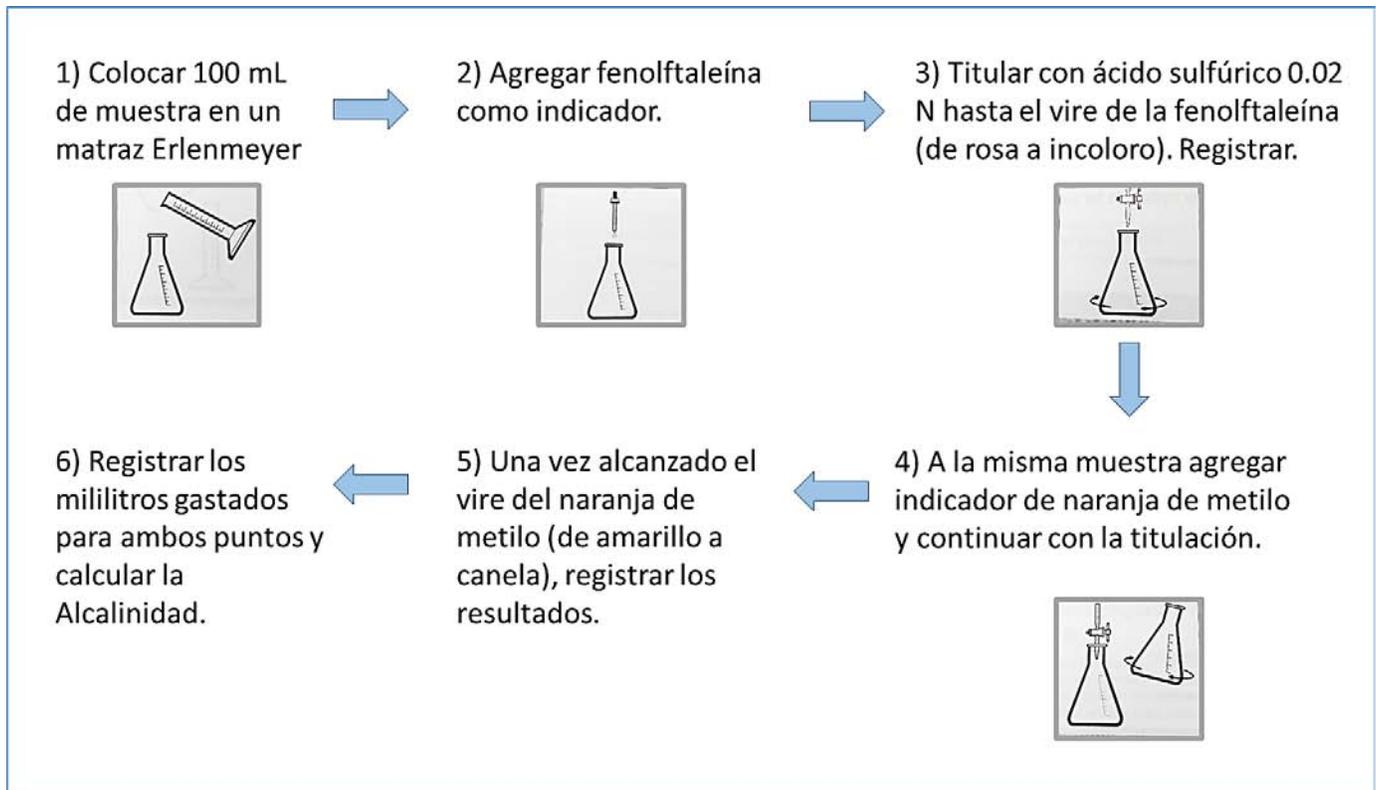
IMAGEN 12 TRASVASE DE MUESTRA DE AGUA RESIDUAL



IMAGEN 13 ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE LAS MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL

## ANEXO 2 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

### Determinación de Alcalinidad.



### **Cálculos**

Calcular la alcalinidad total como  $\text{CaCO}_3$  en mg/L, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total en mg CaCO}_3/\text{L} = \left( \frac{(A - B) \cdot N}{C} \right) \cdot 50 \cdot 1000$$

Donde:

A = volumen total gastado de ácido sulfúrico en la muestra para la titulación al vire del anaranjado de metilo, (mL)

B = volumen de ácido gastado en la muestra para la titulación del blanco, (mL)

N = normalidad de la disolución del ácido sulfúrico, (N)

C = volumen de la muestra, (mL)

50 = factor para convertir eq/L a mg  $\text{CaCO}_3$  /L

1000 = factor para convertir mL a L

### Determinación de Dureza Total.

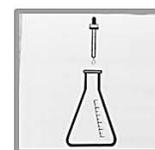
1) Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer



2) Agregar 2 mL de solución amortiguadora de amonio y verificar que el pH > 10.

