



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE DETALLE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE UNA FOSA SÉPTICA  
ACOPLADO A UN HUMEDAL PARA FINES DE REÚSO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ISRAEL MANCILLA CASIMIRO



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

AGOSTO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

Ciudad de México, Agosto de 2016

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Tesis

**Título: INGENIERÍA DE DETALLE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE UNA FOSA SÉPTICA ACOPLADO A UN HUMEDAL PARA FINES DE REÚSO.**

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

Sustentante: Israel Mancilla Casimiro

Asesor del tema: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

## DEDICATORIA

*A Dios, porque cuando más te necesite ahí estabas Tú para ayudarme, cuando el cansancio estaba por vencerme Tú fuiste mi fuerza, mi fortaleza y mi roca. Gracias porque hoy puedo decir confiadamente: "Hasta aquí me has ayudado"*

*A mi Madre, por ser la amiga y compañera que me ha ayudado a crecer, gracias por estar siempre conmigo en todo momento. Gracias por la paciencia que has tenido para enseñarme, por el amor que me das, por tus cuidados en el tiempo que hemos vivido juntos, por los regañones que me merecía y que no entendía. Gracias Mamá por estar al pendiente durante esta etapa. Te amo.*

*A mi padre, que siempre has sido un ejemplo de fuerza, fortaleza y sobre todo amor; porque sé que siempre podré contar con tu apoyo incondicional.*

*A mis hermanos, que pareciera que nunca hubiéramos estado en paz, siempre batallando por cualquier cuestión, sin embargo siempre llegaron los momentos en los que nuestra lucha cesó e hicimos una tregua para lograr metas en conjunto. Les agradezco no solo por estar presentes aportando buenas cosas a mi vida, sino por los grandes lotes de felicidad y de diversas emociones que siempre me han causado.*

*A Diana Sandoval, que siempre estuviste conmigo en los momentos más difíciles brindando tu apoyo, tu afecto y sobre todo tu amor.*

## Agradecimientos:

A Dios

A la Facultad de Ingeniería y a los docentes de la carrera de Ingeniería Civil que me brindaron sus conocimientos y capacitaron para ser un individuo con las habilidades y capacidades para enfrentar el campo profesional.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de tesis.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería.

A la doctora Alma Chávez Mejía por su gran apoyo en la realización de esta investigación y también por brindarme su conocimiento, experiencia y confianza en la realización de la misma.

Al comité tutorial y sinodales de tesis: M.I. Héctor Sanginés García, M.I. Enrique Elizalde Romero, M.I. Cristian Emmanuel González Reyes y M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose por sus valiosas aportaciones al trabajo de investigación y por su gran disposición.

Al personal técnico y administrativo del laboratorio de mecánica de suelos "Francisco Zamora Millán", por el conocimiento y las horas dedicadas a la realización de este proyecto.

A mis compañeros de tesis: Solen Romero, Alicia Mariano, Jesica Martínez, por el apoyo y los momentos que pasamos en la realización de este proyecto.

Al Grupo de Tratamiento y Reúso (GTR), por todos los momentos que hicieron más amena la estancia en el desarrollo de este proyecto.

A la comunidad El Alberto.

Al Maestro Marcelo Rojas, por la ayuda y el conocimiento que me brindo en la estancia en la comunidad.

A Cinthia Pasindo, que en dos días se convirtió en una persona especial...

A todos y a cada uno de mis amigos y familia que ayudaron a que esta etapa fuera toda una aventura (Guadalupe Martínez, Dafne Uscanga, Noé Manríquez, Tonatiuh Calderón, Jhony Méndez, Ricardo Nava, Citlali Juárez, Toño Ruiz, Ulises Del Águila, Ernesto Pedro, AdriánNúñez, Amos González, IsaíasMartínez, Brando Suarez, Rosa Ramos, Sandra López, Héctor Muñoz, Alejandro Nieto) y todos aquellos que quizá no mencione, pero que hicieron de esta etapa, algo único. Gracias.

# INGENIERÍA DE DETALLE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE UNA FOSA SÉPTICA ACOPLADO A UN HUMEDAL PARA FINES DE REÚSO.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo proponer, mostrar y validar una alternativa basada en el uso y acondicionamiento de humedales artificiales, para resolver el problema de salud pública y contaminación ambiental que genera la descarga de agua residual. El estudio se realizó en la comunidad El Alberto, en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México, donde el agua residual sin tratar es vertida directamente al Río Tula.

Para efectuar un diseño óptimo en eficiencia y factibilidad de operación, se realizó un muestro en un punto estratégico de la localidad para así efectuar la medición de los parámetros de calidad del agua residual, así como una investigación bibliográfica detallada.

Debido a la alta variabilidad que resultó la caracterización del agua residual, se realizó un análisis estadístico a los valores obtenidos para cada parámetro utilizado en el diseño, esto con la finalidad de incluir todos los puntos y hacer un diseño adecuado, evitando el sobredimensionamiento del humedal.

Previo al diseño de la planta, se realizó un levantamiento topográfico y una caracterización del suelo donde se ubicará la planta de tratamiento, de ello se desprende que se trata de un suelo semipermeable, con buena resistencia al corte en estado compacto y saturado, baja compresibilidad en estado compacto tiene facilidad de manejo en obra que se pretende establecer.

El tren de tratamiento elegido incluyó un biodigestor que actuará como pretratamiento debido a la variabilidad del gasto y concentración así como el de regular la entrada al sistema. El tratamiento principal se constituye por un **humedal de flujo subsuperficial** para un gasto promedio de 38.9 m<sup>3</sup>/día, ocupando una superficie total de 159.43 m<sup>2</sup>. El humedal tendrá un tiempo de retención hidráulica de 3.45 días. La especie vegetal recomendada es el junco de agua (*Juncus acutus*) al ser una especie adaptada a la zona.

## ABSTRACT

This paper aims to propose, demonstrate and evaluate a wastewater treatment alternative based on the design and use of artificial wetlands. Artificial wetlands can be used solve the problems of public health and environmental pollution generated by the discharge of wastewater. The study was conducted in the El Alberto community in the city of Pachuca in Hidalgo, Mexico, where wastewater is discharged directly into the Tula River.

To achieve an optimal design in both efficiency and feasibility of operation, a detailed literature review was carried out and samples to determine influent quality were taken at a strategic point in the town.

Due to the high variability in the results from the wastewater characterization, a statistical analysis of the values obtained for each parameter was performed. The resulting data points were then used to make an appropriate design, thus avoiding oversizing the wetland.

Prior to the design of the plant, a topographic survey and soil characterization where the treatment plant, it follows that it is a soil is semi-permeable, with good resistance to cutting in compact state and saturated low will be located was made compressibility compact state has ease of handling work that is being sought.

The system was designed for a capacity of 38.9 m<sup>3</sup>/day using an area of 159.43 m<sup>2</sup>. The dising recommends the use of water rushes (*Juncus acutu*) as the plant species because it is adapted to the site conditions. In addition, the treatment train chosen includes a digester that will act as pretreatment as well as regulate waster flow into the system, thus mitigating variability in the concentration of the measured parameters.

# ÍNDICE

## Ingeniería de detalle de un sistema de tratamiento de agua residual mediante una fosa séptica acoplado a un humedal para fines de reúso.

INTRODUCCIÓN	1
Justificación	4
1.    OBJETIVOS	5
1.1.    Objetivos generales	5
1.2.    Objetivos particulares	5
1.3.    Metas	5
2.    ANTECEDENTES	6
2.1.    El agua residual en México	6
2.2.    Marco normativo en materia de agua y reúso	8
2.3.    Límites permisibles de calidad del agua	9
2.3.1.    Principales indicadores con contaminación de agua	13
2.4.    Tratamiento de agua residual	14
2.4.1.    Procesos de tratamiento	14
Proceso físicos	19
i.    Desbaste	20
ii.   Diceleración	20
iii.  Homogenización de caudales	20
iv.   Mezclado	21
v.    Floculación	21
vi.   Sedimentación	22
- Sedimentación discreta	22
- Sedimentación floculante	23
- Sedimentación zonal	24
- Sedimentación por compresión	24
vii.  Fosas sépticas como pretratamiento de agua residual	25
viii. Flotación	26
ix.   Filtración	26
Procesos biológicos	26
i.    Proceso de tratamiento aerobio	27
- Lodos activados	27
- Proceso de nitrificación	27
- Estanque de estabilización o laguna	27
- Sistema Natural construido tipo “WETLAND”	28
3.    UNIDADES QUE CONFORMAN LA PLANTA DE TRATAMIENTO PROPUESTA	29

3.1.	FOSAS SÉPTICAS COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA	29
3.1.1.	Historia	29
3.1.2.	Definición y descripción	30
3.1.3.	Unidades de la fosa séptica	30
3.1.3.1.	Trampa de grasa	31
3.1.3.2.	Tanque séptico	31
3.1.3.3.	Caja de distribución	31
3.1.3.4.	Campo de oxidación o infiltración	31
3.1.3.5.	Pozo de absorción	32
3.1.4.	Características de la fosa séptica	32
3.1.5.	Consideraciones	33
3.1.6.	Principios de diseño de una fosa séptica	34
3.1.7.	Diseño de una fosa séptica	34
3.1.8.	Consideraciones del diseño	35
	- Configuración del tanque	36
	- Integridad estructural del tanque	36
	- Prueba de permeabilidad	36
	- Tamaño del tanque	36
	- Empleo de grandes tanques sépticos	37
	- Inspección	37
3.1.9.	Mantenimiento del tanque séptico	38
3.1.10.	Fosas sépticas prefabricadas	38
3.1.11.	Biodigestores	39
3.1.12.	Recomendaciones para una mayor eficiencia en los tanques sépticos	40
3.2.	HUMEDALES	41
3.2.1.	Historia y desarrollo de los humedales	41
3.2.2.	Humedales como sistema de tratamiento	42
3.2.2.1.	Ventajas de humedales artificiales como sistema de tratamiento	43
3.2.2.2.	Diferencia entre humedales naturales y artificiales	44
3.2.3.	Utilización de humedales artificiales para tratamiento de agua residual	45
3.2.3.1.	Flujo libre	45
3.2.3.2.	Flujo subsuperficial horizontal	46
3.2.3.3.	Flujo vertical y sistemas combinados	48
3.2.3.4.	Ventajas y desventajas de los humedales con flujo libre y flujo subsuperficial	49
3.2.4.	Componentes que conforman los humedales	49
3.2.4.1.	El suelo y el medio	49
3.2.4.2.	Plantas	50
3.2.4.3.	Microorganismos que se desarrollan en los humedales	51
3.2.4.4.	Mecanismos de remoción y transformación de los constituyentes del agua residual	51
3.2.5.	Parámetros de diseño de los humedales artificiales	52
3.2.5.1.	Modelos de diseño para la remoción de la DBO	53
3.2.5.2.	Humedales construidos con flujo libre	53
3.2.5.3.	Humedales construidos con flujo subsuperficial	55
3.2.6.	Procesos de remoción de los humedales	57
3.2.7.	Remoción de los contaminantes en el tratamiento de aguas grises	60

3.2.7.1.	Remoción de nutrientes	61
4.	<b>METODOLOGÍA</b>	63
4.1.	Descripción general del sitio	63
4.2.	Localización geográfica	64
4.3.	Clima	65
4.4.	Suelo	67
4.5.	Datos poblacionales	67
	<b>PLANEACIÓN PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO</b>	
4.6.	Selección del sitio de muestreo	69
4.7.	Levantamiento topográfico	70
4.8.	Caracterización del suelo	73
4.8.1.	Análisis Granulométrico	73
4.8.2.	Cálculos y gráficos	76
4.8.3.	Permeabilidad	78
4.8.4.	Límites de consistencia	79
4.9.	Aforo y muestreo del agua residual, descarga “Potabilizadora”	81
4.10.	Composición del agua residual en el punto establecido	83
4.11.	Humedal artificial	84
5.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	86
5.1.	Resultados	86
5.1.1.	Localización del sitio	86
5.1.2.	Caracterización del suelo	87
5.1.3.	Análisis estadísticos de la calidad del agua residual y el gasto	90
5.2.	Diseño conceptual y de detalle del sistema de tratamiento	91
5.2.1.	Pretratamiento	91
5.2.2.	Sistema de tratamiento con humedales	97
5.2.3.	Establecimiento de la vegetación	106
6.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	107
6.1.	Conclusiones	107
6.2.	Recomendaciones	108
7.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	109

## Índice de Tablas

• TABLA 1. Países del mundo con mayor extracción y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público.....	1
• TABLA 2. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.....	11
• TABLA 3. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.....	12
• TABLA 4. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua residual tratada.....	13
• TABLA 5. Distancias mínimas requeridas para la ubicación del tanque séptico.....	33
• TABLA 6. Capacidad de trabajo de la fosa séptica en función del número de usuarios.....	37
• TABLA 7. Medidas estándares para fosas sépticas prefabricadas.....	39
• TABLA 8. Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales.....	51
• TABLA 9. Criterios de diseño típico de los humedales con flujo libre u la calidad de los efluentes esperados.....	54
• TABLA 10. Características de los medios empleados en los sistemas con flujo subsuperficial.....	55
• TABLA 11. Penetración de las raíces de las plantas emergentes más utilizadas en los humedales con flujo subsuperficial.....	56
• TABLA 12. Criterios típicos para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial y la calidad de los efluentes esperados.....	57
• TABLA 13. Procesos de remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	59
• TABLA 14. Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal y de flujo vertical para el tratamiento de aguas grises.....	61
• TABLA 15. Temperatura en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo.....	66
• TABLA 16. Numeración y abertura de tamices.....	73
• TABLA 17. Cantidad mínima a ensayar según tamaño de partículas.....	74
• TABLA 18. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido.....	81
• TABLA 19. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido.....	81
• TABLA 20. Frecuencia de muestreo para el proceso generador de la descarga (SEMARNAT, 1996).....	92
• TABLA 21. Resultados obtenidos en la caracterización del agua residual en muestras puntuales.....	83
• TABLA 22. Porcentaje retenido en cada malla.....	87
• TABLA 23. Resultados de la prueba de permeabilidad.....	88
• TABLA 24. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido. Resultados .....	88
• TABLA 25. Datos obtenidos en la prueba de límite plástico. Resultados.....	89
• TABLA 26. Parámetros estadísticos para el punto de muestreo.....	90
• TABLA 27. Purga de lodos y cantidad de cal para el mantenimiento anual.....	93
• TABLA 28. Parámetros de diseño del humedal y sus componentes.....	97
• TABLA 29. Parámetros para el diseño del humedal.....	97
• TABLA 30. Material filtrante.....	98
• TABLA 31. Resultados finales para el dimensionamiento del humedal.....	101

## Índice de Gráficas

- GRÁFICA 1. Caudal de agua residual municipal tratada anualmente (m<sup>3</sup>). Fuente: Realizada a partir de datos proporcionados por la CONAGUA, 2012.....7
- GRÁFICA 2. Curva granulométrica del suelo denominado “Potabilizadora”.....78
- GRÁFICA 3. Curva granulométrica del suelo denominado “PotabilizadoraResultados.....87
- GRÁFICA 4. Curva de contenido de agua vs penetración para obtener los límites líquido y plástico.....89

## Índice de Figuras

- FIGURA 1. Agua residual generada en cada región (millones de m<sup>3</sup>/año).....8
- FIGURA 2. Ejemplos de pretratamiento.....16
- FIGURA 3. Desarenador primario, ejemplo de un sistema de tratamiento primario.....16
- FIGURA 4. Vista en planta de un tanque desarenador.....17
- FIGURA 5. Fosa séptica de dos compartimientos.....18
- FIGURA 6. Esquema del funcionamiento de la Ósmosis Inversa.....19
- FIGURA 7. Sedimentación discreta o granular.....23
- FIGURA 8. Sedimentación por medio de flóculos.....23
- FIGURA 9. Sedimentación zonal.....24
- FIGURA 10. Sedimentación por compresión.....25
- FIGURA 11. Esquema de una fosa séptica de dos compartimientos.....25
- FIGURA 12. Esquema de un filtro de lecho de raíces (Humedal).....28
- FIGURA 13. Fosa Séptica moderna.....29
- FIGURA 14. Fosa séptica Foie Moura.....30
- FIGURA 15. Esquema de una fosa prefabricada.....39
- FIGURA 16. Componentes del tanque Biodigestor.....40
- FIGURA 17. Dra. Kathe Seidel. (1907 en Frankenstein; † 1990 en Krefeld).....41
- FIGURA 18. Humedal natural en Perú.....43
- FIGURA 19. Humedal Artificial.....45
- FIGURA 20. Humedal De Flujo Superficial.....46
- FIGURA 21. Sistema de flujo bajo la superficie.....47
- FIGURA 22. Proceso de depuración de los humedales artificiales.....58
- FIGURA 23. Rendimientos de remoción típicos en escala piloto, sistema tipo subsuperficial, Sidney, Australia.....58
- FIGURA 24. Localización del Valle del Mezquital en México.....63
- FIGURA 25. Ubicación de la comunidad El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México.....65
- FIGURA 26. Clima en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México.....66
- FIGURA 27. Localización del punto de muestreo.....70

- FIGURA 28. Sitio de aforo.....70
- FIGURA 29. Marcación del terreno con hilo y estacas.....71
- FIGURA 30. Primer Levantamiento para la planta de tratamiento.....72
- FIGURA 31. Segundo terreno, sitio donde se ubicará la planta de tratamiento.....72
- FIGURA 32. Muestra de suelo a utilizar para obtener la granulometría del suelo.....75
- FIGURA 33. Juego de mallas.....75
- FIGURA 34. Colocación del material sobre el juego de mallas.....75
- FIGURA 35. Vibrado del material.....76
- FIGURA 36. Permeámetro utilizado en el laboratorio.....79
- FIGURA 37. Aforo en el sitio.....82
- FIGURA 38. Muestreo en el sitio de descarga.....83
- FIGURA 39. Localización del sitio.....86
- FIGURA 40. Partes del Biodigestor.....92
- FIGURA 41. Funcionamiento del biodigestor.....93
- FIGURA 42. Registro de Lodos.....93
- FIGURA 43. Mantenimiento del Biodigestor.....94
- FIGURA 44. Esquema y componentes del Biodigestor.....95
- FIGURA 45. Esquema y medidas del biodigestor.....96
- FIGURA 46. Plata de tratamiento en el terreno disponible.....102
- FIGURA 47. Detalle de los humedales para el sistema de tratamiento.....103
- FIGURA 48. Corte A-A' del sistema de humedales.....104
- FIGURA 49. Detalle de la tubería a usar.....104
- FIGURA 50. Detalle 1.....105
- FIGURA 51. Detalle 2.....105
- FIGURA 52. Junco de agua (Juncus Acutus). Planta que se utilizará en el sistema de tratamiento.....106

## INTRODUCCIÓN

México posee una población aproximada de 112 millones habitantes y una tasa de crecimiento de 1.8 %, INEGI (2010). El agua en México es una cuestión importante como en muchos otros países ya que es imprescindible para que exista la vida, no solo porque es parte de la composición de su estructura molecular, sino también por la innumerable cantidad de procesos y reacciones químicas, biológicas y físicas en las que participa. El crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento en el consumo de agua en los hogares, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso global del agua. Este desarrollo conduce a la escasez y perjudica gravemente el avance hacia el mañana.

El rápido crecimiento de la población mundial está convirtiendo el agua en un bien cada vez máspreciado y escaso. De hecho, tan sólo tres países consumen el 38% de los recursos hídricos disponibles en el planeta.

China, India y EEUU encabezan el ranking mundial que calcula la huella hídrica de cada nación, una medida que estima el volumen total de agua consumida por el hombre para producir bienes y servicios. En la tabla1 se muestran los países del mundo con mayor extracción de agua, donde México se ubica en el octavo lugar según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2008.).

**Tabla 1. Países del mundo con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público.**

**Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2008.**

No	País	Extracción total de agua (Km3/año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
1	India	76.10	90.4	2.23	7.4
2	China	554.1	64.6	32.21	12.2
3	Estados Unidos	478.4	40.2	46.11	13.7
4	Pakistán	183.5	94.0	0.76	5.3
5	Irán	93.3	92.2	1.18	6.6
6	Japón	88.4	62.5	17.87	19.7
7	Indonesia	82.8	91.3	0.68	8.0
8	México	80.6	76.7	9.20	14.1
9	Filipinas	78.9	83.1	9.45	7.4
10	Vietnam	71.4	68.1	24.14	7.8
11	Egipto	68.3	86.4	5.86	7.8
12	Rusia	66.2	19.9	59.82	20.2
13	Iraq	66.0	78.8	14.70	6.5
14	Brasil	59.3	61.8	17.96	20.3
15	Uzbekistán	58.3	93.2	2.06	4.7

**Tabla 1. Países del mundo con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público.**

**Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2008.**

No	País	Extracción total de agua (Km <sup>3</sup> /año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
16	Tailandia	57.3	90.4	4.85	4.8
17	Canadá	46.0	11.8	68.68	19.6
18	Italia	44.4	45.1	36.71	18.2
19	Turquía	40.1	73.8	10.72	15.5
20	Francia	40.0	9.8	74.47	15.7

El agua se emplea de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. Disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar en general (CONAGUA, 2010).

A pesar de esta condición, los usuarios del agua y demás actores involucrados en el sector, siguen satisfaciendo sus necesidades sin pensar el impacto sobre los demás. Las diferentes actividades productivas al generar diversos desechos, son algunas de las principales fuentes de contaminación en los diferentes cuerpos de agua. La descarga directa a cuerpos de agua del agua residual generada en éstas actividades, limita el uso del recurso para los diferentes usos productivos como el riego, pesca o agricultura.

El tratamiento del agua residual es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y calidad de vida, al mismo tiempo se podrá hacer un reúso de la misma.

En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y personal capacitado, solo el 44.76% del agua residual (89.46 m<sup>3</sup>/s) recibe un tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración (CONAGUA, 2012).

En las comunidades rurales y marginadas (enfoque de este estudio) las enfermedades gastrointestinales se generan principalmente a causa de partículas de heces fecales humanas transportadas por el viento y por escurrimientos pluviales, estas infecciones podrían disminuir asegurando la cantidad y calidad del agua entubada, así como una disposición adecuada de excretas. (CONAGUA, 2012)

Una limitante para proporcionar servicios de saneamiento en este tipo de medios, es la falta de instalación de tecnología de bajo costo que esté acorde con las condiciones económicas de la población y que garantice agua de mejor calidad para el consumo humano y tratamiento del agua residual que genere; además debe considerarse que, la tecnología debe ser accesible desde el punto de vista sociocultural (usos y costumbres de la población).

Para la selección de la tecnología de saneamiento para comunidades rurales, es importante considerar criterios como:

- Accesibilidad a nivel sociocultural de la población y efectiva, que remueva en forma considerable el problema sanitario.
- El costo por instalación y operación del sistema debe ser bajo comparado a otros sistemas de tratamiento, el
- Consumo de agua de las opciones de saneamiento sea el mínimo necesario y que el consumo de agua de las opciones debe además,
- Garantizar un mejoramiento en las condiciones ambientales de la localidad

Ante ello, las tecnologías de saneamiento a bajo costo, como fosas sépticas como unidad de pre-tratamiento, y los humedales artificiales, como unidades de tratamiento principal, son opciones viables que permiten disminuir los riesgos a la salud y mejorar el bienestar social de la población y el ambiente.

Ello debido a que la fosa séptica suele ser una opción adecuada cuando en la región no es posible conectarse a una red de saneamiento, ya sea porque no existe o bien porque su conexión no es viable desde el punto de vista económico. Mientras que la conservación y manejo sustentable de los humedales puede asegurar la riqueza biológica y los servicios ambientales que éstos prestan, tales como: almacenamiento de agua, conservación de los acuíferos, purificación de agua a través de la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes; protección contra tormentas y mitigación de inundaciones; estabilización de litorales y control de la erosión.

La comunidad de EL Alberto en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, es una comunidad 100% rural que tiene una población aproximada de 800 habitantes (INEGI, 2010). El 98% de la población cuenta con agua entubada pero un porcentaje del 27% no dispone de drenaje y sólo el 11% de la gente que no dispone de drenaje, utiliza fosas sépticas como sistema de tratamiento de agua residual (INEGI, 2010). Estas descargas van directamente al Río Tula, que es un río muy contaminado, por lo cual se requiere un sistema de tratamiento que ayude a mejorar la calidad del agua que se descarga y cumplir con la NOM 001 SEMARNAT-1997 y poder darle un reúso dentro de la comunidad en servicios públicos según lo establecido en la NOM-003- Semarnat-1997.

Es por eso que en este proyecto se planteó como objetivo diseñar el “tratamiento del agua residual domestica que genera la comunidad El Alberto, con una fosa séptica como pretratamiento y un humedal artificial”

## JUSTIFICACIÓN

El agua, además de apuntalar el desarrollo económico y social de la comunidad internacional, es parte fundamental del equilibrio y evolución de los ecosistemas naturales, transformando esta relación bilateral entre el agua y medio ambiente, en un problema de trascendencia para la subsistencia del ser humano en sus asentamientos.

El agua residual de un núcleo urbano, están constituidos fundamentalmente por las aguas de abastecimiento después de haber pasado por las diversas actividades de una población. Estos desechos líquidos, se componen esencialmente de agua con contenido de sólidos orgánicos e inorgánicos. Si estas aguas no se manejan adecuadamente, generan impactos ambientales adversos en el medio.