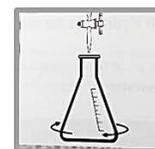


3) Agregar indicador negro de ericromo.



5) Registrar los mililitros gastados y calcular la Dureza Total.

4) Titular con EDTA 0.01 M hasta el vire del negro de ericromo (de morado a azul).

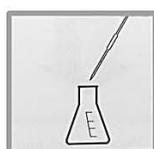


### Determinación de Dureza al Calcio.

1) Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer



2) Agregar 2 mL de NaOH 1 N y verificar que el pH este en un intervalo de 12-13.

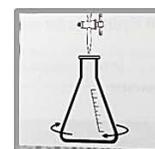


3) Agregar el indicador murexida.



5) Registrar los mililitros gastados y calcular la Dureza al Calcio.

4) Titular inmediatamente con EDTA 0.01 M hasta el vire de la murexida (de rosa a morado).



## Cálculos

- Calcular la dureza total y la dureza al calcio con la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza en mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{(A - B) \cdot C \cdot 1000}{D}$$

Donde:

A = volumen de EDTA gastado en la titulación de la muestra, (mL)

B = volumen de EDTA gastado en la titulación del blanco, (mL)

C = mg de CaCO<sub>3</sub> equivalentes a 1 mL de EDTA

D = volumen de muestra, (mL)

$$C = M \cdot P.M$$

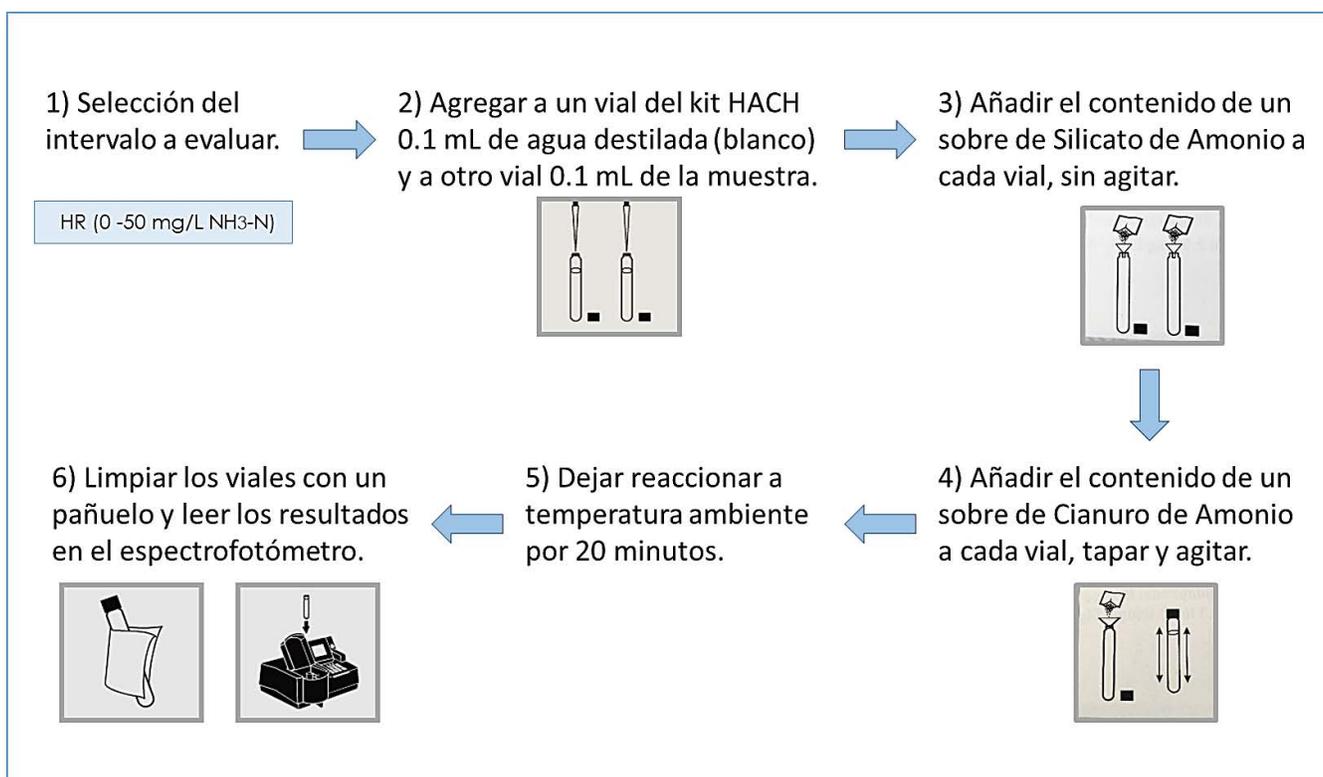
M = molaridad de la disolución de EDTA, (M)