A pesar del interés y preocupación por la problemática, en la actualidad las fuentes de información y acceso a ellas son pocas y limitadas.

Gracias al apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), reconociendo que los ecosistemas no obedecen fronteras políticas sino más bien se extienden a través de los límites de estados, provincias y países, y que las inversiones individuales realizadas por cada país pueden rendir frutos mucho mayores si se cuenta con un sentido compartido de responsabilidad y resguardo del medio ambiente en toda América del Norte, las Partes establecieron en 2010, mediante la CCA, un programa de subvenciones: la Alianza de América del Norte para la Acción Comunitaria Ambiental (NAPECA, por sus siglas en inglés). Este programa se propone apoyar un conjunto flexible y diverso de proyectos que mejorarán el acceso de organizaciones más pequeñas y con trabajo práctico a recursos provistos por las Partes —vía la CCA—, formando alianzas comunitarias cuya atención se centre en el tema “Comunidades sustentables e iniciativas urbanas”.

Considerando que la comunidad El Alberto tiene como prioridad el seguir apoyando el crecimiento económico, se propone elaborar el proyecto ejecutivo de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) con el simple objetivo de mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la localidad, además de crear conciencia entre la población de la zona, dándole importancia al tema de la contaminación del agua.

# I. OBJETIVOS

## 1.1. OBJETIVO GENERAL

Elaboración de un proyecto ejecutivo en la comunidad El Alberto, que sea viable, económico y funcional a las necesidades reales de la localidad y proponer el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales constituido por una fosa séptica acoplada a un humedal artificial.

## 1.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- ✓ Establecer un plan de saneamiento del agua residual generada por los habitantes de la comunidad El Alberto para evitar su exposición del agua residual al medio ambiente
- ✓ Reducir la contaminación del principal cuerpo receptor “Río Tula” y de los mantos acuíferos de la zona
- ✓ Contribuir con el saneamiento de los suelos contaminados que se localizan en las inmediaciones de la localidad
- ✓ Disminuir la incidencia de enfermedades gastrointestinales de los habitantes de la localidad por el contacto directo del agua residual
- ✓ Promover el reúso de agua residual entre los habitantes de la comunidad y los turistas de la zona, dado que es un “Parque Ecológico”

## 1.3. METAS

- ✓ Diseñar de manera conceptual y de detalle humedales artificiales de 160 m<sup>2</sup> de superficie y con un gasto de 79 m<sup>3</sup>/día.
- ✓ Cumplir con la normatividad oficial de descarga y/o reúso de agua residual
- ✓ Reusar el agua residual tratada de los humedales en riego agrícola
- ✓ Dar a conocer a las comunidades aledañas el proyecto sustentable y dejarles ver que es una opción viable para el manejo del agua residual.

## 2. ANTECEDENTES

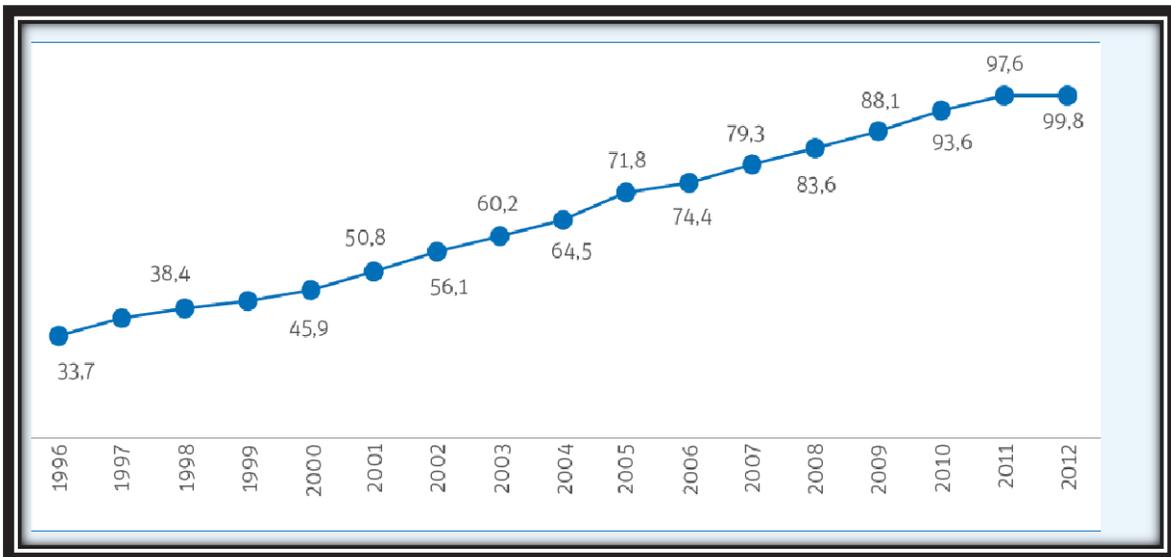
### 2.1 EL AGUA RESIDUAL EN MÉXICO

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión. El crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento en el consumo de agua en los hogares, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso global del agua.

A pesar de esta condición, los usuarios del agua y demás actores involucrados en el sector, siguen satisfaciendo sus necesidades sin tomar en cuenta lo que ello pueda impactar sobre los demás o sobre las generaciones futuras. Las diferentes actividades productivas (minería, agricultura, ganadería, etc.), al generar desechos diversos, son las fuentes principales de contaminación de los cuerpos de agua; lo que se traduce en la desaparición de la vegetación natural, así como en la muerte de peces y demás animales acuáticos modificando de esta manera el medio ambiente. Por otra parte, la descarga directa a cuerpos del agua residual generada en dichas actividades, limita el uso del recurso para los diferentes usos productivos como el riego o la pesca y la agricultura; el consumo (agua potable) y recreación de contacto. En resumen, la falta de coordinación entre usuarios y autoridades, aunado a la falta de un adecuado tratamiento y reúso del agua residual generada; conducen a la sobre explotación del recurso, la contaminación de ecosistemas, la degradación de los suelos y a un impacto negativo sobre la seguridad alimentaria. Ante esta problemática, el saneamiento de la misma adquiere más importancia para asegurar su recolección, conducción, tratamiento y adecuada disposición en los cuerpos receptores, en condiciones que no perjudiquen al medio ambiente y la salud de la población. (Banco Interamericano de Desarrollo, BID, 2012).

De hecho, el tratamiento de agua residual se ha convertido en una prioridad dentro de las agendas políticas en México. De acuerdo con la CONAGUA (2012) en el sexenio 2000-2006 se lograron avances importantes al incrementar el porcentaje de agua tratada de 23% a 36.1%.

En este mismo sentido, de acuerdo a los objetivos planteados en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012, el caudal de agua residual tratado se incrementó en 11.4%, llegando a un 47.5%, lo que representa un caudal tratado de 99.8 m<sup>3</sup>/s, con lo que se logró duplicar la cobertura del año 2000 al 2012 (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013) tal y como se esquematiza en la gráfica 1.



Gráfica 1. Caudal de agua residual municipal tratada anualmente (m³). Fuente: elaboración propia realizada a partir de datos proporcionados por la CONAGUA, 2012.

La región del Valle de México está formada por 100 municipios ubicados en los Estados de México, Hidalgo y Tlaxcala, y las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal, hoy Ciudad de México.

De acuerdo al censo de población del 2010, la zona cuenta con más de 20 millones de habitantes, lo cual convierte en la más poblada de todo el país, contando con la menor extensión territorial y por lo tanto cuenta con la mayor densidad de población media nacional. La concentración de la población es principalmente urbana con 95%: y representa el 100% de la población del Distrito Federal, 6.4% de Hidalgo, 51.2% del Estado de México y el 0.34% de Tlaxcala (INEGI, 2010).

La cobertura de agua potable y alcantarillado es del 96.5% y 97.2% respectivamente, ambas por arriba del promedio nacional (89 %, INEGI 2010), pero los niveles de cobertura de tratamiento de agua residual apenas alcanza el 11.3 % y se incrementará a un 30% cuando entre en operación la Planta de Tratamiento Atotonilco con capacidad de 35 m³/s, 23 m³/s en promedio y 12 m³/s adicionales en temporada de lluvias (CONAGUA, 2013).

La producción de agua residual en el Valle de México asciende a 1,255.8 millones de metros cúbicos al año (1, 255.8, 000, 000 m³). La capacidad instalada de tratamiento de aguas urbanas es de 8,655 l/s y solamente se procesan 4,353 l/s. Para tratamiento industrial se tiene instalada una capacidad de 1,297 l/s de los cuales se tratan 851 l/s. En la Figura 1 se muestra el volumen de agua residual generada en cada Estado.



Figura 1. Agua residual generada en cada región (millones de m<sup>3</sup>/año). Fuente: CONAGUA 2009.

## 2.2 MARCO NORMATIVO EN MATERIA DE AGUA Y REÚSO

La preocupación por las descargas de agua residual y sus efectos al medio ambiente ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero de 1988 y la Ley de Aguas Nacionales publicada el 1 de diciembre de 1992, que establecen la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos.

En este mismo sentido, al inicio de cada nueva administración del Gobierno en México, se formula un Programa Nacional Hídrico alineado al Plan Nacional de Desarrollo, el Programa Nacional de Infraestructura, y demás programas que busquen la preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos.

Los beneficios de contar con agua de calidad son innumerables, por esta razón, en México se ha creado un marco normativo que se encarga de regular las descargas de agua residual a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas:

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.

- 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 públicos. Publicada el 21 de septiembre de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2001, que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.
- 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”.

Durante el periodo 2001-2006, en relación con el tratamiento de agua residual, se planteó la necesidad de elevar el nivel de cobertura a fin de restaurar la calidad del agua en las corrientes y acuíferos del país. En dicho sexenio y dentro de la iniciativa de fomento a la ampliación de la cobertura y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, se estableció como meta alcanzar el 36% de tratamiento del agua residual recolectada en las redes de alcantarillado para 2006, lo cual significaba incrementar la cobertura de tratamiento en más de 13 puntos porcentuales; situación que se alcanzó satisfactoriamente, alcanzando un 36.1% para ese año.

A partir de ello, se fomentó el desarrollo de instrumentos legales, económicos y tecnológicos que favorecieron y estimularon el reúso del agua residual tratada, específicamente en aquellas actividades en las que no se requiere agua de primer uso. Más adelante, en el marco de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, el Gobierno de México se comprometió a lograr una cobertura de tratamiento del 60% del volumen total de agua residual colectada en los sistemas de alcantarillado del país, lo que plasmó en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012.

## 2.3 LÍMITES PERMIRSIBLES EN CALIDAD DEL AGUA

### Especificaciones NOM-001

Esta norma oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de agua provenientes de drenajes separados de agua pluvial.

- a. La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de agua residual a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en las tablas 2 y 3 de esta Norma Oficial Mexicana. El rango permisible del potencial de hidrogeno (pH) es de 5 a 10.

- b. Para determinar la concentración por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de agua residual vertida a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.
- c. Para determinar la contaminación por parásitos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos por litro para riego no restringido.

**Tabla 2. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996**

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS														
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				SUELO			
	Uso en riego Agrícola (A)		Usos Público Urbano(B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego Agrícola (B)		Usos Público Urbano(C)		Uso en riego Agrícola (A)		Humedales Naturales (B)	
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites(2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	150	200	N.A.	N.A.	75	150
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Tabla 3. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS														
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales Naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	0.1	3	1	2	1	2	2	3	1	2	2	3	1	2
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
(*) Medidos de manera total														

P.D.= promedio Diario; P.M.= promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

- Especificaciones NOM-003

- a. Los límites máximos permisibles de contaminantes en agua residual tratada son los establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua residual tratada. Fuente: Norma Oficial Mexicana.NOM-003.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES					
TIPO DE REÚSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100ml	Huevos de Hemintos (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO5 mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCACIONAL	1.00	≤5	15	30	30

- b. La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada.
- c. El agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola.
- d. Las entidades públicas responsables del tratamiento del agua residual que reúsen en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de la agua residual tratada en los términos de la presente Norma Oficial Mexicana y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente.

### 2.3.1. PRINCIPALES INDICADORES CON CONTAMINACIÓN DE AGUA

Hay varios tipos de contaminantes que, cada vez con mayor frecuencia y en mayor cantidad, se encuentran presentes en el agua considerada como potable:

- *Absorbentes de oxígeno*

Los cuerpos de agua tienen microorganismos. Estos incluyen organismos aerobios y anaerobios. Cuando mucha materia biodegradable (cosas que fácilmente se descomponen) termina en el agua, se estimula el crecimiento de microorganismos y utiliza más oxígeno. Si el oxígeno se agota, los organismos aerobios mueren y los

anaerobios se reproducen para producir toxinas nocivas tales como amoníaco y sulfuros.

- *Contaminación microbiológica*

En muchas comunidades del mundo, la gente bebe agua sin tratar (directamente de un río o arroyo). A veces existe contaminación natural causada por microorganismos como virus, bacterias y protozoos. Esta contaminación natural puede causar la muerte de peces y otras especies. También puede causar enfermedades graves para las personas que beben de esas aguas.

- *Materia suspendida*

Algunos contaminantes (partículas y sustancias químicas) no se disuelven fácilmente en el agua. Estos incluyen productos químicos que se utilizan para controlar las malas hierbas, los insectos y plagas. Los metales y solventes de industrias pueden contaminar los cuerpos de agua. Estos son venenosos para muchas formas de vida acuática y puede retrasar su desarrollo, haciéndolos estériles y matándolos.

- *Contaminantes por nutrientes*

Algunas aguas residuales, fertilizantes y aguas de alcantarillado, contienen altos niveles de nutrientes. Si terminan en los cuerpos de agua, estimulan el crecimiento de algas y malezas en el agua. Esto hace que el agua no sea potable e incluso obstruye los filtros. Si un exceso de algas usará todo el oxígeno en el agua y muchos organismos acuáticos morirán.

## **2.4 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

### **2.4.1 PROCESOS DE TRATAMIENTO**

En Ingeniería ambiental el término *tratamiento de agua* es referida al conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de los contaminantes, así como las características no deseables del agua, bien sean naturales, de abastamiento, de proceso o residuales llamadas, en el caso de las urbanas, aguas negras.

El agua residual (o servida) proviene de actividades industriales o agrícolas, instituciones, locales comerciales y del uso doméstico. Algunos autores hacen una diferencia entre agua servida y agua residual en el sentido que las primeras sólo provienen del uso doméstico y las segundas corresponden a la mezcla de agua doméstica e industrial.

El agua residual, por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no puede ser vertida sin previo tratamiento en lagos o corrientes convencionales (bienes nacionales). Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos y químicos; sin embargo, si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica, el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que

oxidan y convierten la materia orgánica en CO<sub>2</sub>, es por esto que el tratamiento del agua de desecho son procesos en los cuales los microorganismos juegan un papel importante.

El tratamiento del agua residual es un proceso complejo, exige un importante esfuerzo para la evolución de las necesidades de depuración, tales como la caracterización del agua residual. Esto último se logra a partir de diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales se incluyen la determinación del contenido de sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y el pH.

La potabilización o tratamiento de agua cobró importancia progresivamente desde principios de las década de 1970 como resultado de la preocupación general expresada en todo el mundo sobre el problema, cada vez mayor, de la contaminación humana del medio ambiente, desde el aire a los ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas, por los desperdicios domésticos, industriales, municipales y agrícolas.

Puede decirse que solamente a partir de la década de los 60's, términos tales como contaminación del aire y del agua, protección del medio ambiente, ecología, etcétera; pasaron a ser palabras de uso común. Antes de estas fechas estos términos pasaron desapercibidos para el ciudadano medio y en general únicamente representaban ideas confusas.

La contaminación es un problema serio y es por supuesto deseable que el ciudadano sea consciente de ello, además de que el hombre está equipado para corregir el deterioro del medio ambiente antes de que sea demasiado tarde. De hecho, la corrección de la contaminación no es un problema técnico de gran dificultad comparado con otros, muchos más complejos, resueltos con éxito en décadas recientes, tal como la exploración de la superficie de la Luna por el hombre. Esencialmente, el conocimiento técnico básico requerido para resolver el problema de la contaminación está ya a disposición del hombre y, en la medida en que quiera pagar un precio razonable por conseguirlo, la pesadilla de la destrucción a través de la contaminación nunca se hará realidad. De hecho precios muy superiores han sido pagados por la humanidad para desarrollar y mantener toda la maquinaria de guerra y armamento.

Puede considerarse que solamente en los últimos años el diseño de las plantas de tratamiento de agua residual ha evolucionado de ser meramente empírico a tener una sólida base científica. Además, la investigación fundamental de nuevos procesos de tratamiento tales como osmosis inversa y electrodiálisis sólo recientemente se han convertido en algo verdaderamente accesible.

A continuación se describen los niveles de tratamiento en una planta de tratamiento de agua residual: primario, secundario y terciario.

### ***Pretratamiento***

El agua residual es conducida por la red de alcantarillado hasta la estación depuradora de agua residual. En este momento empieza el pretratamiento, que consta de varias etapas: desbaste, desarenado, desengrase, etc.

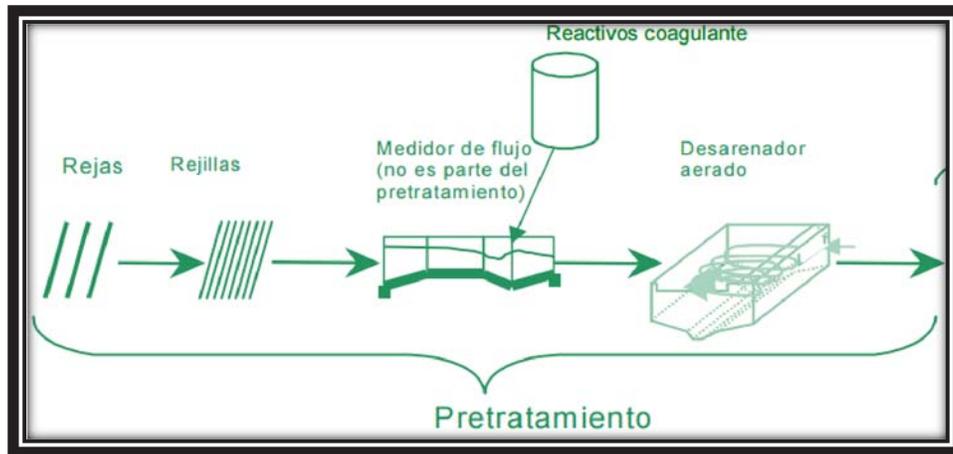


Figura 2. Ejemplos de pretratamiento. Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1990.

**Tratamiento primario**

El objetivo de este tratamiento, es la reducción del contenido de sólidos en suspensión del agua residual. Nuevamente, en este proceso podemos distinguir varias operaciones como la decantación, coagulación, floculación, neutralización, etc. En las figuras 3 y 4 se muestra un ejemplo del tratamiento primario, desarenador.

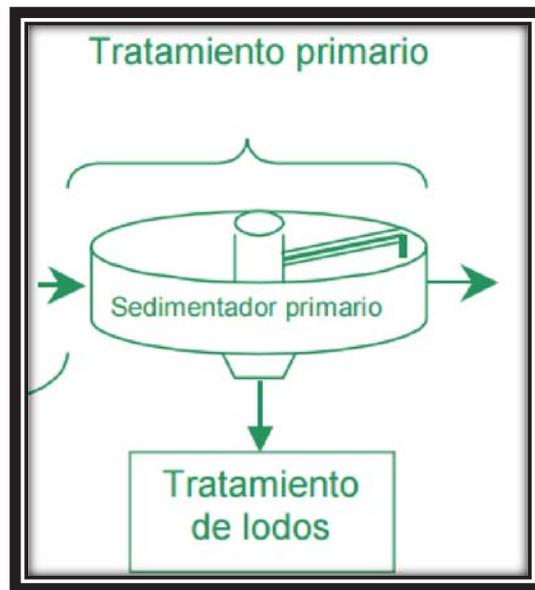


Figura 3. Desarenador primario, ejemplo de un sistema de tratamiento primario. Fuente: Noyola et al, 2000)

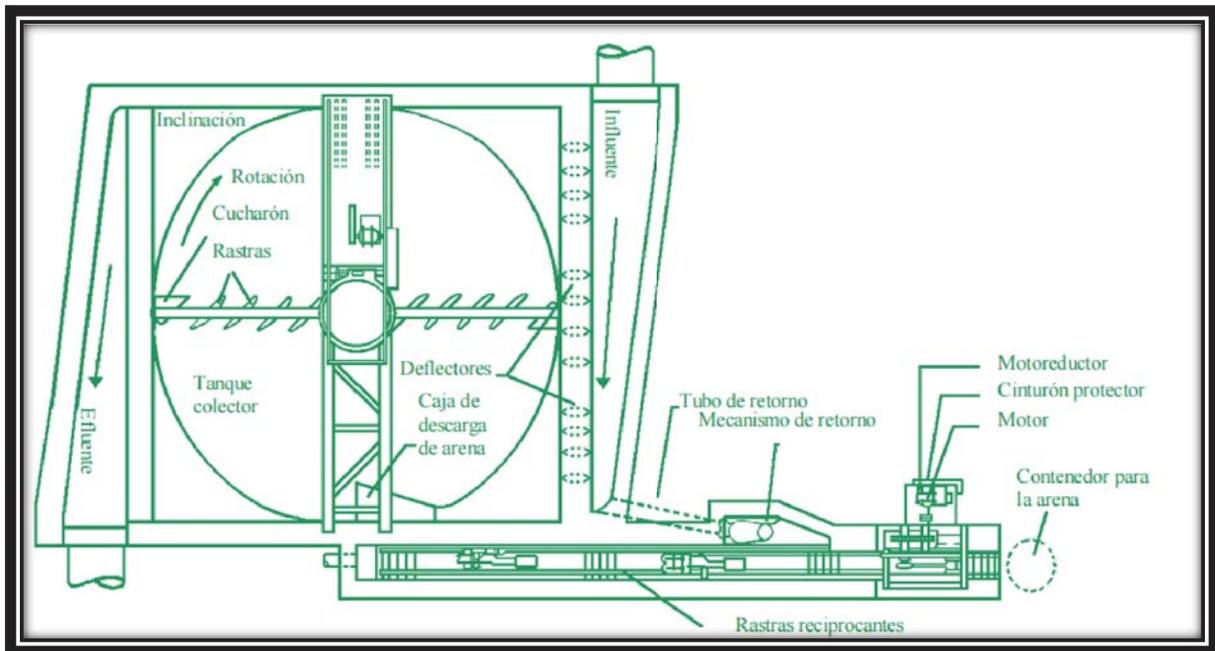


Figura 4. Vista en planta de un tanque desarenador. Fuente: Noyola et al, 2000

### ***Tratamiento biológico o secundario***

El agua decantada y homogenizada en el tratamiento primario pasa a un sistema, donde será sometida a la acción de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos), que se alimentan de las sustancias orgánicas que quedan en disolución en el agua residual. En este proceso, los compuestos orgánicos complejos son convertidos en compuestos simples, y la demanda de oxígeno disminuye.

El desarrollo de este proceso de tratamiento está influenciado por dos factores principales:

- La magnitud de la superficie de contacto entre el agua residual y los microorganismos que digieren la materia orgánica.
- La aportación de oxígeno, con el fin de favorecer el desarrollo de microorganismos que digieren la materia orgánica.

Independientemente del método utilizado, a medida que se desarrolla el tratamiento biológico crece la masa de microorganismos, formando masas de lodos que deberán ser separadas del agua depurada. Para ello, el agua es conducida a otro decantador, esta vez secundario, donde los restos de materia orgánica en suspensión se depositan en el fondo. El agua superficial, más clarificada y depurada, vierte por el borde del decantador, ésta contiene sólo entre el 5 y 10% de la materia orgánica con la que entró. En la figura 5 se da un ejemplo de una fosa séptica de dos compartimientos, un ejemplo de un sistema de tratamiento secundario.

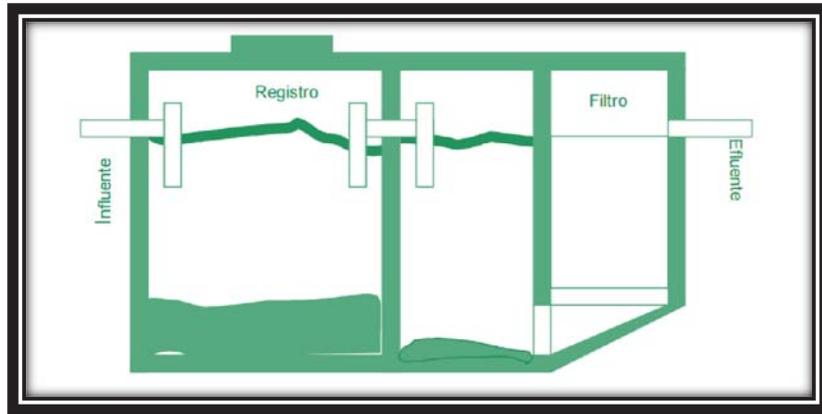


Figura 5. Fosa séptica de dos compartimientos. Fuente: Noyola et al, 2000.

### ***Tratamiento terciario***

Finalizada la decantación secundaria, en muchos casos, el agua residual se considera ya lo suficientemente libre de carga contaminante como para ser vertida a los cauces de los ríos; no obstante, en algunos casos es conveniente afinar más la depuración, por lo que es sometida a un tratamiento terciario.

En ocasiones, el agua pasa a una cámara de cloración, donde se eliminan los microorganismos. El agua que entra en este último proceso no sirve para el consumo humano, pero sí para riego.

Otras veces es necesario eliminar selectivamente ciertos componentes, como el fósforo, para evitar la eutrofización del cauce donde irá el agua; esto se consigue mediante la combinación de reactivos químicos y el paso del agua a través de filtros de arena, o incluso de carbón activo. Ejemplos de estos tratamientos pueden ser la ósmosis inversa, electrodiálisis, destilación, coagulación, adsorción, remoción por espuma, oxidación química, etc. En la figura 6 se muestra un esquema del funcionamiento, a grandes rasgos, de la osmosis inversa.

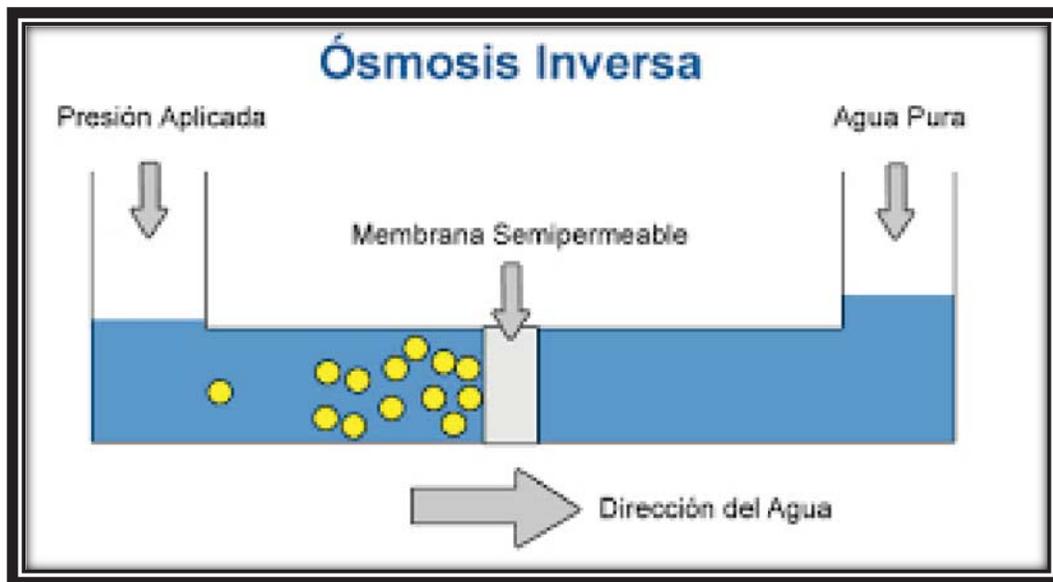


Figura 6. Esquema del funcionamiento de la Ósmosis Inversa

Aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos se conocen como operaciones unitarias, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza con base en procesos químicos o biológicos se conocen como procesos unitarios. A continuación se describen los distintos procesos.

#### - PROCESOS FÍSICOS

Los procesos físicos de tratamiento de agua residual son todos aquellos en los que se emplean las fuerzas físicas para el tratamiento. En general, las operaciones se emplean durante todo el proceso del tratamiento del agua residual, aunque algunas son casi exclusivamente operaciones de pretratamiento (desbaste, dilaceración y homogenización de caudales).

Los principales procesos físicos suelen separarse en lo siguiente (Sans, 1999.):

- Desbaste
- Dilaceración
- Evaporación
- Homogenización de caudales
- Mezclado
- Floculación
- Filtración

### ***Desbaste***

La operación de desbaste consiste en la eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por retención en las superficies.

Los elementos utilizados para el desbaste son las rejas y los tamices. Las rejas presentan aberturas mayores de 25 mm mientras que en los tamices no serán superiores a 6mm. Las rejas se utilizan para separar los sólidos grandes, que puedan producir daños y obstrucciones en bombas, válvulas, conducciones u otros elementos. El tamiz se usa tanto para el tratamiento primario como para la eliminación de los sólidos en suspensión en el tratamiento secundario. La limpieza de las rejas y tamices se puede realizar mecánicamente o manualmente. (Sans, 1999.).

### ***Dilaceración***

La dilaceración es la trituración de los sólidos gruesos en tamaños menores y más homogéneos. Esta operación no está destinada a mejorar la calidad del agua bruta ya que las materias trituradas no son separadas, sino que se reincorporan al circuito y al pasar por los demás procesos facilitan el tratamiento, por lo que este paso no se suele utilizar, a no ser que no haya desbaste, con lo que se es necesario incluirlo en el diseño y funcionamiento de la planta. Pero, a veces, aunque haya un desbaste previo se suelen utilizar dilaceradores para tratar los detritos retenidos en las rejas y tamices, siendo después vueltos a incorporar al agua bruta.

El dilacerador consta de un tamiz tipo tambor que gira alrededor de un eje vertical provisto de ranuras con un paso entre 6-10 mm. Los sólidos se hacen pasar a través de unas barras de cizalladura o dientes cortantes donde son triturados antes de llegar al tambor. Se homogenizan en tamaño y atraviesan las ranuras, saliendo por una abertura de fondo mediante un sifón invertido, siguiendo su camino aguas abajo.

Esta operación está muy cuestionada y actualmente casi ha desaparecido de la mayoría de las instalaciones. Primero, no es lógico mantener o retomar al proceso aquellos sólidos que pueden eliminarse por desbaste o tamizado, ya que lo que se hace es empeorar la calidad del agua residual que va a ser tratada posteriormente. Segundo, en la práctica, esta operación presenta varios inconvenientes. La necesidad de una atención frecuente debido a que se trata de un material muy delicado; el peligro de obstrucción de tuberías y bombas provocada por la acumulación en masas de las fibras textiles o vegetales unidas a las grasas; y la formación de una costra de lodo en los digestores anaerobios. (Sans, 1999.).

### ***Homogenización de Caudales***

La homogenización de caudales se realiza en el tratamiento de agua residual para tener caudales de tratamiento iguales y concentraciones de contaminantes mucho más homogéneas. La operación produce una mayor efectividad en los tratamientos posteriores.

La homogenización de caudales puede realizarse en todo caudal de agua que llegue a la planta de depuración (disposición en línea), o bien sólo se homogeniza en el caudal que excede a la media diaria, añadiéndolo a la depuración cuando el caudal de agua residual que llega es menor que el de la media (disposición en derivación). En este caso el gasto de bombeo es mínimo pero las concentraciones de contaminantes no son tan uniformes.

Para el agua residual de ciertos tipos de industrias, como la industria química y la metalúrgica, es indispensable la homogenización; puesto que los vertidos son puntuales y el agua residual homogenizada será de más fácil tratamiento que por separado.

La ubicación de los homogeneizadores en una planta depende del tipo de planta que se tenga, de una forma general, podemos decir que se encuentran entre el desarenador y el tratamiento primario. En algunos casos puede ser interesante situarlos entre el tratamiento primario y el secundario. (Sans, 1999.).

### ***Mezclado***

La operación de mezclado es una operación importante en muchas fases de tratamiento de agua residual. Se utiliza cuando sea necesario que una sustancia determinada, se homogenice totalmente en el seno de otra. Debe realizarse el mezclado en la precipitación química; en los procesos biológicos el aire se debe mezclar con los lodos activados; el proceso de desinfección, las aguas procedentes del último tratamiento se deben mezclar con el cloro o el hipoclorito sódico. (Sans, 1999.).

### ***Floculación***

La floculación es la operación en la que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto. Este aumento de la superficie de contacto es debido a la adición de productos químicos en los procesos de precipitación química o químicamente asistida. Debido a la floculación las partículas se agregan en partículas mayores (coagulación) y alcanzan la masa suficiente para sedimentar.

La floculación se ve favorecida por una agitación moderada ya que en un mayor contacto entre las partículas favorece la formación de los flóculos. Debe tenerse cuidado de que la agitación no sea excesivamente brusca puesto que podría destruir los flóculos formados; así mismo debe tenerse en cuenta el tiempo de floculación (antes de la sedimentación), tanto si se realiza en tanques unitarios como si se realiza en tanque separados. La agitación puede realizarse por medio mecánico o por aire, debiendo presentarse una especial atención a que la agitación al final del tanque sea menor que al principio para evitar la rotura de algunos flóculos ya formados. (Sans, 1999.).

## ***Sedimentación***

La sedimentación es la separación de los componentes del agua en dos fases; una fase sólida, que corresponde a los lodos y que está formada por partículas de sólidos suspendidos, más pesados que el agua, que por gravedad se depositan en el fondo, y una fase líquida formada por el agua y compuestos en disolución.

La sedimentación se realiza en muchos puntos de la depuración de agua residual, siendo una de las operaciones físicas más empleadas. Se emplea en el desarenador, el tanque de decantación primaria, después del proceso biológico, después del tratamiento químico de precipitación con coagulantes y en la concentración de sólidos en los espesadores de lodos.

La principal función de la sedimentación es la producción de un efluente clarificado, después de haber realizado el tratamiento correspondiente del agua residual. (Sans, 1999.).

### ***Teoría de la sedimentación aplicable***

Según la clasificación de Fitch, basada en la concentración y tendencia a la interacción de las partículas, existen cuatro tipos de sedimentación diferenciadas:

- ✓ Sedimentación clase 1 o de partículas discretas. Por ejemplo: desarenado.
- ✓ Sedimentación clase 2 o de partículas floculantes. Por ejemplo: decantación primaria.
- ✓ Sedimentación clase 3 o zonal. Por ejemplo: decantación secundaria en proceso lodos activos.
- ✓ Sedimentación clase 4 o por compresión. Por ejemplo: espesamiento de lodos por gravedad.

#### ***a. Sedimentación discreta***

En la sedimentación de partículas discreta las partículas sedimentan como entes individuales y no hay interacción de unas partículas con otras. En general son sólidos en suspensión con una masa relativamente grande y en suspensión no muy concentradas.

Este tipo de sedimentación se produce de una forma casi única en los desarenadores y parcialmente en los tanques de decantación primaria, así como la precipitación química, si no existe tratamiento primario

El fundamento para la sedimentación de partículas discretas es la ley de Newton, que se basa en la suposición de que las partículas son esféricas con diámetros homogéneos. Cuando una partícula se sedimenta, va acelerándose hasta que las fuerzas que provocan la sedimentación, en particular el peso efectivo de la partícula, se equilibran con las resistencias o fuerzas de fricción ofrecidas por el líquido. Cuando se llega a este equilibrio, la partícula alcanza una velocidad de sedimentación constante, denominada velocidad final de sedimentación de la partícula. (Romero, 1999; Ramalho 1993)



Figura 7. Sedimentación discreta o granular.

*b. Sedimentación floculante*

La sedimentación con floculación tiene lugar cuando la velocidad de sedimentación de las partículas aumenta, debido a la coalescencia con otras partículas. Las trayectorias de sedimentación de las partículas tienen forma curva, en lugar de las líneas rectas que se producen en la sedimentación de partículas discretas.

En la sedimentación floculante los sólidos en suspensión floculan, esta floculación produce una unión entre las partículas y adquieren la suficiente masa para sedimentar. Corresponden a partículas mucho más pequeñas que en el caso de la sedimentación discreta. En general corresponde a sólidos en suspensión, con partículas mucho más pequeñas que en caso anterior y con una excesiva concentración de sólidos y a los procesos de coagulación.

Este tipo de sedimentación se produce, generalmente, en los tanques de decantación primaria, en las zonas superiores de los decantadores secundarios y en los tanques de sedimentación química.

Los criterios de diseño para sistemas en los que se hace una sedimentación con floculación se establecen a través de ensayos de sedimentación en laboratorio. (Romero, 1999; Ramalho 1993.).

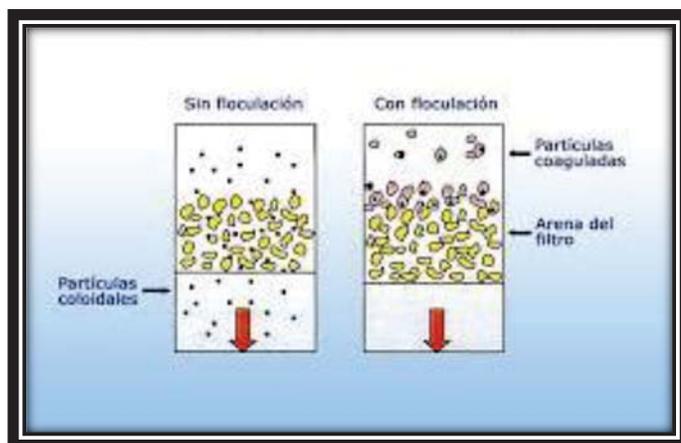


Figura 8. Sedimentación por medio de flóculos

### c. Sedimentación zonal

En la sedimentación zonal, las partículas que sedimentan sufren interacciones entre sí, de tal forma que la posición de una partícula respecto a otra permanece prácticamente constante, sedimentando todas las partículas como una zona o unidad.

Este tipo de sedimentación se produce generalmente en los tanques de decantación secundaria, posteriores al tratamiento biológico, así como en los tanques de sedimentación de la precipitación química.

La sedimentación por zonas se presenta en clarificadores con lodos coagulados químicamente, o activos con concentraciones que exceden los 500 mg/l. La capa de lodos presenta varias zonas perfectamente diferenciadas. Cada zona se caracteriza por concentración específica en lodos y por una velocidad de sedimentación determinada. El proceso de precipitación se presenta así: los lodos comienzan a precipitarse, estableciendo una interface entre la superficie de la capa de sólidos que están sedimentándose y el líquido clarificado. La zona inferior del líquido clarificador es lo que se denomina zona interfacial. La concentración de lodos en esta zona es uniforme, precipitándose todo ello como una capa de material a velocidad constante. (Romero, 1999; Ramalho 1993.).

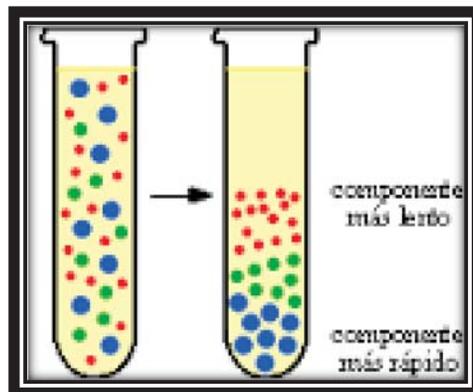


Figura 9. Sedimentación zonal.

### d. Sedimentación por compresión

La compresión, implica la formación de una estructura de partículas sedimentadas y sólo puede darse mayor sedimentación por compresión de dicha estructura. La compresión es debida al peso de las partículas que van sedimentando desde la superficie a los lodos del fondo del estanque de sedimentación. Cuando mayor sea la compresión menor será el volumen de lodos que se obtengan, como es lógico, la compresión se realiza en las capas inferiores de la masa del lodo.

Este tipo de sedimentación se produce mayormente en los tanques de sedimentación procedentes de la precipitación química y en los del proceso secundario.

Si bien se ha indicado, de una forma general, donde se producen cada tipo de sedimentación de las aguas residuales a tratar y el tipo de proceso que se ha realizado con anterioridad a la sedimentación, los tipos de sedimentación pueden tener lugar simultáneamente. (Romero, 1999).



Figura 10. Sedimentación por compresión.

### ***Fosas sépticas como pretratamiento de agua residual***

Las fosas sépticas permiten la sedimentación de la materia en suspensión y acumulación en el fondo en forma de lodos que se van descomponiendo por vía anaerobia. La digestión reduce el volumen de lodos gracias a la producción de gases como el dióxido de carbono, el metano y el ácido sulfhídrico.

Divididas en dos o más compartimientos, la mayoría de sólidos sedimentan en la primera cámara mientras en la siguiente sedimentan y almacenan los lodos que rebosan la primera cámara.

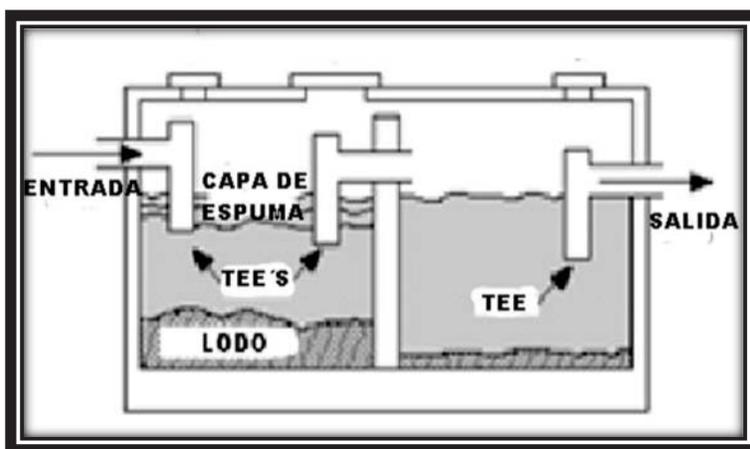


Figura 11. Esquema de una fosa séptica de dos compartimientos.

### ***Flotación***

Una alternativa a la sedimentación, utilizada en el tratamiento de algún tipo de agua residual, es la flotación, en la que se fuerza la entrada de aire en las mismas, a presiones de entre 1.75 y 3.5 Kg por cm<sup>2</sup>. El agua residual, que está muy saturada de aire, se descarga a continuación en un depósito abierto. En él, la ascensión de las burbujas de aire hace que los sólidos en suspensión suban a la superficie, donde son retirados. La flotación puede eliminar más de un 75% de los sólidos en suspensión. (Sans, 1999.).

### ***Filtración***

La operación de filtración permite la eliminación de sólidos en suspensión, procedentes de las aguas después del tratamiento y sedimentación biológica, así como la de precipitación química.

La filtración se realiza, generalmente a través de los lechos filtrantes, compuestos de material granular, con o sin adición de productos químicos. También se puede utilizar microtamices. La filtración en medios granulados se realiza a través de varios mecanismos de eliminación tales como el tamizado, interceptación, impacto, sedimentación y adsorción. (Sans, 1999.).

## **PROCESOS BIOLÓGICOS**

El tratamiento biológico del agua residual es generalmente un tratamiento secundario. Tiene como misión la coagulación y eliminación de sólidos coloidales no sedimentables en la decantación primaria así como la estabilización de la materia orgánica.

En el tratamiento biológico el proceso consiste únicamente transformando los nutrientes en tejido celular y diversos gases. El tejido celular es ligeramente más pesado que el agua, en consecuencia, la separación se tendrá que hacer por sedimentación y decantación. Si no se eliminase el tejido celular del agua el nivel de DBO de las aguas disminuiría poco dado que el tejido celular es materia orgánica y la disminución correspondería a la conversión bacteriana de nutrientes en productos gaseosos. (Sans, 1999.).

Según el tipo de agua residual a tratar, los objetivos en el tratamiento biológico pueden diferenciarse ligeramente; en el tratamiento de aguas residuales domésticas los objetivos son la eliminación de la materia orgánica así como nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo; en aguas residuales industriales el tratamiento persigue la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos teniendo en cuenta que algunos metales pesados son tóxicos para las bacterias utilizadas en ciertos procesos biológicos. En función del uso del agua residual tratada también se emplearan distintos tratamientos biológicos (por ejemplo, para reuso en la agricultura o riego, el tratamiento va encaminado a la eliminación de microorganismos patógenos más que la materia orgánica o los nutrientes).

Los principales procesos de tratamiento biológico utilizados en el tratamiento de agua residual en cuanto al tipo de microorganismos son: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios y una combinación de los procesos aerobios con los anóxicos o anaerobios. En cuanto

a la situación de los microorganismos se pueden encontrar: procesos de cultivos en suspensión, procesos de cultivo fijo o combinaciones de los mismos.

Los microorganismos más utilizados en los tratamientos biológicos son: bacterias, hongos, algas, protozoos, rotíferos, crustáceos y virus. (Sans, 1999.).

## **i. PROCESOS DE TRATAMIENTO AEROBIO**

Estos tipos de tratamiento se utilizan generalmente para eliminar la materia orgánica y para la nitrificación de las aguas residuales domesticas residuales. En estos tratamientos los microorganismos encargados de los procesos se mantienen en suspensión con los compuestos en disolución que contienen las aguas residuales a tratar. A continuación se definen los tipos de tratamiento más utilizados. (Sans, 1999.).

### *a. Lodos activados*

Proceso aerobio en el que las partículas de lodo (biomasa) quedan suspendidas en un tanque de aireación y reciben oxígeno. Las partículas de lodo activado, llamadas floc, están compuestas por millones de bacterias en crecimiento activo aglutinadas por una sustancia gelatinosa. El floc absorbe la materia orgánica y la convierte en productos aerobios. La reducción de la DBO<sub>5</sub> fluctúa entre el 60 y el 85%.

### *b. Proceso de nitrificación*

Son los procesos llevados a cabo por determinados grupos de microorganismos bacterianos que se utilizan en aquellas plantas de tratamiento de aguas residual, donde aparte de la eliminación de la materia orgánica se persigue la eliminación de nitrógeno.

La eliminación de la materia nitrogenada es necesaria cuando el efluente de la planta de tratamiento de agua residual va dirigida a embalses o masas de agua utilizadas para captación de aguas potables, bien a las denominadas por ley como zonas sensibles. (Sans, 1999.).

### *c. Estanque de estabilización o laguna*

Otra forma de tratamiento biológico es el tanque de estabilización o laguna, que requiere una extensión de terreno considerable y, por lo tanto, suelen construirse en zonas rurales. Las lagunas opcionales, que funcionan en condiciones mixtas, son las más comunes, con una profundidad de 0.6 a 1.5 m y una extensión superior a una hectárea.

En la zona del fondo, donde se descomponen los sólidos, las condiciones son anaerobias; la zona próxima a la superficie es aerobia, permitiendo la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal. Puede lograrse una reducción de la DBO<sub>5</sub> de 75 a un 85%.

d. Sistema Natural construido tipo "WETLAND"

Un humedal artificial conocido como "Wetland" por su denominación en inglés, es un filtro de materiales granulares (grava por lo común) en donde se desarrolla un sistema de raíces de plantas, que generalmente pertenecen al género *Phragmites* y *Thypha*, conocidos comúnmente como carrizos, tules o totora en los países andinos. Este arreglo proporciona una matriz de grava y raíces a través de la cual fluye el agua a tratar, y donde se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento, semejando el medio natural conocido como rizosfera. Estas plantas aportan el oxígeno atmosférico captado por las hojas a las raíces y rizomas, por lo que el agua residual es tratada aeróbicamente por los microorganismos presentes en la rizosfera, y anaeróbicamente por aquellos organismos que se encuentran entre los intersticios del medio granular circundante. Las mayores ventajas sobre otros procesos son su bajo costo de operación, su fácil instalación y mantenimiento, además de producir un efluente de buena calidad (DBO<sub>5</sub> promedio de 25 mg /L). En la figura 12 se muestra un esquema de un humedal artificial. El suelo de la zona es removido del sitio que ocupará el lecho hasta una profundidad de 1.5 m por debajo del nivel donde fluirá el agua. Este nivel por lo general se encuentra pocos centímetros por debajo de la altura de la zona de material granular (humedal de flujo subsuperficial). El suelo de esta excavación se impermeabiliza con arcilla compactada o con membranas plásticas (geotextiles), y eventualmente con una losa de cemento o asfalto, con el fin de retener el agua e impedir la infiltración al subsuelo y por lo tanto la pérdida del agua tratada. También pueden llegar a ser altamente eficientes en la eliminación de bacterias y microorganismos patógenos. Este método de tratamiento biológico ofrece también un aspecto agradable a la vista y, en caso de sistemas más grandes, puede constituir asimismo una reserva para la vida silvestre. El problema asociado con este sistema es la alta demanda de área que requiere para su funcionamiento. En el capítulo tres se profundizará mayormente sobre éste sistema de tratamiento.

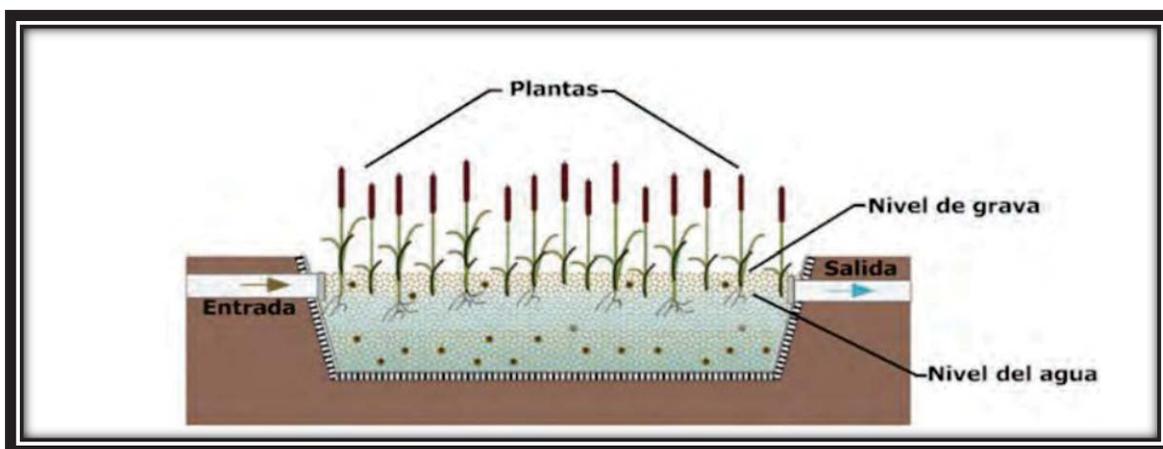


Figura 12. Esquema de un filtro de lecho de raíces (Humedal)

## 3. UNIDADES QUE CONFORMARÁN LA PLANTA DE TRATAMIENTO PROPUESTA

### 3.1. FOSAS SÉPTICAS COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA

#### 3.1.1. HISTORIA

El origen séptico moderno se remonta hacia alrededor de 1860, con los primeros trabajos realizados en Francia por Mouras (Dunbar, 1908). A lo largo de la historia, la configuración ha tenido pocas modificaciones entre la fosa séptica moderna presentada en la Figura 13 y la fosa séptica de Mouras modificada en la década de 1870, conocida también como tanque Foie Mouras (figura 14). El nombre de fosa séptica se le atribuye a Donald Cameron (1985), quién la llamó así por las condiciones y acciones sépticas que se desarrollan en el interior de la misma.