P.M = peso molecular del CaCO<sub>3</sub>, (g/mol)

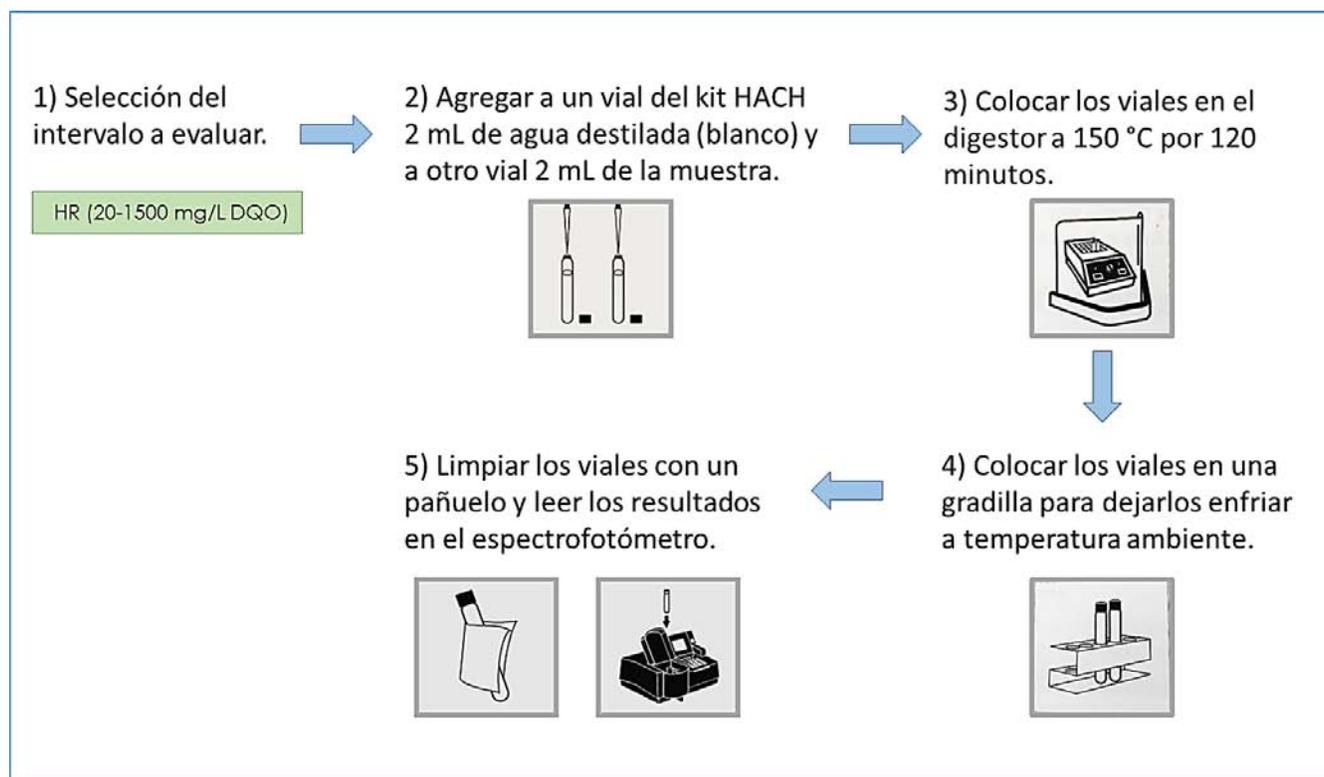
- Calcular la dureza debida al magnesio con la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza al magnesio en mg MgCO}_3/\text{L} = \text{Dureza total} - \text{Dureza al calcio}$$