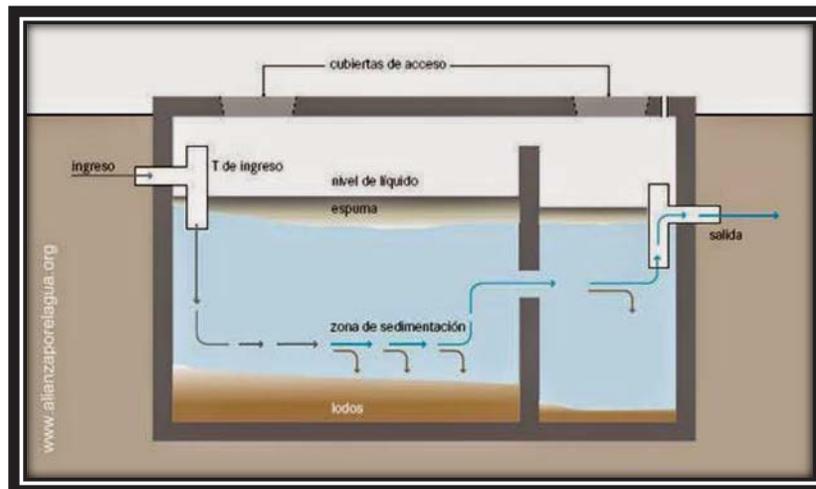


Figura 13. Fosa Séptica moderna.

A Cameron le fue concedida la patente británica Núm. 21,142 en 1985, mientras que en Estados Unidos la patente fue entregada en 1899. Una vez de registrada la patente se dio una gran controversia de carácter legal, acompañado del desarrollo de nuevos modelos de la misma. (Crites, 2000).

Dos características importantes en la versión moderna de la fosa séptica es el uso de tanques herméticos y tamizados del efluente (no considerando en la NOM-006-CNA-1997), así como el empleo de mamparas a la entrada y salida. La determinación de las dimensiones en función del número de usuarios.

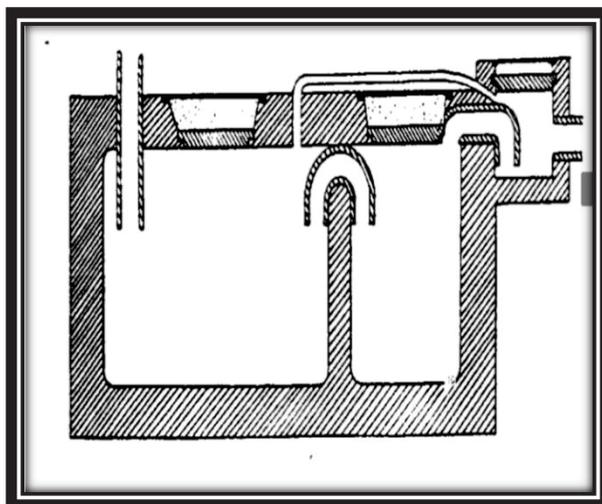


Figura 14 Fosa séptica Foie Moura. (Crites, 2000)

### 3.1.2. DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN

El propósito de una fosa séptica es proporcionar una primera etapa de tratamiento de agua residual favoreciendo la sedimentación física de las grandes partículas, flotación, y la digestión anaerobia de agua residual. Además, el tanque permite el almacenamiento de sólidos parcialmente digeridos hasta su retiro (NOM-006-CNA-1997).

**Entre las definiciones de fosa séptica más aceptada destacan:**

- Tanque hermético diseñado y construido para recibir la descarga del agua residual del drenaje, edificio o depósito que, almacena líquidos por un periodo de retención que proporciona la separación de sólidos del líquido y la digestión de la materia orgánica, y permite que el efluente se descargue a un tanque, dispositivo de tratamiento, o un sistema de dispersión en el suelo.
- Recipiente utilizado para el tratamiento de agua residual que incluye, pero no se limita a las fosas sépticas, tanques anaerobios, tanques de retención y bombas.

### 3.1.3. UNIDADES DE LAS FOSAS SÉPTICAS

Las unidades de una fosa séptica incluyen:

Trampa de grasa,  
Tanque séptico,  
Caja de distribución,  
Pozo de absorción

### TRAMPA DE GRASAS

Se instalan únicamente cuando se eliminan grasas en gran cantidad, como es el caso de los hoteles restaurantes, cuarteles en zonas rurales. Se colocan antes de los tanques sépticos, deberán diseñarse con una tapa liviana para hacer limpieza, la misma que debe ser frecuente; en lo posible deben ubicarse en zonas sombreadas para mantener bajas temperaturas en su interior. Para controlar su capacidad se considera un gasto de 8 litros por persona y nunca ésta capacidad será menor de 120 litros. (Crites, 2000)

### TANQUE SÉPTICO

El tanque séptico es la unidad fundamental del sistema ya que en este se separa la parte sólida de las aguas servidas por un proceso de sedimentación simple; además se realiza en su interior lo que se conoce como *proceso séptico*, que es la estabilización de la materia orgánica por acción de las bacterias anaerobias, convirtiéndola entonces el lodo inofensivo.

Para calcular la capacidad del tanque séptico se debe conocer el número de usuarios del sistema, luego se adopta el gasto del agua residual generada en términos de volumen por persona y por día, sugerido como una medida un gasto de 150 litros/persona/día y tiempo de retención de 24 horas, debiéndose tomar la proporción de ésta en caso de no utilizar el sistema al otro día, como es el caso de escuelas rurales, donde el lapso de utilización es de 6 a 8 horas diarias. Para determinar el volumen del tanque séptico se multiplica el número de usuarios por el gasto

$$V = Q * n$$

Formula en la que Q es el gasto proporcional con relación a las 24 horas, así si la escuela rural trabaja 8 horas diarias, Q será igual a 8/24 gasto diario. (Crites, 2000)

### CAJA DE DISTRIBUCIÓN

Este implemento de la fosa séptica tiene por objeto distribuir el agua servida procedente del tanque séptico proporcionalmente a cada uno de los ramales del campo de oxidación, para lo cual se colocan todas las tuberías de salida a la misma altura. Se recomienda localizar la tubería de entrada a 5 cm del fondo de la caja y las tuberías de salida 1 cm del mismo fondo. La forma que se adopte para la caja depende del terreno que se obtenga para la oxidación y del número de salidas que se adopten. En lo posible el ancho de la caja no excederá de 45 cm y la distancia mínima de los ejes de la tubería de salida será de 25 cm. Todas las cajas deberán estar provistas de una caja liviana apropiada para la realizar la limpieza.

### CAMPO DE OXIDACIÓN O INFILTRACIÓN

En esta unidad de la fosa séptica se consigue oxidar el agua residual y eliminar por infiltración. Para lograr un mejor funcionamiento del campo de oxidación, debe escogerse el lugar adecuado, éste se realiza mediante una prueba de infiltración, la cual consiste en hacer varias excavaciones

en el área determinada, todas de 30x30 cm de sección por la profundidad proyectada para las zanjas de absorción. En estas fosas abiertas, se deposita grava fina en el fondo, con una altura de 5 cm, después se llena con agua hasta una altura de 30 cm; 24 horas después, si el agua permanece o no se infiltra totalmente en el terreno, éste es inapropiado para el campo de infiltración, en caso contrario se procederá a llenar el hoyo hasta 15 cm de altura, midiéndose el tiempo que tarda en infiltrarse el líquido, posteriormente se divide entre 6 para obtener la velocidad de absorción.

#### *POZO DE ABSORCIÓN*

Los pozos de absorción pueden sustituir o ser complementarios al campo de absorción. Un pozo de absorción consiste en excavaciones de diámetro y profundidad variable, dependiendo del lugar en donde se encuentre ubicado. En éstos, el agua se infiltra por las paredes y piso que deberán ser tomados permeables, se recomienda llenar de grava a la altura aproximada de 1m para lograr una buena distribución del agua en el fondo.

#### **3.1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA FOSA SÉPTICA**

- a) Relación largo ancho del área superficial del tanque séptico deberá estar comprendida entre 2:1 a 5:1.
- b) El espacio libre entre la capa superior de nata o espuma y la parte inferior de la losa del techo del tanque séptico no deberá ser menor a 0.30 m. Se deberá considerar que un tercio de la altura de la nata se encontrará por encima del nivel del agua.
- c) El ancho del tanque séptico no deberá ser menor de 0.60 m y la profundidad neta menor a 0.75 m.
- d) El diámetro mínimo de las tuberías de entrada y salida del tanque séptico será de 0.10 m y 0.75 m respectivamente.
- e) El nivel de la tubería de salida del tanque séptico deberá estar situados a 0.05 m por debajo de la tubería de entrada del tanque séptico.
- f) Los depósitos de entrada y salida del agua residual al tanque séptico estarán constituidos por tres o pantallas
- g) Cuando se usen pantallas, éstas deberán estar distanciadas de las paredes del tanques no menos de 0.20 m ni mayor a 0.30 m.
- h) Cuando el tanque tenga más de una cámara, las interconexiones entre las cámaras consecutivas se proyectan de tal forma que evite el paso de natas y lodos.
- i) El fondo del tanque séptico tendrán una pendiente de 2% orientada hacia el punto de ingreso del agua residual.
- j) En los casos en que el terreno lo permita, se colocara una tubería de 0.15 m de diámetro para el drenaje de lodos, cuyo extremo se ubicará a 0.10 m por encima de la sección más profunda del tanque séptico. La tubería estará provista de una válvula de tipo compuerta y la carga de agua sobre el mismo, no deberá ser menor a 1.8 m.

Es fundamental que la ubicación del tanque séptico cumpla con todas las distancias mínimas requeridas. Su ubicación debe considerar las necesidades de espacio para localizar la instalación de disposición del efluente. En la tabla 5 se muestran las distancias mínimas requeridas (SEMARNAT, 1999).

**Tabla 5. Distancias mínimas requeridas para la ubicación del tanque séptico. (SEMARNAT, 1999)**

Localización	Distancia, m
Distancia a embalses o cuerpos de agua	60
Distancia a pozos de agua	30
Distancia a corrientes de agua	15
Distancia a edificaciones o predios	5

### 3.1.5. CONSIDERACIONES

El ingeniero responsable del proyecto, debe tener en claro las ventajas y desventajas que tiene el emplear el tanque séptico para el tratamiento del agua residual antes de decidir emplear esta unidad en una determinada localidad.

#### Ventajas

- Apropiado para comunidades rurales, edificaciones, parque y hoteles.
- Limpieza no frecuente
- Tiene un bajo costo de construcción y operación
- Mínimo grado de dificultad en operación y mantenimiento si se cuenta con infraestructura de remoción de lodos.

#### Desventajas

- Uso limitado para un máximo de 350 habitantes.
- También de uso limitado a la capacidad de infiltración del terreno que permita disponer adecuadamente los efluentes en el suelo.
- Requiere facilidades para la remoción de lodos (bombas, camiones con bombas de vacío)

### 3.1.6. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE UNA FOSA SÉPTICA

Los principios que han de orientar el diseño de una fosa séptica son los siguientes:

1. Prever un tiempo de retención del agua residual, en un tanque séptico, adecuado para la separación de los sólidos y la estabilización de los líquidos.
2. Prever condiciones de estabilidad hidráulica para una eficiente sedimentación y flotación de sólidos.
3. Asegurar que el tanque sea lo bastante grande para la acumulación de los lodos y espuma.
4. Prevenir las obstrucciones y asegurar la adecuada ventilación de los gases.

### 3.1.7. DISEÑO DE UNA FOSA SÉPTICA

Para el diseño del tanque séptico es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tiempo de retención hidráulica del volumen de sedimentación.
- Volumen de sedimentación.
- Volumen de almacenamiento de lodos.
- Volumen de natas.
- Espacio de seguridad.

#### ***Tiempo de retención hidráulica del volumen de sedimentación:***

Debe ser calculado mediante la siguiente fórmula:

$$Pr = 1.5 - 0.3 * \log(P * Q)$$

Donde:

Pr= tiempo promedio de retención en días.

P= Población

Q= Gasto de aporte unitario de agua residual en L/hab/día

**En ningún caso, el tiempo de retención deberá ser menor a seis horas.**

### ***Volumen de sedimentación***

Será calculado mediante la siguiente fórmula:

$$V_s = 10^{-3} * (P * Q) * Pr$$

Donde:

Vs= volumen de sedimentación en m<sup>3</sup>

### ***Volumen de almacenamiento de lodos***

Será calculado mediante la siguiente fórmula:

$$V_d = G * P * N * 10^{-3}$$

Donde:

Vd= volumen de almacenamiento

G= Volumen de lodos producidos por persona y por año en litros.

N= Intervalo de limpieza o retiro de lodos en años.

### ***Volumen de natas.***

Es un valor constante, se considera un volumen mínimo de 0.7 m<sup>3</sup>

### ***Espacio de seguridad:***

Las distancias entre la parte inferior del ramal de la tee de salida y la superficie inferior de la capa de natas no deberá ser menor a 0.10 m.

Una regla común de diseño establece que la capacidad volumétrica en estos tanques debe ser aproximadamente igual a 5 veces al caudal promedio. (Crites, 2000)

### **3.1.8. CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

Las principales consideraciones que se deben tener en cuenta para el diseño y operación de las fosas sépticas son:

- Su configuración
- Su integridad estructural

- Su impermeabilización
- Su tamaño
- El empleo de grande tanques sépticos
- La programación de inspecciones
- La limpieza del tanque séptico.

### ***CONFIGURACIÓN DEL TANQUE***

La mayoría de los tanques sépticos construidos en concreto son rectangulares, cuentan de un deflector que divide el tanque y con puntos de acceso que permiten la inspección y limpieza. La primera cámara ocupa aproximadamente las dos terceras partes del volumen total del tanque. No obstante, el uso de tabiques divisores en tanques sépticos es más de carácter histórico que científico. La ubicación de los tabiques divisores limita el área superficial disponible para la acumulación de lodos y espuma. Una forma más racional para usar el tabique divisor consiste en ubicarlo longitudinalmente para mejorar la remoción de sólidos y nos permita aumentar la integridad estructural del tanque.

### ***INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL TANQUE***

El desempeño que puede lograrse con un tanque séptico a largo plazo depende directamente de su integridad estructural. La integridad estructural de un tanque séptico construido en concreto depende del método de construcción, del tipo de refuerzo en acero y de la composición de la mezcla del concreto. Para lograr una máxima integridad estructural, las paredes y el fondo del tanque deben ser fundidos monolíticamente, y la cubierta se debe fundir en el sitio, utilizando el refuerzo en acero que sobresale de los muros. En algunos casos se utiliza un sello hidráulico entre los muros y la cubierta. Se debe de evitar colocar la cubierta sobre el tanque, debido a que se pueden presentar separaciones cuando ocurren asentamientos diferenciales.

### ***PRUEBA DE PERMEABILIDAD***

Los tanques impermeabilizados son necesarios para la protección tanto del medio ambiente como de las instalaciones de tratamiento o vertido, dispuestas a continuación del tanque séptico.

La comprobación de impermeabilidad e integridad estructural se debe realizar para cada uno de los tanques llenándolos con agua antes y después de su instalación, las pruebas hidrostáticas se realizan en el lugar de fabricación llenando el tanque con agua y esperando 24 horas, si no se presentan fugas de agua después de dicho tiempo, el tanque es aceptado. En el caso de que se presenten pérdidas totales superiores a 1 galón de agua, el tanque es rechazado. (Crites, 2000).

### ***TAMAÑO DEL TANQUE***

Para calcular la capacidad del tanque séptico, se deberá conocer el número de personas que serán usuarios del sistema, además se dan una serie de recomendaciones para que éstos alcancen un

eficiente desempeño con respecto a la remoción de DBO, SST y aceites y reduzcan la frecuencia de bombeo de los contenidos del tanque al exterior. En la tabla 6 se muestra la capacidad de trabajo de una fosa séptica en función del número de usuarios ya sea en un medio rural o un medio urbano.

**Tabla 6. Capacidad de trabajo de la fosa séptica en función del número de usuarios. Fuente: NOM-006-CNA-1997.**

Capacidad nominal (No. De usuarios)	Capacidad de trabajo (m <sup>3</sup> )	
	Medio rural	Medio urbano
Hasta 5	0.60	1.05
6 a 10	1.15	2.10
11 a 15	1.75	3.10
16 a 20	2.30	4.15
21 a 30	3.5	6.25
41 a 50	5.80	10.40
51 a 60	6.95	12.45
61 a 80	9.25	16.60
81 a 100	11.55	20.75

Nota.- Se aceptara una tolerancia del 5% respecto a los valores de capacidad establecidos.

### **EMPLEO DE GRANDES TANQUES SÉPTICOS**

A pesar de que los tanques sépticos son usados para residencias y demás instalaciones de comunidades aisladas, los tanques sépticos de gran tamaño han servido también como sistemas de tratamiento de residuos líquidos provenientes de grupos de hogares, e incluso de pequeñas comunidades. En general, los tanques sépticos de gran tamaño se diseñan como reactores de flujo pistón.

### **INSPECCIÓN**

La inspección del tanque se realiza una o dos veces al año y contempla lo siguiente:

- Impermeabilidad del tanque
- Revisión del ingreso de otro tipo de descarga con el cual fueron diseñados
- Revisión de empaques en las conducciones, que conectan el tanque séptico con el sistema de disposición en campos de infiltración
- Revisión de la acumulación de lodos y espuma

Las capas de lodo y espuma se pueden medir con ayuda de elementos. Para medir el espesor de la capa de espuma se utiliza una vara en forma de L, la cual se empuja a través de la capa de espuma hasta alcanzar el fondo de la misma. El espesor de la capa se determina al leer la escala de la vara.

Para medir el espesor de la capa de lodo se utiliza el ensayo de extinción de la luz. Tal prueba consiste en sumergir una fuente luminosa en el interior del tanque, la fuente de luz se puede observar mientras atraviesa la columna de agua, ya que cuando alcanza la capa de lodo se extingue (Crites, 2000).

### **3.1.9. MANTENIMIENTO DEL TANQUE SÉPTICO**

Dado que los tanques sépticos se encuentran enterrados y por lo tanto no están a la vista, las personas olvidan que estos sistemas necesitan mantenimiento periódico. Con frecuencia, los residentes de zonas pobladas que cuentan con red de alcantarillado por gravedad se reubican en zonas que utilizan tanques sépticos, suponiendo entonces que pueden descargar cualquier material y cualquier cantidad de volumen de agua dentro del sistema, como lo hacían cuando contaban con la red de alcantarillado. Sin embargo, los sistemas de tanque séptico sometidos a estas condiciones se pueden ver afectados por la descarga de algunos constituyentes, ya que su capacidad de manejo de caudal es finita. (Crites, 2000).

Para que el sistema séptico siga tratando el agua residual eficientemente, necesitará bombear el tanque periódicamente. Con el uso, el sistema séptico acumula lodo en el fondo de la fosa séptica. A medida que el nivel de lodo aumenta, el agua negra permanece en el tanque menos tiempo, y es más probable que los sólidos se escapen al área de absorción.

Si el lodo se acumula por mucho tiempo, no se lleva a cabo el asentamiento, el agua residual se va directamente al área del campo de absorción, y muy poca se podrá tratar. Las fosas de buen tamaño generalmente tienen suficiente espacio para acumular lodo por lo menos 3 años. La frecuencia con que hay que bombear la fosa depende de:

- La capacidad de la fosa séptica.
- El volumen de agua residual que entra a la fosa.
- La cantidad de sólidos (suspendidos y totales) que contiene el agua residual.

### **3.1.10. FOSAS SÉPTICAS PREFABRICADAS**

A pesar de que las primeras fosas sépticas se construyeron hace más de cien años, apenas han cambiado en su estructura fundamental, sin embargo su aparente sencillez ha motivado el que se construyan a veces, sin las mínimas normas de calidad convirtiéndose en focos de infección. Exactamente lo contrario para lo que fueron diseñadas.

Las fosas sépticas prefabricadas garantizan total estanqueidad y buen funcionamiento cuando se seleccionan correctamente y por su tecnología operan por tiempo indefinido.

Es un elemento diseñado y fabricado con material impermeable para dar el tratamiento al agua residual doméstica que las almacena durante un tiempo (tiempo de retención), para separar los sólidos suspendidos y lograr la digestión de la materia orgánica; evacuando aguas que resultan inofensivas para el ser humano y el medio ambiente.

En este tipo de tanque se recomienda enviar el agua residual cruda que proviene del WC, regaderas y lavabos, principalmente, requiere de mantenimiento mínimo en relación a la extracción de lodos, ya que mediante el proceso anaerobio se degrada hasta un 70% de la materia orgánica. Y deben de cumplir con la NOM-006-CNA-1997. Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones y métodos de prueba de las fosas sépticas prefabricadas, para el tratamiento preliminar del agua residual de tipo doméstico, con el fin de asegurar su confiabilidad y contribuir a la preservación de los recursos hídricos y del ambiente. En la Figura 15 se muestra el esquema de una fosa séptica prefabricada, así como los tamaños y dimensiones de los tanques prefabricados más comunes que existen en el mercado. (Tabla7)

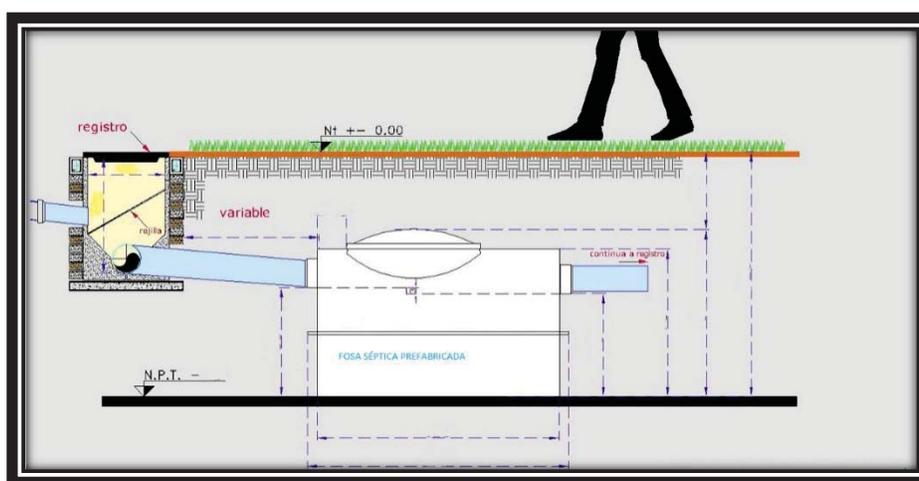


Figura 15. Esquema de una fosa prefabricada

**Tabla 7. Medidas estándares para fosas prefabricadas.**

ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONES DE LOS TANQUES SÉPTICOS DE PLASTICO REFORADO								
No. PERS	DIAMETRO (m)	LONGITUD TOTAL (cm)	DIÁMETRO ENT/SALIDA (cm)	ESPEJOR DE PARED (cm)	TIRANTE ENTRADA (cm)	PESO APROX (Kg)	CAPACIDAD Lts/día	Coto aproximado en pesos mexicanos
5	0.76	1.25	15	3.5 – 4.0	8	30	300	\$3,000
10	0.76	2.44	15	3.5 – 4.0	8	50	600	\$5,500
20	0.91	2.44	15	3.5 – 4.0	8	70	1,300	\$7,800
35	1.07	2.44	15	5.0 – 6.0	8	95	2,100	\$14,000
50	1.52	2.50	15	5.0 – 6.0	15	180	3,000	\$26,000
75	1.52	2.50	15	5.0 – 6.0	15	300	4,500	\$30,000
100	1.83	3.50	15	5.0 – 6.0	15	400	7,000	\$51,000

\*\*El costo puede variar de acuerdo al tipo de digestor que se seleccione y el lugar de compra.

### 3.1.11. BIODIGESTORES

Existen los llamados “Biodigestores”, que actúan como una fosa séptica, la ventaja que tienen estos nuevos sistemas de pretratamiento es la fácil instalación y mantenimiento. (Manual ROTOPLAS)

El diseño del Biodigestor, permite resolver necesidades de saneamiento a través de diferentes capacidades de caudal, respondiendo a los requerimientos de las diferentes obras. Incorpora la estructura de doble pared, la pared interior con su construcción esponjosa le otorga mayor resistencia y aislación térmica, la pared exterior otorga una perfecta terminación lisa, esta pared contiene aditivos para evitar el envejecimiento al estar a la intemperie. El equipo completo se compone de tanque séptico, cámara de contención de lodos estabilizados, sistema de extracción de lodos y litro de aros PET. En la Figura 16 se muestra los componentes de un Biodigestor.



Figura 16. Componentes del tanque Biodigestor.

### 3.12. RECOMENDACIONES PARA UNA MAYOR EFICIENCIA DE LOS TANQUES SÉPTICOS

- Utilice agua de manera conservadora para no saturar el sistema séptico
- Evitar tener compuestos como acetona, aceites, alcohol o líquidos en seco del tanque séptico, pues no se descomponen fácilmente.
- Nunca utilizar cerillos o antorchas para inspeccionar un tanque séptico.
- Cuando se haga la limpieza no se debe extraer la totalidad de los lodos, dejar un volumen que sirva de semilla.
- No se debe lavar ni desinfectar el tanque después de la extracción de lodos. La adición de desinfectantes u otras sustancias químicas perjudican su funcionamiento, por lo que no se recomienda su empleo.
- Los lodos extraídos deben ser transportados con cal para su manejo, transportación y deben ser dispuestos adecuadamente, pueden ser en zanjas de unos 60 cm de profundidad.
- Las fosas sépticas que se abandonan o clausuren, deben rellenarse con tierra o piedra.

## 3.2. HUMEDALES

### 3.2.1. HISTORIA Y DESARROLLO DE LOS HUMEDALES

En los últimos años, la eliminación de nutrientes por medio de métodos naturales se ha convertido en una de las áreas de mayor interés en el campo de la investigación sobre tratamiento del agua residual. Un método natural utilizado para estos fines lo constituyen los humedales artificiales.

El primer reporte científico, en que señalan las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual, lo dio la Dra. Kathe Seidel, del Instituto Max Planck, de Alemania en la década de los 60's (Seidel, K. 1953)



Figura 17. Dra. Kathe Seidel. (1907 en Frankenstein; † 1990 en Krefeld)

En 1953, la Dra. Kathe Seidel presentó por primera vez un método para la mejora de vías de navegación que sufrieron una fertilización excesiva a causa de la contaminación del agua residual y la acumulación de sedimentos por medio de especies vegetales adecuadas.

Sin embargo, en ese momento las opiniones de los expertos sobre el tratamiento del agua residual se limitaban a los métodos físicos, químicos y biológicos (bacterias) y el uso controlado de macrófitas para la purificación del agua no fue tomado en cuenta. Además, se cree que la mayoría macrófitas crecen bien en aguas contaminadas y la capacidad de las mismas para eliminar sustancias tóxicas en el agua no se había reconocido así. Entre 1952 y 1956, Seidel llevó a cabo numerosos experimentos sobre el uso de plantas en humedales para el tratamiento de diversos tipos de agua residual, incluyendo agua residual con fenol y agua residual de la producción del ganado. A principios de los años 60's, Seidel intensificó sus experimentos en el tema del agua residual y lodos de distinto origen; ella trató de mejorar la calidad del agua en las zonas rurales y trabajo en el tratamiento descentralizado de agua residual que provenían de sistemas de tratamiento de las fosas sépticas cuya operación era ineficiente. (Seidel, K. 1953)

La Dra. Seidel comenzó a plantar, en las zanjas de un terraplén de poca profundidad, bandejas artificiales con macrófitas. Seidel llamó a este primitivo sistema el método hidro-botánico. Después mejoró su sistema hidro-botánico con suelos arenosos con alta conductividad hidráulica, en módulos cerrados y con distintas especies de macrófitas. Para superar el sistema de tanque séptico anaeróbico, integró a una etapa de filtración de lodos primarios y colocó los suelos arenosos plantados con *Phragmites australis*. Por lo que el sistema consistía en una cámara de infiltración con flujos de agua residual en vertical y una cámara de eliminación con un flujo horizontal (Seidel 1965).

Este sistema era la base para el sistema híbrido que se revivió a finales del siglo XX. Sin embargo, cuando Seidel trató de aplicar macrófitas al agua residual, los ingenieros de esa época habían erradicado las plantas visibles en un sitio de tratamiento durante más de 50 años y por lo tanto, no fue una sorpresa que los primeros humedales construidos a escala real se construyeron fuera de Alemania. (Seidel, K. 1953)

Los humedales construidos o artificiales han evolucionado durante las últimas tres décadas del siglo XX en una tecnología viable de tratamiento, utilizados para diferentes tipos de agua residual en el mundo. Hay varios tipos de humedales artificiales que podrían ser distinguidos según varios criterios, tales como presencia o ausencia de superficie libre del agua, macrófitas utilizadas o la dirección del flujo. Los humedales construidos se utilizan principalmente para el tratamiento de agua residual doméstica y municipal pero su uso para otros tipos de agua residual como agrícolas e industriales, lixiviados y vertedero de escurrimiento se han vuelto más frecuentes, recientemente.

### 3.2.2. HUMEDALES COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO

Los humedales, ya sean construido o natural, ofrecen una tecnología alternativa más barata y de bajo costo para el tratamiento de agua residual. En el pasado, muchos de esos sistemas fueron construidos para el tratamiento de bajos volúmenes de agua residual cargadas con la materia orgánica fácilmente degradable para poblaciones aisladas en las zonas urbanas. Sin embargo, la demanda generalizada de mejorar la calidad, la recuperación y la reutilización del agua, es actualmente la fuerza impulsora de la aplicación de este método en el mundo.

Las recientes preocupaciones sobre la pérdida de humedales naturales han generado una necesidad de crear humedales artificiales, que pretenden emular las funciones de los naturales que han sido destruidos. En la figura 18 se observa un ejemplo de un humedal natural. El número de humedales artificiales en uso, han aumentado mucho en los últimos años. El uso de humedales artificiales en Estados Unidos, Nueva Zelanda y Australia está generando interés rápidamente. La mayor parte de estos sistemas son usados como un tratamiento terciario de las ciudades pequeñas y zonas rurales. Son grandes en tamaño, por lo general usando el sistema del flujo para remover bajas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y sólidos suspendidos. Sin embargo, en países europeos, estos sistemas de tratamiento de humedales artificiales se utilizan generalmente para proporcionar un tratamiento secundario de agua residual doméstica para poblaciones pequeñas. Estos sistemas han sido vistos como una forma económicamente atractiva y de

alta eficiencia energética de proporcionar un alto nivel de tratamiento de agua residual. (RAMSAR, 1996).



Figura 18. Humedal natural en Perú. (Ramsar, 1996).

Por lo general, los humedales artificiales se construyen para uno o más de los cuatro objetivos principales:

- La creación de hábitat, para compensar los humedales naturales que fueron utilizados para la agricultura y el desarrollo urbano.
- El mejoramiento de la calidad del agua
- Control de inundaciones
- Producción de alimentos y fibras ( humedales construidos para la acuicultura)

### 3.2.2.1. VENTAJAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES COMO SISTEMA DETRATAMIENTO

La aplicación de humedales construidos es una tecnología relativamente nueva en el mundo. Es una alternativa barata para el tratamiento de agua residual utilizando los recursos locales. Estéticamente se busca que los humedales sean visiblemente atractivos en comparación con las plantas convencionales de tratamiento de agua residual. Este sistema promueve el uso sostenible de los recursos locales, que es un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales más amigable con el entorno (Hammer, 1994).

Los humedales artificiales se pueden crear a costos más bajos que otras opciones de tratamiento, con métodos de baja tecnología donde no se necesitan nuevas o complejas herramientas tecnológicas. El sistema se basa en fuentes de energía renovables como la energía solar y cinética, las plantas de los humedales y microorganismos, que son los agentes activos en los procesos de tratamiento.

Este sistema puede tolerar grandes volúmenes de agua y diferentes niveles de contaminantes. Estos incluyen el agua residual municipal, el agua residual urbana, los efluentes agrícolas, efluentes industriales y el agua superficial contaminada en los ríos y lagos. El sistema puede promoverse a diversos usuarios potenciales para mejorar la calidad del agua y eliminación de contaminantes. Estos usuarios incluyen la industria del turismo, los departamentos gubernamentales, industria privada, residencias privadas, industrias de la acuicultura y las agroindustrias. (Hammer, 1994).

La utilización de los productos locales y la mano de obra, ayuda a reducir los costos de operación y mantenimiento. Menos energía y materias primas son necesarias, con el trabajo periódico local, en lugar de una atención continua de tiempo completo. Este sistema contribuirá indirectamente en gran medida a la reducción del uso de los recursos naturales en plantas de tratamiento convencionales, y las descargas de agua residual a cauces naturales también son reducidas.

El sistema de humedales artificiales también podría ser utilizado para limpiar los ríos contaminados y otros cuerpos de agua. Esta tecnología puede llegar a ser utilizada para rehabilitar la contaminación de los ríos en el país.

El sistema de tratamiento a través de humedales es aplicado a varias funciones. Estas funciones incluyen el tratamiento primario, el secundario (pulimento de efluente) y la desinfección, así como la eliminación de nutrientes mediante producción de biomasa y la recarga de acuíferos.

Pese a que el objetivo principal de los sistemas de tratamiento a través de humedales artificiales es tratar varios tipos de agua residual (municipal, industrial, agrícola y de aguas pluviales), se ha establecido que además sirve como un santuario de vida silvestre y proveen un hábitat para los animales. Así mismo, los humedales pueden ser estéticamente agradable y servir como un destino para los turistas y los habitantes de las ciudades locales. También puede servir como una atracción pública como santuario a los visitantes para explorar su medio ambiente y posibilidades de educación. Hace un llamamiento a diferentes grupos que van desde ingenieros dedicados al tratamiento de agua residual, así como ambientalistas y personas interesadas en las actividades recreativas. Este sistema de tratamiento a través de humedales también proporciona un campo de investigación y formación para jóvenes científicos en este nuevo campo de investigación. (Hammer, 1994).

### **3.2.2.2. DIFERENCIA ENTRE HUMEDALES NATURALES Y HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los humedales artificiales, a diferencia de los humedales naturales, son sistemas artificiales o humedales de ingeniería que están diseñados, construidos y operados para emular las funciones de los humedales naturales para los deseos y necesidades humanas (figura 19). Se ha creado a partir de un ecosistema donde alguna vez hubo un humedal o un antiguo medio terrestre, principalmente con el objetivo de eliminar contaminantes presentes en el agua residual.



Figura 19. Humedal Artificial

### 3.2.3. UTILIZACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Los sistemas de humedales construidos se clasifican en dos tipos generales: el sistema de flujo horizontal (SFH) y el sistema de flujo vertical (SFV). Los sistemas de flujo horizontal se dividen en dos tipos generales: flujo superficial (F S) y sistema de flujo subsuperficial (F SS). Se le llama sistema de flujo horizontal porque el agua residual se alimenta en la entrada y fluye horizontalmente a través del lecho hasta la salida. Por el contrario, el sistema de flujo vertical, se alimenta de forma intermitente y desagües verticalmente a través de la cama mediante una red de tuberías de drenaje. . (Hammer, 1994).

#### 3.2.3.1. FLUJO LIBRE

Los humedales con flujo libre son quizás los más antiguos desde el punto de vista conceptual. Este tipo de sistemas ha sido utilizado como tratamiento secundario, así como tratamiento de pulimento a sistemas secundarios. Generalmente estos sistemas son diseñados con cargas superficiales bajas. La profundidad del agua en estos sistemas varía entre 5 y 10 cm, sin embargo el valor más común se encuentra entre 30 y 40 cm. (Reed and Brown, 1991).

En norte América los humedales con flujo libre son el tipo más usado para el tratamiento del agua residual y según Knight et al, 1993, el número de humedales con flujo libre en Norte América representan dos tercios del total de los humedales construidos que se encuentran en funcionamiento.

En el caso de Europa, este tipo de sistemas se ha desarrollado más lentamente. Los sistemas más antiguos se encuentran en Holanda donde han sido utilizados por más de 30 años, dichos sistemas están formados por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo, con una profundidad de entre 0.30 y 0.40 m y las plantas sembradas son *Scirpus iacustris*. El agua residual entra por un extremo de la zanja y se descarga por el extremo opuesto. En estos humedales se emplea un área de 20 m<sup>2</sup> por persona equivalente y las remociones obtenidas para los distintos indicadores de contaminación fluctúa entre los 87 y 96% para la DQO, SST- DBO respectivamente (Brix 1-1, 1994). Por otra parte, en el año 1993 se desarrolló en la región Escandinava el primer sistema, a gran escala, de un

humedal con flujo libre, el sistema tiene un área superficial de 21 hectáreas y tiene como objetivo la remoción del 50% del nitrógeno presente en el agua residual tratada en una planta de tratamiento, la cual eran vertida al mar Báltico. En la figura 20 se muestra un humedal artificial de flujo superficial.

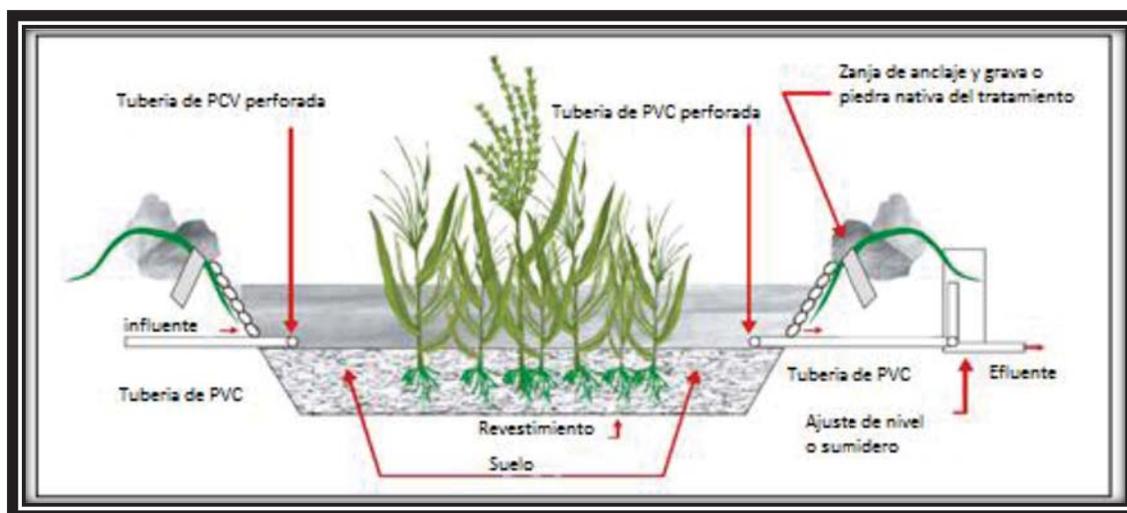


Figura 20. Humedal De Flujo Superficial. (Benefield, L.D. & C.W. Randall, 1980).

### 3.2.3.2. FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

Estos sistemas se diseñan con el objetivo de lograr tratamiento secundario y tratamiento avanzado a las aguas residuales. A estos sistemas se les llama también de “root zone” o “rock-reed filters” (zona de raíces), generalmente son estanques o canales con el fondo relativamente impermeable, rellenos con un medio poroso, el cual es sembrado con plantas emergentes. Se ha utilizado diferentes métodos de pretratamiento de las aguas residuales, así como diferentes dispositivos de entrada y salida. El medio poroso suele ser suelo fino o suelo grueso y el agua residual pretratada entra al lecho por un extremo del sistema y sale por el extremo opuesto.

En Europa se han construido varios cientos de humedales con flujo subsuperficial empleando suelo fino o suelo grueso y se considera que en este continente esta tecnología se está diseminando rápidamente. La mayoría de los sistemas construidos emplean como planta acuática emergente al carrizo (*Phragmites australis*) se debe señalar que en algunos sistemas se emplean otras especies de plantas locales. En la mayoría de los sistemas que se encuentran en operación en Dinamarca y Alemania se ha utilizado suelo como medio poroso; mientras que en el caso de América del Norte y Reino Unido la mayoría de los sistemas emplean grava. (Brix H, 1994)

El diseño actual de estos sistemas varían en los diferentes lugares donde son utilizados, la mayoría de los sistemas se construyen como sistema único de forma rectangular con una relación largo: ancho de 1:5. Algunos se construyen con una estructura semejante a un tejado con dos aguas, con inclinación a ambos lados y el agua residual se añade en la zona media para tratar de maximizar el área de la sección transversal de esos sistemas. Otros sistemas consisten de dos o más lechos

colocados en serie, pero es utilizado principalmente para reducir esos compuestos de fósforo precipitados.

Uno de los problemas que presentan los humedales con flujo subsuperficial horizontal, que emplean suelo, es su baja conductividad hidráulica, lo cual hace que se puedan producir flujos del agua residual por la superficie del lecho, reduciéndose así los tiempos de retención; este problema se ha podido resolver mediante el empleo de grava como medio poroso, no obstante, en ocasiones se ha observado problemas de obstrucciones en este tipo de sistemas lo cual se ha asociado al mal funcionamiento en el pretratamiento de las aguas residuales. Los sistemas que emplean grava tienen poca capacidad de adsorción de fósforo, de aquí que su remoción sea menor. En Alemania para tratar de mejorar este problema se ha empleado arenas enriquecidas con hierro, este tipo de medio tiene una conductividad hidráulica mayor que la del suelo y además permitir fijar el fósforo. (Netter and Bischofsberger, 1990).

Otros problemas es la transferencia de oxígeno por las raíces de las plantas, teóricamente se ha considerado que la concentración de oxígeno trasladado a las raíces es suficiente para satisfacer la demanda de oxígeno para la degradación aerobia de los contaminantes presentes en el agua residual incluyendo la oxidación del amonio a nitrato, sin embargo, estudios realizados demuestran que el oxígeno desprendido por las raíces son mucho menores que las cantidades necesarias para la degradación aerobia de los distintos contaminantes. (Brix H, 1994)

Los humedales con flujo subsuperficial horizontal son sistemas eficientes en la remoción de  $DBO_t$  y SST, sin embargo, no son eficientes en la remoción de nutrientes. En Inglaterra y Dinamarca se utilizan áreas de aproximadamente  $10 \text{ m}^2$  por PE y la calidad de los efluentes depende de la calidad del agua residual afluente, aunque se plantea que las eficiencias medias logradas son de: 91% para los 551; 89% para la DBO; 33% NT y 32% PI. (Brix H, 1994c). En la figura 21 podemos observar un humedal artificial de flujo subsuperficial.

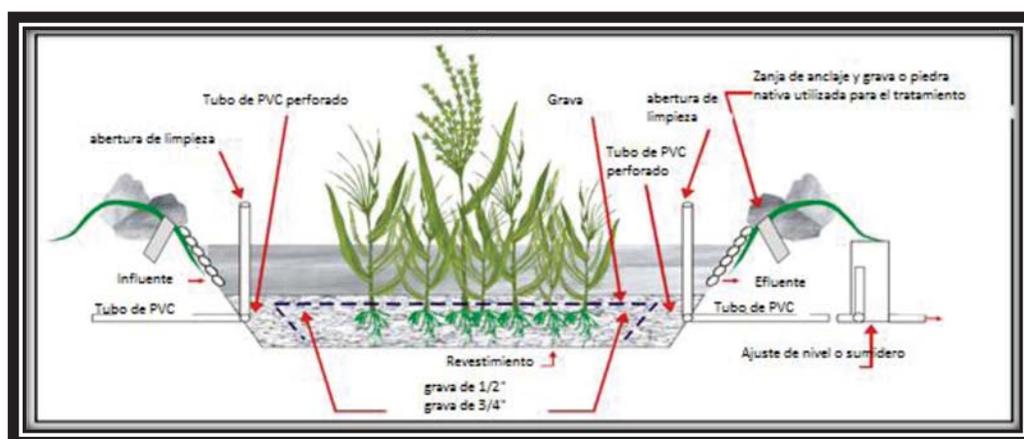


Figura 21. Sistema de flujo bajo la superficie. (Benefield, L.D. & C.W. Randall, 1980).

### 3.2.3.3. FLUJO VERTICAL Y SISTEMAS COMBINADOS

En los humedales con flujo vertical el agua residual se aplica uniformemente sobre la superficie del lecho y el efluente tratado sale por unos tubos perforados que se encuentran en el fondo del lecho, colocados paralelamente al eje longitudinal de éste. El criterio conceptual empleado para estos sistemas se basa en los trabajos de la Dra. Seidel (1953) y en la actualidad este tipo de sistemas es muy utilizado en varias partes de Europa.

Un sistema típico consiste de dos grupos o etapas, de celda con flujo vertical en serie seguido por una o más celdas con flujo horizontal, estas últimas con el objetivo de lograr el pulimiento de los efluentes. Cada grupo de celdas con flujo vertical consisten a su vez de varias celdas en paralelo, donde el agua se aplica continuamente y rotando entre las celdas, los sistemas que se encuentran en operación en Europa utilizan efluentes primarios y en algunos casos emplean directamente agua residual cruda. En estos sistemas el agua residual se dosifica durante 2 días y luego las celdas se mantienen secas por 4 a 8 días. El número de celdas en paralelo estará en dependencia de los ciclos de aplicación de aplicación que se vayan a utilizar. (Reed et al, 1995).

La principal ventaja de este tipo de sistemas radica en la restauración de las condiciones aerobias durante el periodo seco. Esto permite que la remoción de la  $DBO_t$  y de nitrógeno amoniacal se realice a mayor velocidad que la que se presenta en los sistemas con flujo subsuperficial horizontal, pues al estar estos últimos constantemente inundados las condiciones son más bien anaerobias. Como resultado de lo previamente establecido, para una calidad de efluente determinado, los lechos con flujo vertical pueden verse reducidos en área que los sistemas con flujo horizontal.

La carga hidráulica aplicada durante el periodo de dosificación del agua residual sobre los lechos de la etapa 1 es típicamente de 0.3 m/d para efluentes primarios y el doble para las celdas de la etapa II. En los sistemas con dos etapas pueden lograrse eficiencias en remoción de más del 90% para la  $DBO_t$  y los SST.

En los últimos años en Alemania se ha desarrollado un nuevo sistema con flujo vertical conocido como PHYTOPLT. El sistema consiste de un lecho multicapa al cual se le adiciona mediante un pulso automático, por un sistema de sifones, el agua residual sobre la superficie del lecho. El lecho consiste de cuatro capas, una capa filtrante superior con un espesor de 0.3 m donde son sembradas las plantas, una capa filtrante superior con un espesor de 0.4 m consiste en arena o grava con alta conductividad hidráulica, una capa filtrante intermedia con un espesor de 0.7 m con una conductividad hidráulica relativamente baja pero una alta capacidad de adsorción de fósforo y la capa filtrante más baja con un espesor de 0.4 m constituida por arena y grava. La diferencia en la conductividad hidráulica entre la capa intermedia del filtro y la capa del filtro que se encuentra más abajo se utiliza para la aireación automática de la capa más baja del filtro mediante un sifón que se encuentra conectado a la salida del sistema. Cuando el agua, que se encuentra en la capa del filtro más baja, es arrastrada por el sifón, el aire es chupado desde la atmosfera a través del sistema de drenaje y los tubos de aireación. Precisamente estas condiciones aerobias en la capa más baja hacen que favorezca la nitrificación, la combinación con sistemas con flujo horizontal permitiría la desnitrificación y así lograr una mayor eficiencia en la remoción de los nutrientes. El área considerada para este tipo de sistemas es de aproximadamente de 5 m<sup>2</sup> por persona equivalente. (Brix H. 1994c).

#### **3.2.3.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES CON FLUJO LIBRE Y FLUJO SUBSUPERFICIAL**

La depuración del agua residual en los humedales construidos se lleva a cabo, fundamentalmente, por la presencia de una población microbiana adherida a la superficie de las plantas en contacto con el agua residual y en el caso de los humedales con flujo subsuperficial se adiciona además los microorganismos adheridos al medio. Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos, la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. Por otra parte, debido a que el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros factores, además de proporcionar protección térmica, e hace que estos sistemas puedan ser utilizados en lugares donde ocurren grandes nevadas. (Reed et al., 1995; Wittgren and Maehlum, 1997). Sin embargo, a pesar de las ventajas antes expuestas, hay que señalar que los humedales con flujo subsuperficial tienen como desventaja el costo del medio utilizado, así como su traslado y colocación.

#### **3.2.4. COMPONENTES QUE FORMAN LOS HUMEDALES**

Los principales componentes del humedal que influyen sobre el proceso depurador que se lleva el efecto en los humedales construidos son los siguientes:

##### **3.2.4.1. El suelo y el medio**

En los humedales artificiales, el proceso de tratamiento del agua residual se lleva a cabo, fundamentalmente, por un complejo grupo de microorganismos adheridos a las raíces de las plantas, rizoma y sobre la superficie del medio.