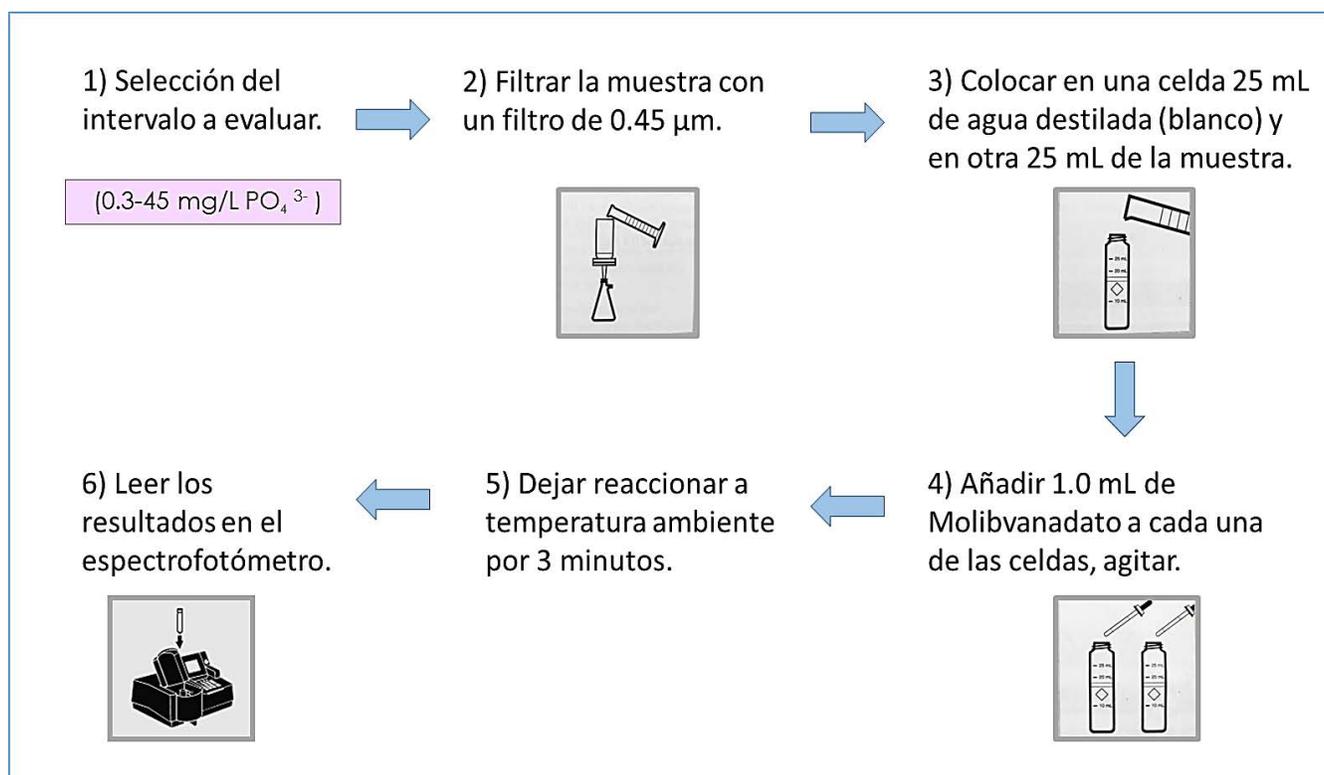
## Determinación del Nitrógeno Amoniacal.



## Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.



## Determinación de Ortofosfatos.



## Determinación del Carbono Orgánico Total.

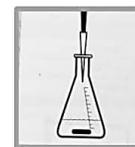
1) Selección del intervalo a evaluar.