En los sistemas con flujo libre, el agua fluye por encima de la superficie del suelo en el cual ocurre la mayor actividad microbiana asociada a la capa de detritos depositada, además de los microorganismos adheridos a la superficie sumergida de las plantas. Los suelos con algún contenido de arcilla son muy efectivos en la remoción de fósforo, ocurriendo el proceso de remoción en la matriz del suelo; sin embargo, se considera que este proceso tiende a un equilibrio después del primer año de funcionamiento del humedal. Por otra parte, los suelos arcillosos tienen cierta capacidad de intercambio iónico, lo que les permite remover, al menos temporalmente, el nitrógeno presente en el agua residual en forma de ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ); sin embargo, la mayoría de las veces esta capacidad se agota debido a que la superficie de contacto se encuentra bajo agua y las condiciones son anaerobias. (Reed et al, 1995).

En los sistemas con flujo subsuperficial, el medio puede ser suelo, arena o grava y los espacios libres del medio sirven como canales para el flujo del agua. Sobre la superficie del medio crece la masa de microorganismos semejantes a lo que ocurre en un filtro percolador, sin embargo, se considera que el crecimiento microbiano en estos sistemas no debe provocar obstrucciones como ocurre en los filtros percoladores. En el caso de los humedales con flujo subsuperficial horizontal, que emplean suelo, presentan un potencial de remoción de fósforo y amonio semejante al reportado en los sistemas con flujo libre. En los sistemas con flujo subsuperficial vertical, debido a que el flujo es intermitente, las condiciones aerobias se restauran periódicamente y el amonio

adsorbido por el suelo puede liberarse por la vía de la nitrificación bacteriana y los sitios de intercambio quedarían libres para futuras adsorciones. En los sistemas con flujo subsuperficial que emplean grava, la capacidad de remoción de fósforo es muy limitada.

#### 3.2.4.2. Plantas

Los humedales construidos se han utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o eneas (*Typha sp.*), la caña o junquillo (*Phragmites communies*), y los juncos (*Juncos sp.*)

Las plantas presentan varias propiedades que las hacen ser un componente indispensable en los humedales construidos. La función de mayor importancia de las macrófitas en relación con el proceso de tratamiento del agua residual es el efecto físico que ellas producen. Las macrófitas estabilizan la superficie del lecho, proporcionando buenas condiciones para la filtración, y en el caso de los sistemas con flujo vertical previenen la obstrucción y, proporcionan un área superficial para el crecimiento de los microorganismos adheridos. Contrariamente a lo que al principio se creía, el crecimiento de las macrófitas en los sistemas con flujo subsuperficial, no incrementa la conductividad hidráulica del medio en los sistemas que utilizan suelo. (Brix H, 1994).

En los humedales el suelo se encuentra saturado, lo que hace que los poros del suelo estén llenos de agua. Como la velocidad de difusión del oxígeno en el agua es lenta, los suelos se vuelven anaerobios, lo que hace que este ambiente no sea adecuado para el crecimiento de la mayoría de las especies vegetales. Sin embargo, las especies de plantas acuáticas emergentes tienen la capacidad de absorber de la atmósfera, a través de sus hojas y tallos que se encuentran por encima del agua, el oxígeno y otros gases que ellas necesitan.

Las plantas de los humedales están morfológicamente adaptadas a crecer en los sedimentos saturados de agua en virtud de los espacios internos de aire que ellas presentan para el transporte del oxígeno de las hojas hasta las raíces. El extenso sistema de lagunas internas, presentan constricciones a intervalos que le permiten mantener una estructura íntegra y resistir la invasión del agua. Este sistema de lagunas internas, dependiendo de la especie, puede ocupar más del 60% del volumen de tejido total. El movimiento interno del oxígeno hacia las raíces de las plantas no solamente sirve para la demanda de oxígeno que requieren las raíces para su respiración, sino que además permite la formación de una rizosfera oxidada alrededor de las raíces, pues a través de ellas fluye una cierta cantidad de oxígeno creando un ambiente aerobio, mientras que a su alrededor las condiciones son anóxicas, permitiendo de esta forma la descomposición aerobia de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Se ha estimado que estas plantas pueden transferir entre 0.02 y 12 g de oxígeno por día por cada metro cuadrado de área superficial del humedal, este amplio intervalo se debe a las diferentes técnicas experimentales utilizadas y en cierto modo a las variaciones estacionales. (Brix H, 1994)

Otra función importante de las plantas en los humedales es la toma de los nutrientes, así como otros constituyentes presentes en el agua residual; sin embargo, la cosecha de las plantas en los humedales no es usual debido, fundamentalmente, a los costos que esto provoca. La presencia de

las plantas en los humedales es esencial, pues en el caso de los sistemas de flujo subsuperficial, sus raíces son fuente fundamental de oxígeno y la presencia de sus hojas, tallos, raíces, rizomas y detritos regulan el flujo de agua y proporciona superficie para el crecimiento microbiano. En el caso de los humedales con flujo libre, las plantas limitan la penetración de luz y evitan el crecimiento de las algas.

### 3.2.4.3. Microorganismos que sedesarrollan en los humedales

En los humedales se desarrollan una gran variedad de organismos que abarcan desde microorganismos como bacterias y protozoos hasta pequeños animales; siendo las bacterias el grupo fundamental en el proceso depurador del agua residual. Como se ha explicado, los humedales son sistemas de tratamiento biológico del agua residual con biomasa adherida, presentando características semejantes a las de un filtro percolador. Como en todo sistema de tratamiento biológico, en los humedales se requiere de un sustrato para el desarrollo de los microorganismos responsables del proceso depurador y que el agua permanezca por un tiempo para que se desarrolle esta masa microbiana, además del sistema depende de una serie de factores ambientales, siendo los más importantes la disponibilidad del oxígeno y la temperatura.

### 3.2.4.4. Mecanismo de remoción y transformación de los constituyentes del agua residual

En los humedales artificiales, la remoción de indicadores de contaminación presentes en el agua residual se lleva a cabo por una variedad de complejos procesos físicos, químicos y biológicos, que en la mayoría de las ocasiones ocurren simultáneamente. En la tabla 8 se presentan los principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes del agua residual en los humedales.

**Tabla 8. Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales. (Brix H, 1993; Crites and Tchobanoglous, 1998).**

Constituyente del agua residual	Mecanismo de remoción
Sólidos suspendidos	Sedimentación/ Filtración
Materia orgánica biodegradable	Degradación microbiana(aerobia, anaerobia y facultativa) sedimentación/filtración
Nitrógeno	Amonificación seguida por la nitrificación-desnitrificación bacteriana
Fósforo	Porción en el suelo (reacciones de adsorción-precipitación con el aluminio, hierro, calcio y minerales de la arcilla en el suelo)
Metales pesados	Sedimentación Adsorción sobre la superficie de la planta
Patógenos	Sedimentación/Filtración Muerte Natural Radiaciones ultravioleta Excreción de antibióticos por las raíces de las plantas

### 3.2.5. PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales construidos pueden ser considerados como reactores biológicos de biomasa adherida y su funcionamiento para la remoción de la DBO y el nitrógeno puede estimarse de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón. Las relaciones básicas para los reactores con flujo pistón son las siguientes:

(Reed et al, 1995)

$$C = C_o e^{(-Kt)} \quad (1)$$

Donde:

C: Concentración del contaminante efluente. (mg/L)

Co: Concentración del contaminante influente. (mg/L)

K: Constante de velocidad de reacción de primer orden, dependiente de la temperatura. ( $d^{-1}$ )

t: Tiempo de retención hidráulica. (d)

El tiempo de retención hidráulica en los humedales puede calcularse usando la ecuación 2:

$$t = \frac{L*W*d*n}{Q} \quad (2)$$

Donde:

- L: longitud del estanque. (m)
- W: Ancho del estanque. (m)
- d: profundidad del agua en el estanque. (m)
- n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.
- Q: flujo promedio a través del humedal. ( $m^3/d$ )

Para determinar el flujo promedio se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Q_i + Q_e}{2} \quad (3)$$

Donde:

- Qi: Flujo influente; Qe: Flujo efluente

Para hacer un diseño preliminar usualmente se asume que  $Q_i$  y  $Q_e$  son iguales.  
Combinando las ecuaciones (1) y (2) se puede determinar el área superficial del humedal.

$$A_s = LW = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{Kdn} \quad (4)$$

Donde  $A_s$  es el área superficial del humedal ( $m^2$ )

El valor de  $K$  usado tanto en la ecuación (1) como en la (4) depende del tipo de contaminante removido y de la temperatura.

### 3.2.5.1. MODELOS DE DISEÑO PARA LA REMOCIÓN DE LA DBO

Todos los humedales construidos pueden considerarse como reactores biológicos con biomasa adherida y su funcionamiento puede ser descrito por una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón. Estudios realizados con trazadores demuestran que realmente el patrón de flujo no se ajusta totalmente a un flujo pistón ideal pero se acerca más a un flujo pistón que a una mezcla completa. En la práctica las condiciones de flujo no ideal pueden ser modeladas por una cinética de primer orden con dispersión axial o mediante el uso de un número de reactores en serie, completamente mezclados. (Kadlec et al, 1993)

### 3.2.5.2. HUMEDALES CONSTRUIDOS CON FLUJO LIBRE

A partir de datos obtenidos en sistemas que se encuentran en operación Reed et al, 1995 plantean que la ecuación (1) puede ser aplicada para el diseño de estos sistemas:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{(-K_t * t)}$$

Siendo

$$K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)} \quad (6)$$

El área superficial del humedal puede determinarse usando la ecuación (4)

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T dn} \quad (7)$$

- $K_T$ : Constante de velocidad de reacción de las ecuaciones (5) y (6) ( $d^{-1}$ )
- $d$ : Profundidad de diseño del agua en el sistema (m)
- $n$ : Porosidad del humedal. (0.65- 0.75)

La profundidad en estos humedales puede estar en un intervalo que va desde unos pocos centímetros hasta un metro.

El intervalo de profundidad típica de diseño para estos sistemas se encuentra entre 0.1 m a 0.46 m en dependencia de la época del año y de la calidad del agua esperada en el sistema.

Khight et al, 1993 propuso la siguiente ecuación basándose en un análisis de regresión aplicando los datos obtenidos en distintos sistemas en operación en Norte América.

$$C_e = (0.192)(C_o) + (0.097)(CH) \quad (8)$$

Donde:

- $C_e$ : DBO efluente (mg/L)
- $C_o$ : DBO influente (m/L)
- $CH$ : Velocidad de carga hidráulica. (cm/d).

Esta ecuación puede ser utilizada para predecir calidades de efluentes en humedales con configuraciones típicas y condiciones de temperatura ambiente semejantes a las de los lugares donde fueron obtenidas. Sin embargo, tiene como inconveniente que no incluye un factor de corrección para la temperatura.

Por otra parte, Crites and Tchobanoglous, 1998, plantean los criterios para el diseño de este tipo de sistemas establecidos en la tabla 9.

**Tabla 9. Criterios de diseño típico de los humedales con flujo libre u la calidad de los efluentes esperados. (Crites and Tchobanoglous, 1998).**

PARÁMETRO DE DISEÑO	UNIDAD	VALOR
Tiempo de retención	d	2-5 DBO 7-14 (N)
Velocidad de carga orgánica	K ha. d	< 110
Profundidad del agua	m	0.06-0.45
Tamaño mínimo	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> *d	5.3-10.7
Relación L:W		2:1 a 4:1
Control de mosquitos		Requerido
Intervalo de cosecha	Año	3-5/año
<b>CALIDAD ESPERADA EL EFLUENTE</b>		
DBO <sub>5</sub>	mg/L	<20
SST	mg/L	<20
NT	mg/L	<20
PT	mg/L	<5

### 3.2.5.3. HUMEDALES CONSTRUIDOS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL

En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos básicos de remoción son los mismos que para un sistema con flujo libre, sin embargo, en el sistema con flujo subsuperficial la velocidad de remoción puede ser mayor debido a que en este tipo de sistemas hay una mayor área superficial sumergida y por lo tanto presentará un potencial mayor para el crecimiento de los microorganismos adheridos. Según Reed et al, 1995 un metro cúbico de un lecho de un humedal conteniendo grava con tamaño de 275 mm presenta un área superficial de al menos 146 m<sup>2</sup>, además de la superficie que proporcionan las raíces; mientras que en un sistema con flujo libre con un volumen semejante pudiera contener entre 15 y 50 m<sup>2</sup> de área superficial utilizable.

Las ecuaciones planteadas (1-4) pueden aplicarse para un sistema con flujo subsuperficial y las únicas diferencias son la magnitud de la porosidad (n) y la constante de velocidad de reacción. Para los sistemas con flujo subsuperficial la porosidad varía con el tipo de medio usada en el sistema: En la tabla 10 se indican las características de los medios normales empleados en sistemas con flujo subsuperficial.

Tipo de medio	Tamaño efectivo D10(mm)	Porosidad n	Conductividad hidráulica (ks) m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10 000-50 000
Roca gruesa	128	38-45	50 000-250 000

Tabla 10. Características de los medios empleados en los sistemas con flujo subsuperficial.

La Ley de Darcy describe el régimen de flujo en un medio poroso y es aceptada para ser utilizada en el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Q = Ks * Ac * S \quad (9)$$

Donde:

- Q: Flujo promedio a través del humedal (m<sup>3</sup>/d)
- Ks: Conductividad hidráulica de un unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d).
- Ac: Área de la sección transversal perpendicular al flujo (m<sup>2</sup>)
- S: gradiente hidráulico o pendiente del lecho (como una fracción decimal).

El área de la sección transversal del lecho en el humedal puede ser calculada por sustitución en la ecuación de Darcy:

$$Ac = \frac{Q}{K_s * S} \quad (10)$$

Según Metcalf and Eddy, 1995 los humedales con flujo subsuperficial horizontal deben ser diseñados para que la velocidad de flujo definida por el producto ( $K_s * S$ ) no debe ser mayor de 6.8 m/d para minimizar el arrastre de la película biológica.

El ancho del lecho se calcula en función del área superficial y de la profundidad del lecho empleando la siguiente ecuación:

$$W = \frac{Ac}{d} \quad (11)$$

La profundidad del medio en los sistemas con flujo subsuperficial está directamente relacionada con la profundidad de penetración de las raíces y rizomas de las plantas, pues éstas son las que suministran el oxígeno al sistema. La penetración de las raíces de las principales plantas utilizadas en los humedales construidos se menciona en la tabla 11.

**Tabla 11. Penetración de las raíces de las plantas emergentes más utilizadas en los humedales con flujo subsuperficial**

Plantas emergentes	Penetración de las raíces en el medio
Juncos (Scirpus)	76 cm
Caña (Phragmites)	>60 cm
Espadañas o enneas (Typha)	30cm

El área de la sección transversal del lecho así como el ancho del mismo son independientes de la temperatura y de la carga orgánica ya que ellos son controlados por las características hidráulicas del medio.

Para el caso del valor de la  $K_{20}$  en los sistemas con flujo subsuperficial según Reed et al, 1995 esta constante presenta un valor de  $1.104 \text{ d}^{-1}$ , mientras que según Metcalf and Eddy, 1995 el valor de  $K_{20}$  depende del valor de la porosidad del medio, variando desde 1.84 para arena gruesa, hasta un valor de 0.86 para arena gravosa.

Los criterios de diseño propuestos por Crites and Tchobanoglous, 1998 aparecen en la tabla 12.

**Tabla 12. Criterios típicos para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial y la calidad de los efluentes esperados.**

PARAMETRO DE DISEÑO	UNIDAD	VALOR
Tiempo de retención	d	3-4
Velocidad de carga orgánica	Kg/ha*d	<110
Velocidad de carga de SST que entran	Kg/m2*d	0.04
Profundidad del agua	m	0.3-0.61
Profundidad del medio	m	0.46-0.76
Control de mosquitos		No se requiere
Esquema de cosecha		No se requiere
<b>CALIDAD ESPERADA PARA LOS EFLUENTES</b>		
DBO5	mg/l	<20
SST	mg/l	<20
NT	mg/l	<20
PT	mg/l	<5

### 3.2.6. PROCESOS DE REMOCIÓN DE LOS HUMEDALES

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son los antes citados, e incluyen sedimentación, precipitación química, absorción, e interacción biológica con la DBO y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda, se encuentra una fracción de la vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal. Los nutrientes y otras sustancias asociados a esta fracción refractaria se considera que son eliminados permanentemente del sistema.

En la figura 22 se pueden ver los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual, que incluye la filtración, degradación por bacterias adsorción, etc.

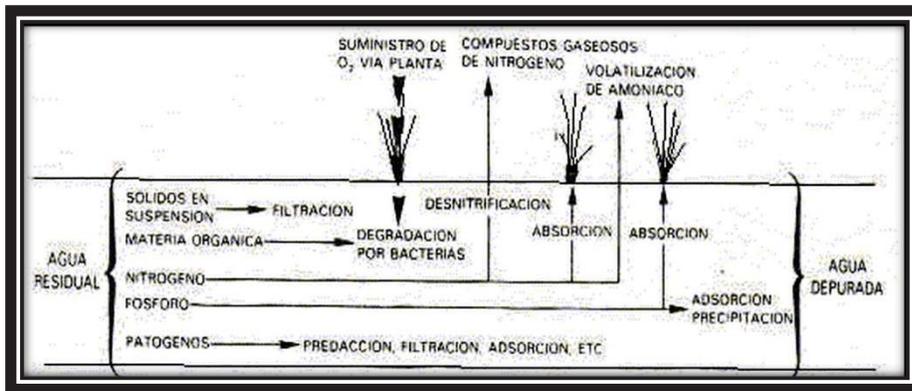


Figura 22. Proceso de depuración de los humedales artificiales

En la figura 23 se puede apreciar los valores típicos de concentración de entrada y salida de un sistema de humedales artificiales (Experiencia a escala piloto con un sistema de tipo subsuperficial, en Sídney, Australia). El análisis de la figura revela que los sistemas de plantas emergentes sembrados sobre arena gruesa pudieron reducir de forma significativa los SS, la DBO<sub>5</sub> y el nitrógeno. La remoción de fósforo es baja, lo cual es concordante con las experiencias de otros investigadores con sistemas basados en piedra y arena.

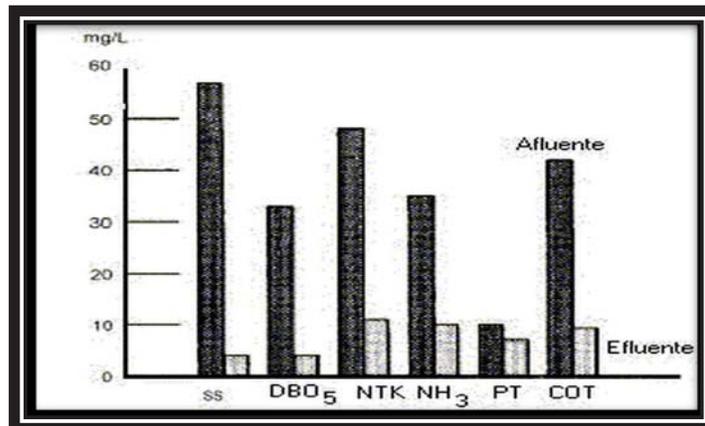


Figura 23. Rendimientos de remoción típicos en escala piloto, sistema tipo subsuperficial, Sidney, Australia.

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

- Materia orgánica (medida como DBO<sub>5</sub> y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (por ejemplo nitrógeno y fósforo)
- Patógenos y metales pesados.

Los humedales artificiales son referidos a menudo como “sistemas simples de baja tecnología”, pero los procesos implicados en este tratamiento están lejos de ser simples. Las actividades

ocurren en diferentes zonas dentro del “lecho del filtro”, siendo los siguientes componentes del sistema:

- Lecho de arena
- Zona radicular
- Detritus (material orgánico particular, como hojas secas)
- Poro de agua
- Poro de aire
- Plantas
- Raíces
- Biofilm: bacterias que crecen en la arena y están ligadas a las raíces

El proceso de tratamiento en el lecho de los humedales artificiales es el resultado de complejas interacciones entre todos estos componentes. Debido a esto, los humedales tienen diferentes espacios con condiciones de oxígeno que desencadenan los diversos procesos de oxidación y reducción de los contaminantes biodegradables. En la tabla 13 se muestra algunos ejemplos de los procesos de remoción de contaminantes en humedales de flujo subsuperficial.

**Tabla 13. Procesos de remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial. (Rustige y Platzer, 2001)**

Contaminantes	Proceso
Materia orgánica (MO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las partículas de MO son eliminadas por la sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO5 soluble</li> <li>- La MO soluble es fijada y adsorbida por el Biofilm y degradada por las bacterias adheridas en este.</li> </ul>
Sólidos suspendidos totales (SST)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentación y filtración</li> <li>- Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena.</li> </ul>
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nitrificación/Desnitrificación por el Biofilm</li> <li>- Absorción de las plantas</li> </ul>
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retención en el lecho de arena (adsorción)</li> <li>- Precipitación con aluminio, hierro y calcio</li> <li>- Absorción de las plantas (influencia limitada)</li> </ul>
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentación y filtración</li> <li>- Absorción por el Biofilm</li> <li>- Depredación por protozoarios</li> <li>- Eliminación de bacterias por condiciones ambientales desfavorables (temperatura y pH)</li> </ul>
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitación y adsorción</li> <li>- Absorción de las plantas (influencia limitada)</li> </ul>
Contaminantes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adsorción por el Biofilm y partículas de arena</li> <li>- Descomposición debido al largo del tiempo de retención y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable)</li> </ul>

El lecho del humedal actúa como filtro mecánico y biológico. Los sólidos suspendidos y los sólidos microbianos generados en el efluente son principalmente retenidos mecánicamente, mientras que

la materia orgánica soluble, es principalmente fijada o absorbida por el Biofilm. Toda la materia orgánica se degrada y se estabiliza dentro del lecho durante periodos prolongados de los procesos biológicos. El tratamiento biológico en el lecho del humedal se basa en la actividad natural de los microorganismos, principalmente de las bacterias aerobias y facultativas, que crecen en el Biofilm y que se adhiere en la superficie de las partículas de arena y raíces (Rustige y Platzer, 2001).

Los humedales artificiales de flujo superficial están diseñados para degradar la materia orgánica por tratamiento aerobio y anóxicos, pero no por tratamientos anaerobios, que sólo se producen en ausencia de oxígeno y nitrato y liberan biogás. Los procesos aerobios siempre necesitan de la presencia del oxígeno (aire), mientras que los procesos anóxicos se dan en condiciones de ausencia del oxígeno cuando el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se utiliza por ciertas bacterias que son capaces de desnitrificar y degradar la materia orgánica.

La presencia de zonas extensas anaeróbicas (sin oxígeno) en humedales, es un problema serio de operación, pues se obstruyen los poros del material filtrante y se acumula agua en la superficie. Humedales que entran en condiciones anaeróbicas no mantienen su eficiencia. Siempre se deben eliminar los caudales que generan este problema.

Comparado con otros sistemas de tratamiento, los humedales artificiales trabajan con baja carga, lo que posibilita la degradación de los contaminantes que son difíciles de degradar biológicamente. En el lecho se encuentran las bacterias especializadas que son naturales de los suelos, que crecen muy lento pero se mantienen en el sistema natural. Todo el material orgánico (SST), y la biomasa alimentan el proceso de degradación biológica, para finalmente reducirse por los procesos aeróbicos y anóxicos biológicos, resultan componentes inorgánicos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , y  $\text{N}_2$ .

También los componentes que no son biodegradables, como los metales pesados pueden fijarse, hasta cierto nivel, en el lecho de filtración. Las plantas también pueden contribuir a la captación de los metales pesados. La razón fisiológica por la cual las plantas pueden absorber los metales pesados aún no es claro y probablemente depende fuertemente de la especie de planta. Se debe tener claro que los metales pesados no son un problema del agua residual domestica ni en las aguas grises. (Rustige y Platzer, 2001)

### **3.2.7. REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES**

Las eficiencias de remoción del tratamiento de las aguas grises en los dos tipos de humedales artificiales se resumen en la tabla 14. Es evidente que en los humedales de flujo vertical y horizontal existen diferentes relaciones de eliminación de los indicadores de contaminación. La relación de eliminación de la  $\text{DBO}_5$  y los SST son hasta un 99%, mientras que la remoción total del nitrógeno el porcentaje es menor, hasta un 40% (pero superior en los sistemas híbridos). Se espera que las remociones del tratamiento de agua residual doméstica sean similares.

**Tabla 14. Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal y de flujo vertical para el tratamiento de aguas grises. Nota: Los valores son similares para el tratamiento de aguas residuales**

CONTAMINANTES	HFH (Morel y Diener, 2006)	HFV (Ridderstolpe, 2004)
DOB5	80-90%	90-99%
SST (Sólidos totales)	80-95%	90-99%
NT (Nitrógeno total)	15-40%	30%
PT (Fósforo total)	Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.	

domésticas.

### 3.2.7.1. REMOCIÓN DE NUTRIENTES

El crecimiento de las plantas conduce a la eliminación de nutrientes tales como el nitrógeno y fósforo: La reducción de amoníaco y fosfato del agua residual domestica por el crecimiento de las plantas es alrededor del 10-20% durante el periodo de vegetación. Sin embargo los procesos más importantes para la eliminación del nitrógeno son la nitrificación/desnitrificación, procesos llevados a cabo por bacterias específicas que dependen del tiempo de retención del sistema, el contenido de oxígeno y materia orgánica.