HR (100-700 mg/L C)

2) En un matraz Erlenmeyer colocar 10 mL de agua destilada (blanco) y en otro 10 mL de la muestra.



3) Agregar a cada matraz 0.5 mL de ácido fosfórico y asegurarse que se haya alcanzado un pH de 2.



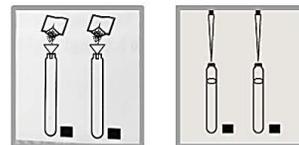
6) Colocar los viales en el digestor a 105 °C por 120 minutos, dejar enfriar y leer en el espectrofotómetro.



5) Colocar a los viales una ampolleta de azul de metileno, previamente enjuagada y una vez dentro de este se abre la ampolleta y se tapa el vial.



4) Añadir el contenido de un sobre de Persulfato a dos viales del kit HACH y agregar 0.3 mL de muestra y 0.3 mL del blanco previamente acidificados.



## Determinación de los Sólidos Suspendedos Totales.

1) Enjuagar los filtros con agua destilada y secarlos a 105 °C.



2) Colocarlos en un desecador y pesarlos, hasta peso constante (p1).



3) En función de la cantidad de sólidos probables tomar una cantidad de muestra y filtrar.



6) Determinar su peso hasta alcanzar peso constante (p2).



5) Secar y enfriar a temperatura ambiente en desecador



4) Colocar el filtro en la estufa a una temperatura de 103 a 105 °C durante 1 hora aproximadamente.



## Cálculos

Calcular los sólidos suspendidos totales con la siguiente ecuación:

$$SST \text{ en mg/L} = \frac{p_2 - p_1}{v} \cdot 1000$$

Donde:

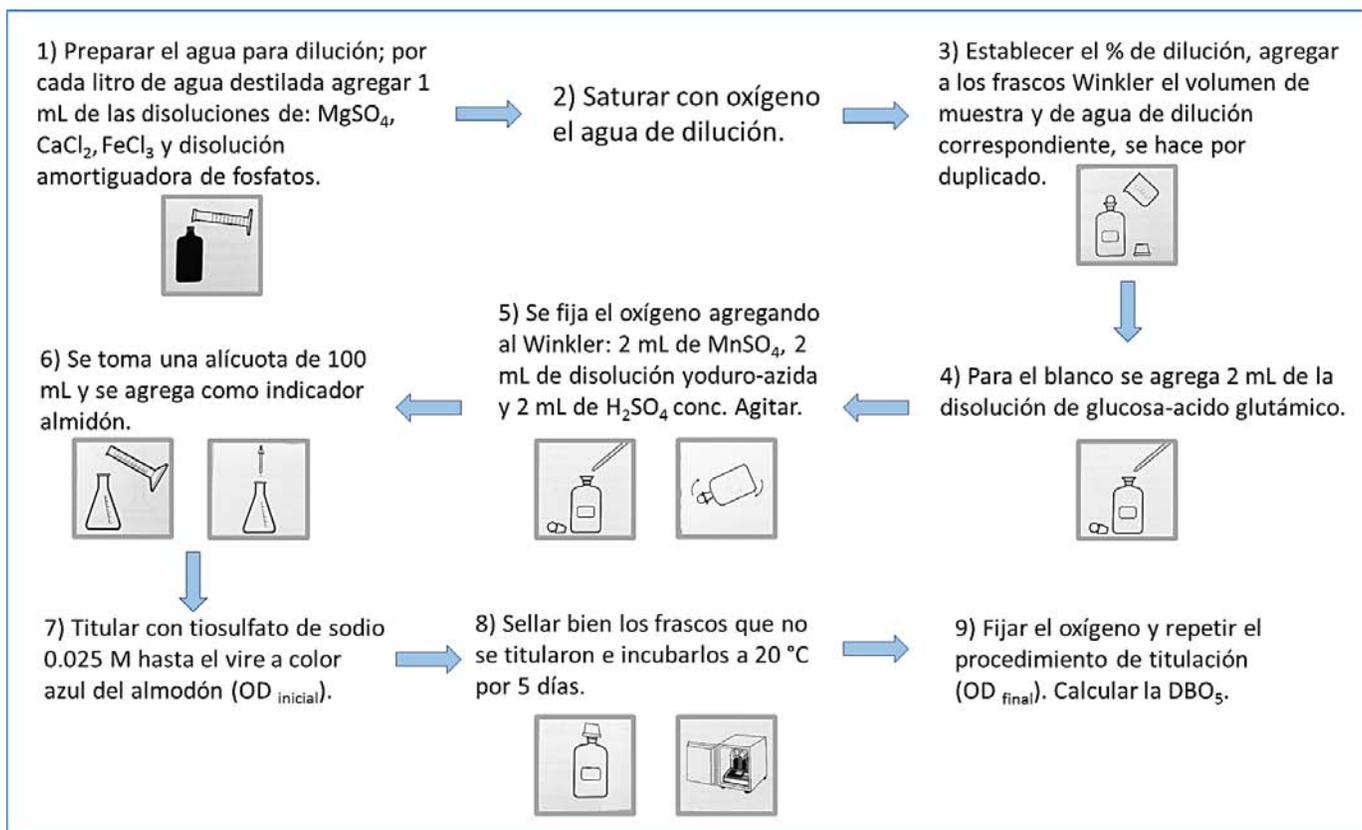
P<sub>1</sub> = peso del filtro sin muestra, (mg)