#### Remoción del nitrógeno:

- *Humedales de flujo horizontal.* Si el transporte de oxígeno en un humedal es limitado, la nitrificación también será limitada. En cambio, la desnitrificación puede ser muy eficiente, incluso con niveles muy bajos de carbono en relación al nitrógeno (Platzer, 1999). El nitrato producido se puede reducir en condiciones anóxicas por bacterias heterotróficas de nitrógeno (N<sub>2</sub>), a esto se le conoce como desnitrificación.
- *Humedales de flujo vertical:* Con suficiente suministro de oxígeno, en el humedal de flujo vertical, el amoníaco puede ser oxidado por bacterias autotróficas en nitrato, proceso conocido como nitrificación. Una nitrificación casi completa que se alcanza con la oxidación del amoníaco al 90% es comúnmente reportado en el humedal de flujo vertical. Sin embargo la nitrificación depende en gran medida del suministro de oxígeno. Para el dimensionamiento es fundamental calcular el consumo de oxígeno en el humedal (Platzer, 1999; Cooper 2005; Platzer et al., 2007). Por otra parte, el humedal de flujo vertical no proporciona una buena desnitrificación, ya que el nitrógeno se mantiene como nitrato en el efluente, siendo la relación de eliminación del nitrógeno total solo alrededor de un 30%.
- *Combinación:* Cuando se requiere eliminar el nitrógeno, se puede utilizar una combinación de un humedal de flujo vertical, seguido de un humedal de flujo horizontal con recirculación del flujo.

### **Remoción del Fósforo:**

La mayoría de los humedales artificiales no son diseñados para la eliminación de fósforo. Si el exceso de fósforo, en la entrada los cuerpos de agua tales como lagos y ríos, se convierte en un problema importante, la primera medida a tomar podría ser prohibición de detergentes que contengan fósforo, como se ha hecho por ejemplo en Suiza.

Aún no ha sido desarrollado un modelo fiable para la eliminación del fósforo, aunque muchos de los humedales de flujo superficial presentan una tasa relativamente alta eliminación del fósforo durante un periodo determinado. La eliminación del fósforo se puede conseguir en los humedales por adsorción y precipitación, como se mencionó previamente y solo una pequeña cantidad es captada por el crecimiento de las plantas. (Rustige y Platzer, 2001)

Se estima que es posible remover hasta un 10% el fósforo por el crecimiento de las plantas; pero esto también depende del tipo de clima, del tipo de planta, de la concentración del agua residual, etc. La capacidad de unión química del fósforo, así como su eficiencia de remoción, disminuye durante la vida útil del humedal de flujo superficial. Debido a los sitios de adsorción limitados de la arena.

Si la eliminación del fósforo es necesaria, se puede utilizar aguas debajo del humedal de flujo superficial un filtro independiente de suelo sin plantar, donde el sustrato puede ser reemplazado una vez que alcanza su capacidad de adsorción del fósforo. El intercambio del sustrato es teóricamente posible en los humedales de flujo superficial pero en la práctica no es económicamente viable.

## 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se verá el desarrollo del proyecto, el cual se llevó a cabo mediante una serie de visitas a la localidad El Alberto que sirvieron para realizar el muestreo del agua residual y así determinar las características físico-químicas del agua residual, el gasto de diseño, el levantamiento topográfico del terreno a utilizar para la planta de tratamiento y la toma de muestras para el estudio de mecánica de suelo.

### 4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SITIO DE ESTUDIO

La comunidad El Alberto se localiza en el municipio de Ixmiquilpan en el Estado de Hidalgo, se encuentra ubicado en el sur del Estado, en la región del Mezquital (figura 24). Los indígenas Hñahñu (más conocidos como otomíes) fueron los primeros habitantes de la zona, ya que estratégicamente representa un paso importante entre las áridas llanuras del norte de México y los Valles fértiles del sur, y hasta la fecha aún se mantienen aquí.

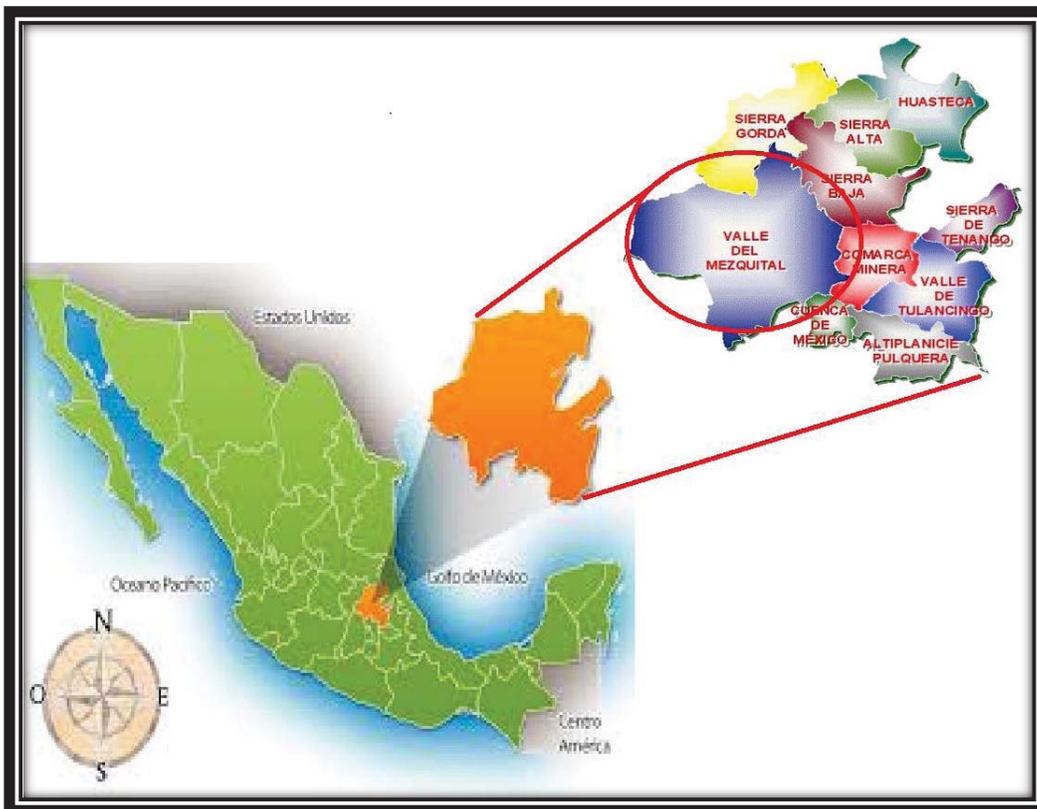


Figura 24. Localización del Valle del Mezquital en México. Fuente: Elaboración Propia.

Sus actividades económicas son la agricultura, la ganadería de autoconsumo y el turismo, y principalmente las remesas de los familiares que se ven en la necesidad de emigrar hacia los

Estados Unidos en busca de empleo (INEGI, 2010). Su lengua, el Hñahñu u otomí, es utilizada con frecuencia como un aspecto de reafirmar su identidad cultural (Quezada, 2008).

El agua importada proveniente de los canales de riego, como su nombre lo dice, se usa para la agricultura según las especificaciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996. En cuanto a la fuente local de agua de manantiales, se extrae en siete puntos y se ocupa para uso doméstico, turístico y de alimentación según la NOM-127-SSA1-1994.

La comunidad cuenta con un proyecto eco-turístico llamado “Parque EcoAlberto”, en el cual se llevan actividades de recreación acuática, una de ellas como el kayakismo la cual se desempeña en el Río Tula en la sección que llaman “Gran Cañón” y la presencia de albercas en la sección del “Parque Acuático”, donde se cuenta con una serie de albercas con agua termal (38-40 °C), así como servicio de regaderas, sanitarios y áreas verdes.

Desde hace cinco años, su planta ubicada en la comunidad, potabiliza agua de un manantial que cuenta con líquido de buena calidad, a pesar de brotar a unos cuantos metros del principal efluente del Valle, el Río Tula. Una vez potabilizado el líquido, dos pipas recorren la región Hñahñu recargando 140 tanques de distribución.

#### **4.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

La comunidad tiene las siguientes coordenadas geográficas, 20° 29" latitud norte, 99° 13" latitud oeste y se encuentra ubicado a 1,700 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Una de las principales vías de comunicación es la Carretera Nacional 85 que va de la ciudad de México a Ciudad Victoria y a Nuevo Laredo, que comunica con El Arenal, Actopan, El Tephe, Ixmiquilpan, Tasquillo y Zimapán, Hidalgo.

Las comunidades del Valle del Mezquital tienen acceso a las carreteras federales libres, a la estatal de cuota y a la de terracería, aunque los poblados más lejanos utilizan veredas. En la comunidad de Panales hay una pista de aterrizaje para avionetas.

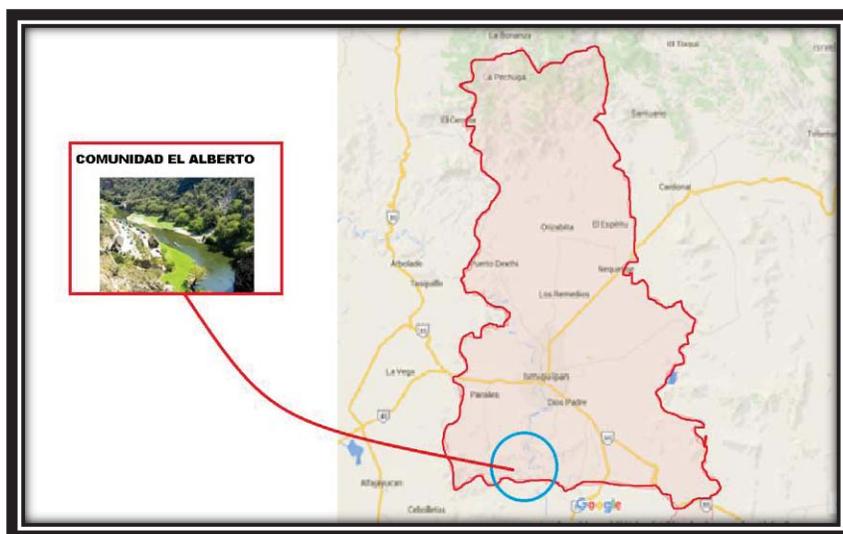


Figura 25. Ubicación de la comunidad El Alberto en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México. Fuente: elaboración Propia.

### 4.3. CLIMA

Geográficamente se distinguen tres zonas climáticas primordiales en el estado de Hidalgo:

- Zona de climas cálidos y semicálidos de la Huasteca Hidalguense
- Zona de climas templados de la Sierra Madre Oriental y Eje Neo volcánico
- Zona de climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental y Eje Neo volcánico.

Climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental: las tres variantes de este grupo climático se diferencian por el régimen térmico y el grado de humedad. Se concentran al oeste del estado, desde Ajacuba hasta Tecozautla; otros forma un corredor en dirección noroeste-sureste, desde Tlahuiltepa hasta Tulancingo, siguiendo el curso de los ríos Tulancingo y Tizahuapan.

El clima presente en el área de estudio es seco semicálido con lluvias en verano; se manifiesta en la mayor parte del municipio de Ixmiquilpan, donde cruza el río Tula. En temperaturas, La comunidad de El Alberto ha registrado 9°C bajo cero a principios de año, mientras que a la sombra, en el mes de mayo, llega a registrar 38 °C. Su temperatura anual promedio es de 18 °C. En la figura 26 nos muestra los diferentes climas que predominan en el estado de Hidalgo. (INEGI, 2010)

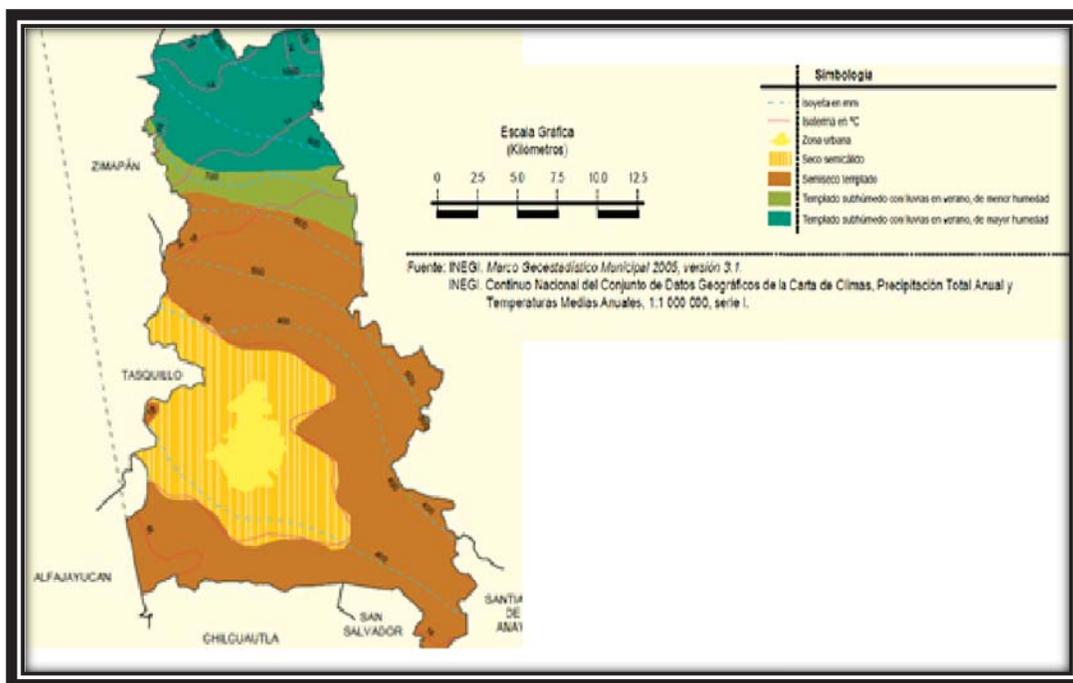


Figura 26. Clima en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México. Fuente: INEGI, 2010

**Tabla 15. Temperatura en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo.**

Mes	Temperatura Media Normal (°C)	Temperatura Máxima Normal (°C)	Temperatura Mínima Normal (°C)	Precipitación normal (mm)	Evaporación Total Normal (mm)
ENERO	13.6	23.5	3.7	8.2	69.1
FEBRERO	15.2	25.8	4.6	11.4	91.6
MARZO	17.6	28.4	6.7	7.3	134.1
ABRIL	20.1	30.6	9.6	21.4	160.4
MAYO	21.4	30.9	11.9	39.8	170.6
JUNIO	21.1	29.1	13.2	55.7	161.7
JULIO	20.3	27.7	12.9	51.0	155.3
AGOSTO	19.9	27.6	12.3	45.0	151.8
SEPTIEMBRE	19.3	26.3	12.4	65.8	116.9
OCTUBRE	17.5	25.6	9.5	32.0	93.8
NOVIEMBRE	15.3	24.6	6.1	8.2	69.1
DICIEMBRE	14.1	23.6	4.5	3.6	71.2
ANUAL	18.0	27.0	9.0	349.4	1,445.6

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Estación 100013013 IXMIQUILPAN

De la tabla anterior, se observa que la temperatura más baja se registra en el mes de Enero con un valor de 3.7 °C y la más alta se tiene en el mes de Mayo con un valor de 30.9 °C.

CLIMA	Seco semicálido
Temperatura media anual	18°C
Precipitación media anual	349.4 mm

#### 4.4. SUELO

En el valle del Mezquital, el subsuelo se encuentra constituido por aluviones intercalados con sedimentos lacustres y coladas de basalto, se llevaron a cabo 34 pruebas de bombeo (Kruseman y Ridder, 1994). La mayor parte presenta valores de transmisibilidad de alrededor de  $0.5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, por encontrarse en rocas basálticas. Con base en los datos de censo, se elaboró la configuración de la profundidad. Respecto a la configuración de la elevación del nivel estático para el año 2007, se presentan curvas de 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm), las cuales disminuyen paulatinamente en dirección al norte hasta los 1980 msnm, indicando un flujo subterráneo de sur a norte. Mediante la piezometría se diferenciaron dos horizontes acuíferos. Uno con nivel estático somero (7-8m) y otro con nivel a mayor profundidad (40-50 m). Más adelante, en este mismo capítulo, se muestran las pruebas de mecánica de suelo que se hicieron del lugar en estudio para la comparación de lo que nos marcaba la teoría.

#### 4.5. DATOS POBLACIONALES

##### - POBLACIÓN ACTUAL

Es de gran importancia definir la población del trabajo, para esto es conveniente mencionar las bases de análisis bajo el cual se establece la población actual y la población futura de la localidad.

La comunidad de El Alberto, desde sus primeros censos realizados muestra una secuencia descendiente y no significativa, por lo tanto nos enfocaremos en los censos donde los números empezaron a ser representativos, siendo este censo en el año 2005 cuando contaba con 540 habitantes.

La tasa de porcentaje nos muestra que hasta el año 2005, la población incremento apenas un 0.72% en relación con el censo de población. De acuerdo al censo que se llevó a cabo en el año 2010, por parte del INEGI, la población que hay actualmente en la comunidad El Alberto es de 834 habitantes. Este conteo nos indica que la población ha incrementado en la última década y siendo este porcentaje muy corto para tener un parámetro real, analizaremos la población desde una perspectiva diferente, valorando datos de dependencias que tienen control de la localidad.

##### - POBLACIÓN FUTURA

La definición de la proyección a futuro de un proyecto se enfoca al periodo de vida de la obra, en los casos de las plantas de tratamiento de agua residual, el periodo promedio de vida útil es de 15 a 30 años, dependiendo del uso y ubicación que se le otorgue. El proyecto de la planta de tratamiento tomaremos un periodo promedio de 20 años.

Proyectando entonces la población en base al último dato obtenido, tenemos que para el año 2030 la localidad de El Alberto contará:

$$\text{Población de proyecto (2030)} = Pa (1+r)^t$$

Donde:

- Pa = Población actual
- r = Tasa de crecimiento Medio Actual
- n = Número de años de proyecto

De ahí:

$$\text{Población de proyecto (2030)} = 834 (1 + 0.08)^{20}$$

$$\text{Población de proyecto (2030)} = \mathbf{3888 \text{ habitantes}}$$

Finalmente, proyectamos nuestra planta de tratamiento con una población con base en los métodos anteriormente presentados como pleno respaldo en cuanto a un valor definido para diseño con la población de proyecto de: 1,068 habitantes.

Pero debido a que no se tiene un control en la red de drenaje de la comunidad y con la ayuda del aforo que se hizo, nos basamos en el número de personal equivalente (usuarios).

## **PLANEACIÓN PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO**

La planeación es una fase esencial antes del diseño y la construcción del sistema de depuración. Los humedales pueden diseñarse en distintas formas y con tratamientos preliminares diversos según la meta de depuración. Puede haber muchos sitios disponibles para la construcción de las estructuras y se debe elegir el que mejor se adapte a los objetivos planteados. Existe también una gran variedad de plantas nativas que pueden elegirse. Cada sitio es único y el diseño de los humedales artificiales debe ser específico para cada sitio.

Con respecto a los objetivos planteados, es determinante definir el uso que se le dará al efluente de agua tratada, porque con base en ello se plantean las metas de depuración, que son indispensables para realizar los cálculos de diseño. Debe utilizarse las características de un humedal natural como un modelo para el humedal artificial, modificado para cubrir las necesidades de depuración.

En la fase de planeación se incluye la caracterización cuantitativa y cualitativa del agua residual que será tratada. Deberán de conocerse las normas que existan en cuanto a los límites máximos permisibles de contaminantes en el agua para los diferentes usos y para las descargas en cauces. En la planeación se debe considerar el tipo y la configuración de las estructuras, así como los criterios de diseño que se deben cumplir para el detalle ingenieril. El factor económico influye en la superficie que se va utilizar, ya que entre mayor sea el área, se va requerir de más recursos económicos para su construcción. También debe definirse el tipo de material impermeabilizante y los medios de conducción del agua a través del sistema, así como la vegetación.

Un humedal artificial debe estar diseñado para aprovechar las características naturales del sitio y para minimizar su alteración. La forma de los humedales está determinada por la topografía existente, la geología y la disponibilidad de terreno. El número de celdas depende de la topografía, hidrología y de los requerimientos de la calidad de calidad del agua. También debe preverse la posible ampliación de las estructuras en el futuro.

Un buen diseño se adecua a las características del sitio y reduce el movimiento de tierra, aumentando el atractivo visual del ambiente. Las celdas y los canales pueden seguir los contornos naturales de la topografía del terreno. Se puede establecer distintos tipos de vegetación en los alrededores de un humedal artificial para reducir la erosión por movimientos de tierra y para mejorar el aspecto ambiental.

#### **4.6. SELECCIÓN DEL SITIO**

Una buena ubicación puede ahorrar costos importantes. La selección del sitio debe considerar el uso actual del suelo y la accesibilidad, la disponibilidad de terreno, la topografía del lugar, el tipo de suelo, la presencia de viviendas, los recursos ambientales del sitio y sus alrededores, y los posibles efectos en parcelas o viviendas vecinas. El sitio debe estar situado lo más cerca de la fuente del agua residual en la medida de lo posible, y aguas abajo para que el agua pueda moverse a través del sistema por gravedad.

Un sitio ideal para la construcción de un humedal artificial considera lo siguiente:

- Estará convenientemente ubicado cerca de la fuente del agua residual que será tratada
- Proveer de un espacio adecuado para la construcción de todos los componentes
- El terreno debe tener una pendiente suave donde el agua puede fluir por gravedad
- Presentar un tipo de suelo arcilloso lo suficientemente compacto para minimizar las filtraciones
- No encontrarse en un área inundable
- Que la superficie del terreno no contenga especies amenazadas o en peligro de extinción
- Que la superficie del terreno no contenga monumentos históricos, o viviendas habitadas muy cercanas

Por ello, la ubicación del sitio de muestro se tuvo que establecer una zona estratégica en la localidad, esto debido a que no se cuenta con información exacta de la red de alcantarillado, se siguió la recomendación de una comitiva local con conocimiento de los puntos donde convergía en mayor número de usuarios conectados a la red.

El lugar de muestreo, denominado “Potabilizadora”, se ubica en las coordenadas geográficas: latitud 20° 25' 6.7" N y longitud 99° 13' 54.9" O, este lugar fue nombrado así debido a la estructura que se encuentra en el sitio. En la figura 27 y 28 se muestra la localización del sitio de muestreo y el balneario que forma parte del parque EcoAlberto, así como una memoria fotográfica de este punto.



Figura 27. Localización del punto de muestreo. Fuente: Propia.



Figura 28. Sitio de aforo. Fuente: Propia

#### 4.7. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

En los estudios de planeación se considera la siguiente clasificación de las pendientes del terreno en relación a su factibilidad de desarrollo:

**MÁS APTA** (del 0 al 5%). Calificada de inclinación buena ya que no presenta problemas en cuanto al tendido de redes de drenaje, vialidad y construcciones en general.

**REGULAR** (del 5 al 15%). Calificada de inclinación regularmente adecuada por que presenta progresivamente algunas dificultades en instalaciones y costos.

**NO APTA** (mayor al 15%). Calificadas de inadecuadas por las dificultades para el extendido de redes y altos costos de construcción.

Según la clasificación anterior, casi en la totalidad de los asentamientos originales de la localidad se tienen terrenos aptos para el desarrollo de la planta de tratamiento de agua residual, teniendo que aumentar sus pendientes hacia el lugar más apropiado para los fines de reúso. Sin embargo hubo inconvenientes en cuanto al sentido de que los terrenos disponibles no son como tal de la comunidad, sino que son propiedad privada de la misma gente de la comunidad de El Alberto, sin embargo, estos no estuvieron dispuestos a donarlos. Con un primer pero no están dispuestos a donarlos.

Los levantamientos para la planta de tratamiento, se realizaron con cinta métrica, GPS, estacas, hilo y cal para marcar las posibles opciones donde podría quedar mejor ubicada la planta de tratamiento. El área aproximada de la planta de tratamiento es de 160 m<sup>2</sup> por lo que en cuestión de área no se presentó ningún inconveniente. En la figura 29 se muestra como se realizó el levantamiento.



Figura 29. Marcación del terreno con hilo y estacas.

Con un primer terreno (figura 30) se hizo el levantamiento del terreno; aunque durante el proceso de construcción de la planta se vieron en la necesidad de detener la obra debido a que el acuífero superficial era muy somero. Ya se tenía un terreno favorable y con los requerimientos necesarios se hizo el levantamiento del terreno; aunque en el proceso de construcción se vieron en la necesidad de detener la obra debido a que el acuífero superficial era muy somero y esto afectó la calidad de entrada del agua de la planta potabilizadora que se encuentra adjunta. Por lo tanto, en una segunda revisión se optó por usar los terrenos disponibles, aunque éstos no fueran los más favorables, ya que se incurrirá en un alto costo de construcción. En la figura 31 se muestra el segundo terreno que se donó para la planta de tratamiento.



Figura 30. Primer Levantamiento para la planta de tratamiento.



Figura 31. Segundo terreno, sitio donde se ubicará la planta de tratamiento

Las aguas negras de la localidad El Alberto llegarán a la planta de tratamiento por medio de un colector que recoge el agua residual proveniente de las viviendas de la comunidad, para después ser conducida a la planta de tratamiento. Es por eso que el levantamiento topográfico resulta de vital importancia para la planeación del proyecto.