P<sub>2</sub> = peso del filtro con muestra, (mg)

v = volumen de la muestra, (mL)

1000 = factor para convertir mL en L

## Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.



## Cálculos

Calcular la DBO<sub>5</sub> con la siguiente ecuación:

$$DBO_5 \text{ en mg/L} = \frac{OD_i - OD_f}{\% \text{ de dilución}}$$

Donde:

ODi = oxígeno disuelto inicial, (mg/L)

ODf = oxígeno disuelto final, (mg/L)

% de dilución expresado en decimales

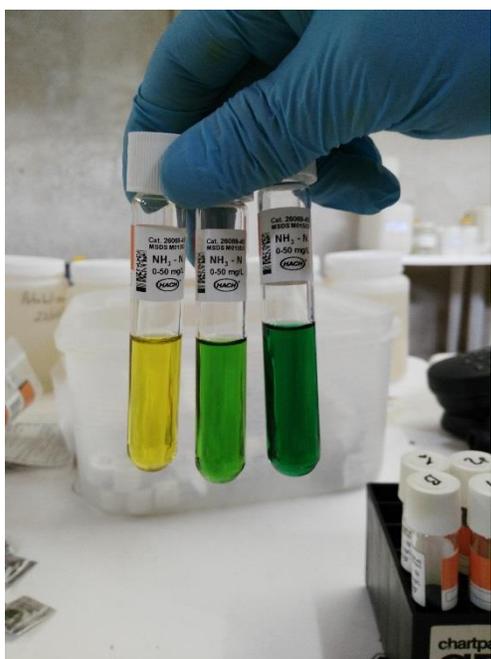
Memoria fotográfica de la caracterización del agua residual.



A) DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD



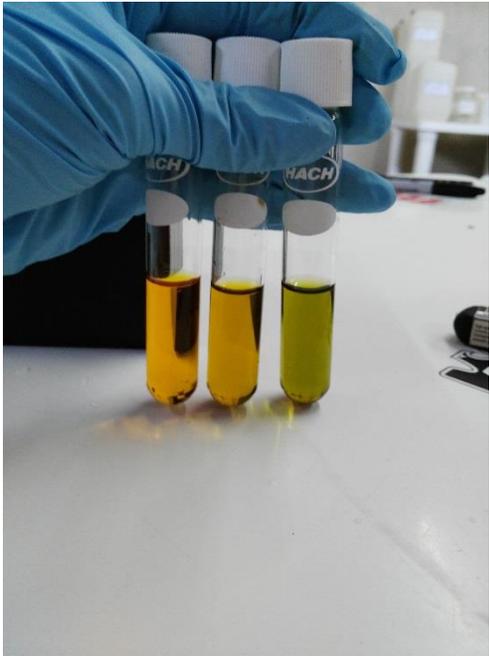
B) TITULACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD



C) COMPARACIÓN DE CONTENIDO DE NITRÓGENO AMONICAL EN LAS MUESTRAS



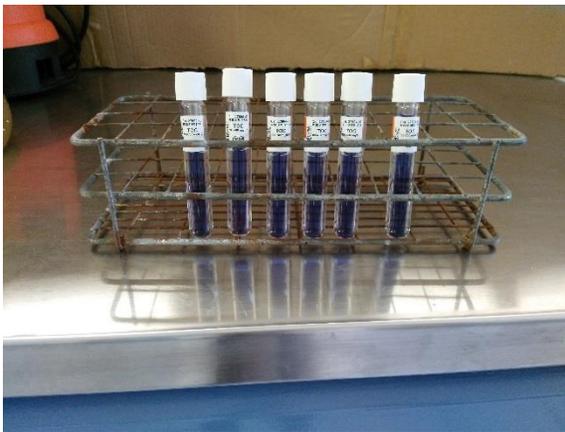
D) DETERMINACIÓN DE ORTOFOSFATOS



E) COMPARACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN DIFERENTES MUESTRAS



F) MEDICIÓN DE PARÁMETROS POR MEDIO DEL MULTIPARÁMETRO



G) DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL EN LAS MUESTRAS



H) MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



I) FILTRACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES



J) FILTROS CON SÓLIDOS, RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN



K) DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES



L) PREPARACIÓN DE FRASCOS WINKLER PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DBO<sub>5</sub>



M) FRASCO WINKLER PARA INCUBACIÓN



N) ADICIÓN DE DISOLUCIONES PARA FIJAR EL OXÍGENO DISUELTO



Ñ) DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO POR TITULACIÓN, ADICIÓN DEL INDICADOR



O) TITULACIÓN TERMINADA PARA LA DETERMINACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO

## ANEXO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó a los datos obtenidos de las muestras puntuales en la caracterización del agua residual. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para el parámetro de DQO para el punto "Potabilizadora", con los cuales se muestra el procedimiento del análisis estadístico.

Clave muestra	Hora de muestreo (h)	DQO (mg/L)
<b>FECHA DE MUESTREO 20 DE ABRIL</b>		
P20 M1	06:40	27.00
P20 M2	10:10	78.00
P20 M3	13:52	81.00
P20 M4	18:00	52.00
P20 M5	22:51	64.00
<b>FECHA DE MUESTREO 22 DE ABRIL</b>		
P22 M1	06:30	67.50
P22 M2	08:54	61.00
P22 M3	12:01	104.00
P22 M4	14:57	560.00
P22 M5	18:11	102.80
P22 M6	20:40	79.00
<b>FECHA DE MUESTREO 24 DE ABRIL</b>		
P24 M1	06:40	62.67
P24 M2	09:00	111.50
P24 M3	11:50	76.50
P24 M4	15:00	82.00
P24 M5	18:00	66.50
P24 M6	20:47	49.00

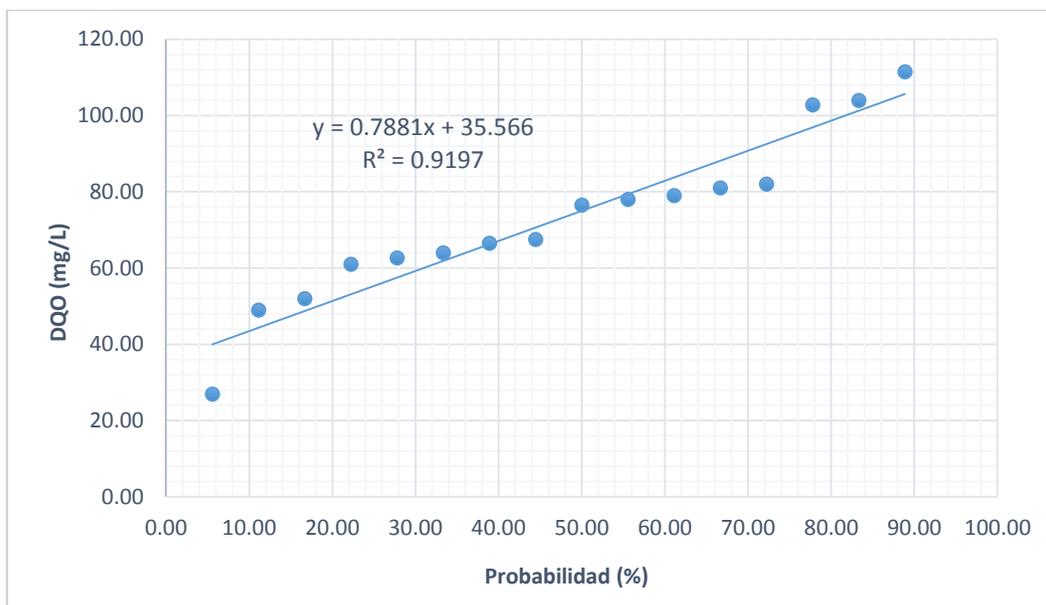
Para calcular el valor diario máximo semanal de los parámetros fue necesario:

1.- Construir una tabla de análisis para realizar la gráfica correspondiente y comprobar si los datos se ajustan a la distribución normal, con las siguientes columnas:

- a) Numeración de los datos
- b) Datos ordenados en orden creciente
- c) Probabilidad asociada,  $p = [m/(n+1)]*100$ , donde  $n$  = número total de datos y  $m$  = número de orden del dato correspondiente.

Se utiliza el valor de (n+1) en lugar de n para considerar la posibilidad que se den valores o bien superiores al máximo de los datos, o bien inferiores al mínimo de ellos.

2.- Realizar la gráfica de los valores obtenidos en la caracterización contra sus probabilidades, como se muestra en la siguiente gráfica.



3.- Añadir a la tabla de análisis las operaciones correspondientes para determinar los parámetros estadísticos, como se muestra a continuación, donde x es el dato.

Nº	Probabilidad (%)	DQO (mg/L)	(x- $\bar{x}$ )	(x- $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>	(x- $\bar{x}$ ) <sup>3</sup>	(x- $\bar{x}$ ) <sup>4</sup>
1	5.56	27.00	-74.439	5.54E+03	-4.12E+05	3.07E+07
2	11.11	49.00	-52.44	2.75E+03	-1.44E+05	7.56E+06
3	16.67	52.00	-49.44	2.44E+03	-1.21E+05	5.97E+06
4	22.22	61.00	-40.44	1.64E+03	-6.61E+04	2.67E+06
5	27.78	62.67	-38.77	1.50E+03	-5.83E+04	2.26E+06
6	33.33	64.00	-37.44	1.40E+03	-5.25E+04	1.96E+06
7	38.89	66.50	-34.94	1.22E+03	-4.27E+04	1.49E+06
8	44.44	67.50	-33.94	1.15E+03	-3.91E+04	1.33E+06
9	50.00	76.50	-24.94	6.22E+02	-1.55E+04	3.87E+05
10	55.56	78.00	-23.44	5.49E+02	-1.29E+04	3.02E+05
11	61.11	79.00	-22.44	5.04E+02	-1.13E+04	2.54E+05
12	66.67	81.00	-20.44	4.18E+02	-8.54E+03	1.75E+05
13	72.22	82.00	-19.44	3.78E+02	-7.35E+03	1.43E+05
14	77.78	102.80	1.36	1.85E+00	2.52E+00	3.43E+00
15	83.33	104.00	2.56	6.56E+00	1.68E+01	4.30E+01
16	88.89	111.50	10.06	1.01E+02	1.02E+03	1.02E+04
17	94.44	560.00	458.56	2.10E+05	9.64E+07	4.42E+10
Suma		1724.47	0.00	2.31E+05	9.54E+07	4.43E+10
n	17					

4.- Determinación de los parámetros estadísticos.

a) Media;  $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$

b) Desviación estándar;  $s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$

c) Coeficiente de simetría;  $\alpha_3 = \frac{\sum(x-\bar{x})^3/n-1}{s^3}$

d) Coeficiente de curtosis;  $\alpha_4 = \frac{\sum(x-\bar{x})^4/n-1}{s^4}$

5.- Determinación del factor de probabilidad diario semanal por medio de la ecuación: factor prob. =  $7/(7+1)*100$ , donde 7 es el número de días de la semana.

6.- Determinación gráfica del valor diario máximo semanal del parámetro DQO correspondiente al factor de probabilidad obtenido en este caso de 87.5 %, el cual puede ser calculado por medio de la ecuación de la recta de dicha gráfica.