#### - TERRENO PARA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA.

El tamaño del terreno disponible (de aproximadamente de 2000 m<sup>2</sup>) parece adecuado a las necesidades de acuerdo a las diversas alternativas de tratamiento. La topografía del terreno es combinada, con una parte plana (1200 m<sup>2</sup>) y otra con una pendiente considerable (25%), lo **que puede traducirse en proponer diferentes sistemas de reúso, tratando de utilizar al máximo los sistemas por gravedad y de fácil mantenimiento y operación.**

Como se mostró en la Figura 31, el terreno cuenta con una pendiente (25%) no muy apta para la construcción de la planta de tratamiento, por lo que están optando por hacer movimiento de tierras para tener un terreno que cuente con las condiciones necesarias (pendiente del 5%) para la planta de tratamiento y que sea un sistema que funcione por gravedad.

## 4.8. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Los estudios que se le realizaron a la muestra de suelo de la comunidad El Alberto, fueron realizados en el laboratorio de mecánica de suelos “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Estas pruebas condujeron con la finalidad de establecer las propiedades mecánicas e hidráulicas del mismo. Las pruebas incluyeron la determinación de su granulometría, la permeabilidad, el contenido de agua y los límites de consistencia. A continuación se describe la metodología utilizada en cada una de ellas.

### 4.8.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

La finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo tomada en el área donde quedaría la planta de tratamiento. Para ello se determinó su clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

Para suelos con tamaño de partículas mayores a 0.074 mm. (Micrones) se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración indicado en la tabla 16. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

**Tabla 16. Numeración y abertura de tamices.**

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3 "	80	76.12	GRAVA
2 "	50	50.80	
1 ½ "	40	38.10	
1 "	25	25.40	
¾ "	20	19.05	
3/8"	10	9.52	
N° 4	5	4.76	ARENA GRUESA
N° 10	2	2.00	ARENA MEDIANA
N° 20	0.90	0.84	
N° 40	0.50	0.42	
N° 60	0.30	0.25	ARENA FINA
N° 140	0.10	0.105	
N° 200	0.08	0.075	

ASTM: American Society for Testing Materials; Nch: Norma chilena Oficial; FUENTE: Espinace R., 1979

El equipo necesario se muestra a continuación:

- Un juego de tamices normalizado según la tabla anterior.
- Dos balanzas con capacidades de superiores a 20 kgs. Y 200 grs. y precisiones de 1 gr. y 0.1 gr. Respectivamente.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- Herramientas y accesorios. Bandejas metálicas, espátulas, recipientes plásticos y escobillas.

### **Procedimiento**

Se homogenizó cuidadosamente el total de la muestra en estado natural (desmenuzándola con un mazo), tratando de evitar romper sus partículas individuales, específicamente si se trata de un material blando, piedra arenosa u otro similar.

Se redujo por cuarteo una cantidad de muestra levemente superior a la mínima recomendada según el tamaño máximo de partículas de árido, indicando en la tabla 17.

**Tabla 17. Cantidad mínima a ensayar según tamaño de partículas. Fuente: Geotecnia LNV., 1993.**

Tamaño máximo de partículas (mm)	Cantidad mínima a ensayar (kgs.)
5	0.50
25	10.0
50	20.0
80	32.0

Se sacó el material a temperatura ambiente, hasta conseguir pesadas consecutivas constantes en la muestra cada 30 minutos. Cuando este secó, se obtuvo la cantidad mínima recomendada (Mt) a ensayar según la tabla anterior.

Inmediatamente obteniendo el tamaño de muestra a ensayar, se separó mediante el tamiz 3/8" ASTM (10 mm.) la fracción retenida en este tamiz, se pesa y se lava con el fin de eliminar todo material fino menor a 0.074 mm. Para esto, se remojó el suelo en un recipiente con agua hasta que las partículas más finas se soltaron, enseguida se lavó el suelo colocando como filtro la malla N° 200 ASTM (0.08 mm), hasta observar que el agua utilizada salga limpia. El material retenido en la malla se deposita en una bandeja y se coloca a horno durante 24 horas. Cumplido el tiempo de secado y una vez enfriada la muestra, se pesó (Mf) y por diferencia con respecto a Mt se obtuvo el material fino por lavado.



Figura32. Muestra de suelo a utilizar para obtener la granulometría del suelo.

A continuación, se deposita el material en la criba superior del juego de tamices, los que deberán encontrarse limpios y ordenados en forma decreciente hasta la criba 3/8. El juego deberá contar de una tapa en la parte superior y una bandeja de residuos en la inferior, tal y como se muestra en las figuras 5.10 y 5.11.



Figura 33. Juego de mallas



Figura 34. Colocación del material sobre el juego de mallas

Se hace el vibrar el conjunto durante 15 minutos (figura 35), tiempo después del vibrado se registra el peso del material retenido en cada tamiz.



Figura 35. Vibrado del material

#### 4.8.2. CÁLCULOS Y GRÁFICOS

- De acuerdo a los valores de los pesos retenidos en cada tamiz, registrar los siguientes datos en la hoja de cálculos:
- Porcentaje retenido en cribas (%RC):

$$\% RC = \frac{PRC}{Mt} * 100 (\%)$$

Donde:

- ✚ PRC= peso retenido en cada criba (grs.)
- ✚ Mt= peso total de la muestra seca (grs.)

- Porcentaje retenido en mallas (%RM):

$$\% RC = \frac{PRM * K}{500} * 100 (\%)$$

Donde:

- ✚ PRM= peso retenido en cada malla (grs.)
- ✚ K= porcentaje de muestra que pasó el tamiz 3/8"
- ✚ 500= peso de la muestra representativa (grs.)

- Porcentajes retenidos acumulados, suma acumulativa de los porcentajes retenidos en cribas y mallas.
- Porcentaje que pasa, los que consisten en restar al 100% el porcentaje retenido acumulado en las cribas y mallas
- Calcular el porcentaje de pérdida (%P) para cada fracción de material, mediante la siguiente expresión:

$$\%P = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} * 100 (\%)$$

Donde:

- $M_1$ = peso del material (grava o arena) a ensayar (grs.)
- $M_2$ = sumatoria de pesos retenidos (grs.)
- Graficar la curva granulométrica, donde la ordenada será el porcentaje que pasa en peso en cada tamiz en escala natural y la abscisa el tamaño (diámetro equivalente) de las partículas en escala logarítmicas. De esta curva se obtiene el porcentaje de gravas, arenas, finos y diámetros mayores a 3" del suelo.
- Calcular el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), el cual es una medida de uniformidad (graduación) del suelo y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ), el cual es un dato complementario para definir la uniformidad de la curva, mediante las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} * D_{10})}$$

Donde:

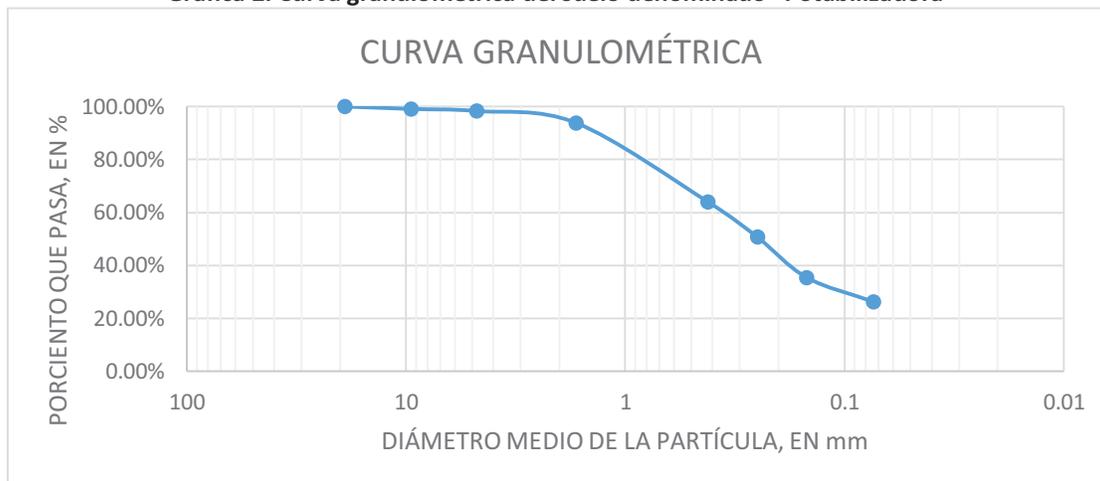
$D_{10}$ = tamaño donde pasa el 10% del material

$D_{30}$ = tamaño donde para el 30% del material

$D_{60}$ = tamaño donde pasa el 60% del material

En la gráfica 2 se muestra la curva granulométrica obtenida en éste análisis.

**Gráfica 2. Curva granulométrica del suelo denominado “Potabilizadora”**



#### **4.8.3. PERMEABILIDAD**

El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad del agua a través de un suelo, expresando esta, en cm/seg. Esta prueba tiene aplicaciones en los materiales que se emplearan en la construcción de la planta de tratamiento. Debido a que la permeabilidad nos muestra que tan poroso o impermeable es nuestro suelo.

Equipo y materiales que se utilizaron:

- Permeámetro de carga constante
- Termómetro
- Cronometro
- Flexómetro
- Agua
- Muestra de suelo

#### ***Procedimiento***

Se introdujo la muestra de suelo en el permeámetro.

Se midió la longitud (L) y área de la muestra de suelo (A).

Se tapa el permeámetro, sellándolo perfectamente para evitar fugas de agua.

Se vierte agua en la bureta hasta la marca de 0 ml, la que debe estar conectada al permeámetro por medio de una manguera de plástico.

Se midió la carga hidráulica inicial, desde el momento que se establezca el flujo de agua. La carga hidráulica inicial queda comprendida desde la superficie libre del agua contenida en la bureta hasta el orificio de salida del permeámetro.

Dependiendo de la permeabilidad del suelo que se estudió, se fijó el tiempo de prueba; en algunos casos, la carga hidráulica final se toma hasta las 24 hrs. de iniciada la prueba.

Se obtuvieron los datos antes descritos y se aplicó la fórmula:

$$Kt = 2.3 \frac{La}{At} \log\left(\frac{H_0}{H_1}\right)$$

Donde:

a= área de la columna de agua, en cm<sup>2</sup>

H<sub>0</sub>= carga hidráulica inicial, en cm

H<sub>1</sub>= carga hidráulica final, en cm

T= tiempo de prueba, en seg.



Figura 36. Permeámetro utilizado en el laboratorio

#### 4.8.4. LÍMITES DE CONSISTENCIA

El objetivo de esta prueba es determinar los límites: líquido y plástico. El límite líquido y el límite plástico se emplean para clasificar un suelo, de acuerdo a su plasticidad.

El material que se utilizó para esta prueba fue:

- Copa de Casagrande
- Ranurador laminar o ranurador curvo
- Capsulas de porcelana
- Espátula
- Vidrios de reloj
- Malla No. 40
- Horno con temperatura constante de 105 °C
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Peseta

- Franela
- Agua

### **PROCEDIMIENTO**

- El suelo se cribó por la malla No. 40, el cual se vació en una cápsula de porcelana y se humedeció
- Se pesaron los vidrios de reloj ( 3 para el Límite líquido y 3 para el Límite plástico)
- Para el Límite Líquido, el suelo es mezclado en la capsula de porcelana, hasta que se vea una mezcla manejable, se coloca en la copa de Casagrande, distribuyendo el material del centro hacia los extremos, de tal forma que en el centro quede una superficie a nivel.
- Se hace una ranura en la parte media del suelo, utilizando el ranurador, de tal forma que este vaya perpendicular a la copa de Casagrande.
- se giró la manivela de la copa de Casagrande con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta que los taludes del material se unan en una longitud de 13 mm., los golpes son contados y son registrados.

Se trató que la condición antes descrita se cumplieran entre 4 y 40 golpes, para que la prueba se tome como bien ejecutada

Lo anterior es recomendado con el fin de que los puntos obtenidos al graficar, el número de golpes contra contenido de agua, queden separados unos de otros y se pueda definir con mayor claridad la Curva de Fluidez.

En cada uno de estos ensayos se tomó la muestra del centro de la copa, las cuales son pesadas y se anotaron los valores.

- Cuando el suelo obtuvo la humedad correspondiente al límite líquido (ensaye en el intervalo de 20 a 30 golpes), se llenó el molde rectangular, en 3 capas, dándole los suficientes golpes a cada capa contra la mesa, con el fin de extraer el aire atrapado, después el molde se enrasa, se limpia y finalmente se pesa.

Para la determinación del Límite Plástico (LP):

- De la muestra menos húmeda, pero que sea moldeable, se hace primeramente una espera de 1.5 cm aproximadamente.
- Se gira con la palma de la mano, sobre la placa de vidrio, tratando de hacer un cilindro alargado y con un diámetro de 3.2 mm. (se utilizó un alambre para comparar)
- Si el cilindro presenta agrietamiento múltiple, se dice que el suelo presenta el Límite plástico, donde se obtuvo la muestra de suelo, se sometió al secado para determinar el contenido de agua, el cual equivale al LP.
- En caso de que no cumpliera la anterior condición, el suelo se hará de nuevo una esfera y se repetirá el proceso hasta que se cumpla lo especificado.

Finalmente, se obtuvo el índice Plástico (IP) mediante la fórmula:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

- IP= Índice Plástico
- LL= Límite Líquido
- LP= Límite Plástico

**Tabla 18. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido**

Límite líquido								
Prueba No	Penetración mm	Capsula No	Masa de la capsula	Masa de a capsula más suelo húmedo	Masa de la capsula más suelo seco	Masa del agua	Masa del suelo seco	Contenido de agua
1	99	L-6	38.15	44.51	42.61	1.9	4.46	42.6
2	159	A-4	38.10	45.15	42.94	2.21	4.84	45.6
3	225	B-4	38.10	47.15	44.20	2.89	6.12	47.2
4	252	Y-9	38.30	47.56	44.49	3.07	6.19	49.59

**Tabla 19. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido**

Límite plástico							
Prueba No	Capsula No	Masa de la capsula	Masa de a capsula más suelo húmedo	Masa de la capsula más suelo seco	Masa del agua	Masa del suelo seco	Contenido de agua
1	A-1	48.17	49.72	49.34	0.38	1.17	32.47
2	V-3	60.76	62.52	62.10	0.42	1.34	31.34
3	Z-0	60.44	61.79	61.46	0.33	1.02	29.41

#### 4.9. AFORO Y MUESTREO DEL AGUA RESIDUAL, DESCARGA “POTABILIZADORA”

##### - AFORO

Para calcular el volumen de agua residual, se utilizó el método del aforamiento, registrando el tiempo de llenado de un recipiente de 10 litros, se realizaron seis aforamientos a lo largo del día, a cada tres horas durante cinco días (del 20 al 24 de abril de 2015); de esta manera se calculó Q promedio por día en m<sup>3</sup>/día

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

- Q= Caudal, m<sup>3</sup>/día
- V= Volumen, m<sup>3</sup>
- t= tiempo, segundos



Figura 37. Aforo en el sitio.

#### - MUESTREO

El aforamiento, llevado a cabo los días 21, 23, y 24 de abril de 2015, también nos sirvió para tomar muestras de agua residual en envases limpios y desinfectados en todas las unidades experimentales, realizados cada 3 horas de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, para cubrir las 24 horas que opera el proceso generador de la descarga y cumplir con el número de muestras simples que se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Frecuencia de muestreo para el proceso generador de la descarga (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	
		Mínimo	Máximo
Menor a 4	Mínimo 2	No especificado	No especificado
De 4 a 8	4	1	2
Mayor a 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor a 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor a 18 y hasta 24	6	3	4

Mediante pruebas físico químicas de laboratorio realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se determinaron los niveles de concentración de DBO<sub>5</sub>, DQO, aluminio, nitrógeno total, fósforo, sólidos totales y coliformes totales y fecales, determinando con un análisis inicial las condiciones del agua residual de la comunidad El Alberto.



Figura 38. Muestreo en el sitio de descarga.

#### 4.10. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN EL PUNTO DE MUESTREO

Los resultados que se obtuvieron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM sobre la caracterización del agua residual a partir de los métodos antes mencionados se muestran en la siguiente tabla, en la cual se presenta en mínimo, máximo y la media para cada parámetro de las muestras puntuales.

Tabla 21. Resultados obtenidos en la caracterización del agua residual en muestras puntuales.

Parámetros	Unidades	Máximo	Mínimo	Media
Temperatura	°C	25.0	18.90	22.49
pH	---	8.0	7.0	7.25
Turbiedad	UTN	191.30	13.88	49.01
Conductividad	µs/cm	2180.0	1689.0	1951.47
Salinidad	%	1.10	1.0	1.04
OD	mg/L	4.70	2.0	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	135.0	37.0	88.59
Nitrógeno amoniacal	mg/L	19.0	2.90	11.22
DBO <sub>5</sub>	mg/L	64.10	6.20	25.63
DQO	mg/L	560.0	27.0	101.44
SST	mg/L	260.0	6.0	61.31
Grasas y aceites	mg/L	7.0	{ 5	5.83
Coliformes fecales	UFC/100 mL	4.53E+05	4.00E+04	1.45E+ 05
Huevos de helmintos	HH/L	1.60	0.20	0.86

#### 4.11. HUMEDAL ARTIFICIAL

Los humedales construidos pueden ser considerados como reactores biológicos de biomasa adherida y su funcionamiento para la remoción de la DBO y el nitrógeno puede estimarse de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón. Las relaciones básicas para los reactores con flujo pistón son las siguientes:  
(Reed et al, 1995)

$$C = C_o e^{(-Kt)} \quad (1)$$

Donde:

- C: Concentración del contaminante efluente. (mg/L)
- Co: Concentración del contaminante influente. (mg/L)
- K: Constante de velocidad de reacción de primer orden, dependiente de la temperatura. (d<sup>-1</sup>)
- t: Tiempo de retención hidráulica. (d)

El tiempo de retención hidráulica en los humedales puede calcularse usando la ecuación 2:

$$t = \frac{L*W*d*n}{Q} \quad (2)$$

Donde:

- L: longitud del estanque. (m)
- W: Ancho del estanque. (m)
- d: profundidad del agua en el estanque. (m)
- n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.
- Q: flujo promedio a través del humedal. (m<sup>3</sup>/d)

Para determinar el flujo promedio se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Q_i + Q_e}{2} \quad (3)$$

Donde:

- $Q_i$ : Flujo influente
- $Q_e$ : Flujo efluente

Para hacer un diseño preliminar usualmente se asume que  $Q_i$  y  $Q_e$  son iguales.  
Combinando las ecuaciones (1) y (2) se puede determinar el área superficial del humedal.

$$As = LW = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{Kdn} \quad (4)$$

Donde  $As$  es el área superficial del humedal ( $m^2$ )

El valor de  $K$  usado tanto en la ecuación (1) como en la (4) depende del tipo de contaminante removido y de la temperatura.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. RESULTADOS

A partir de los estudios realizados para la elaboración de este proyecto, se obtuvieron los siguientes resultados, que ayudaran al diseño conceptual y de detalle de la planta de tratamiento.

#### 5.1.1. Localización del sitio.

Tomando en cuenta que el terreno disponible para la planta de tratamiento no era el apto para dicha planta debido a la fuerte pendiente que tiene, se hará movimiento de tierras para adaptarlo a las necesidades requeridas (pendiente del 5%). Afortunadamente se cuenta con un terreno con superficie mayor a 2,000 m<sup>2</sup>, es irregular, lo que significa que tiene partes desfavorables y otras accesibles, esto nos permitirá adecuarlo a nuestros requerimientos. En la figura 39 se muestra la localización del terreno disponible para la planta, el terreno se encuentra a unos metros del Río Tula.

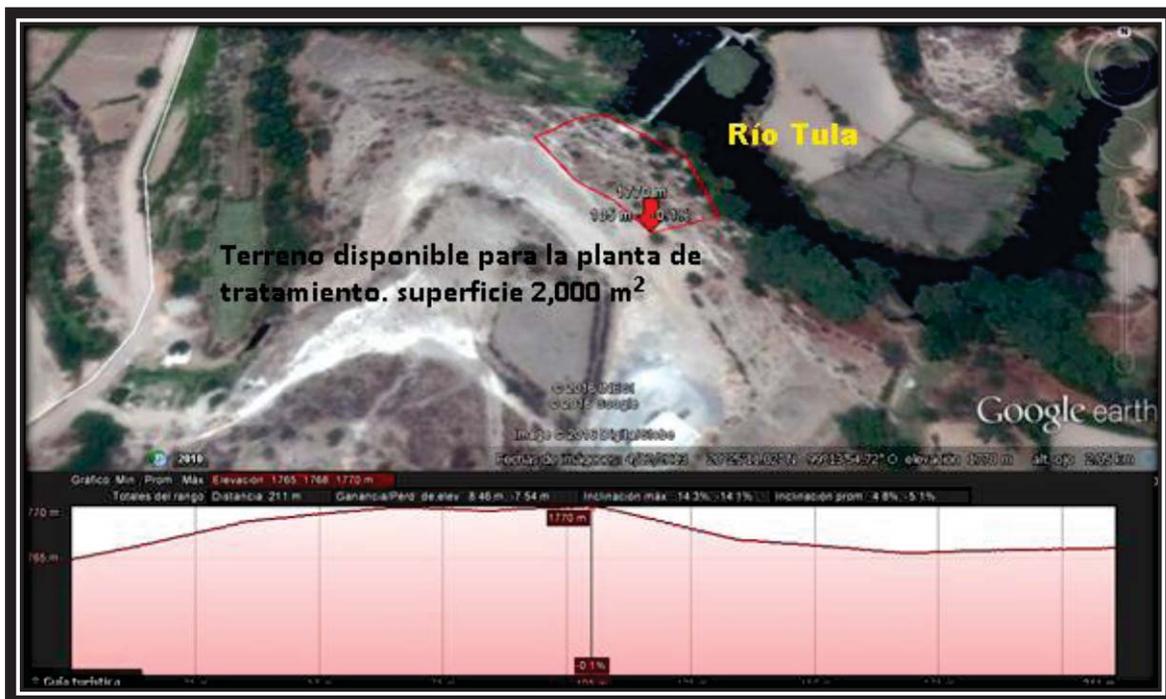


Figura 39. Localización de la planta de tratamiento. Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2. Caracterización del suelo.

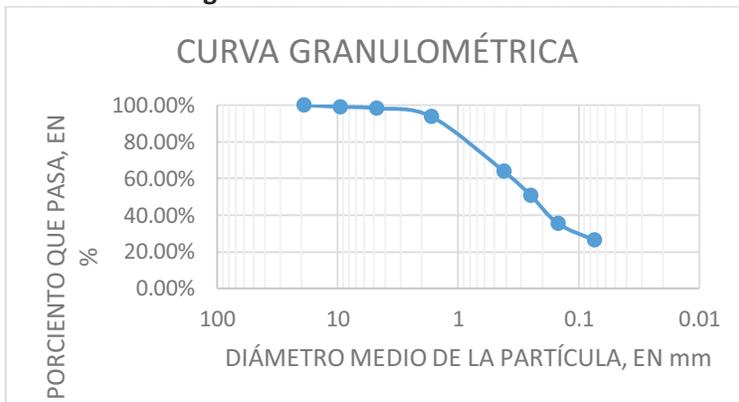
- Análisis granulométrico

De acuerdo al análisis granulométrico, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 22. Porcentaje retenido en cada malla

No. Tamiz	Diámetro	masa de suelo	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
3	76.2	0	0.000%	100.00%
2	50.8	0	0.000%	100.00%
1 1/2	36.1	0	0.000%	100.00%
1	25.4	0	0.000%	100.00%
3/4	19.05	0	0.000%	100.00%
3/8	9.52	9.18	0.918%	99.08%
4	4.76	7.94	0.794%	98.29%
10	1.68	44.37	4.438%	93.85%
40	0.42	298.37	29.847%	64.00%
60	0.25	132.69	13.273%	50.73%
100	0.149	152.51	15.256%	35.47%
200	0.074	91.54	9.157%	26.32%
fondo		263.08	26.316%	
<b>MASA TOTAL</b>		999.68		

Gráfica 3. Curva granulométrica del terreno "Potabilizadora".



D10=	0
D30=	0.11
D60=	0.25

% Gravas=	1.712
% Arenas=	71.978
% Finos=	26.31

De acuerdo a estos resultados podemos llegar a la conclusión de que éste suelo se trata de una: **ARENA LIMOSA (SM)**

Esto se traduce en un suelo es semipermeable, con buena resistencia al corte en estado compacto y saturado, baja compresibilidad en estado compacto tiene facilidad de manejo en obra.

- **Permeabilidad**

Los resultados de permeabilidad del suelo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 23. Resultados de la prueba de permeabilidad

PRUEBA No.	TEMPERATURA (°C)	ALTURA INICIAL $h_1$ (cm)	ALTURA FINAL $h_2$ (cm)	TIEMPO t(s)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD $k$ (cm/s) $\times 10^{-4}$
1	20	62.4	52.7	132.286	1.533
2	20	62.4	52.7	128.006	1.596
3	20	62.4	52.7	128.256	1.58
			PROMEDIO	$K_T =$	1.567

De acuerdo a los antes mencionado y utilizando las fórmulas que se vieron en el capítulo anterior, obtuvimos la permeabilidad de  **$1.567 \times 10^{-4}$  cm/s**; lo que se traduce en un **suelo permeable** y por lo tanto tendremos que utilizar una GEOMEMBRANA para evitar filtración al suelo.

- **Límites de consistencia**

En cuestión de límites plástico y líquido se tienen los siguientes resultados:

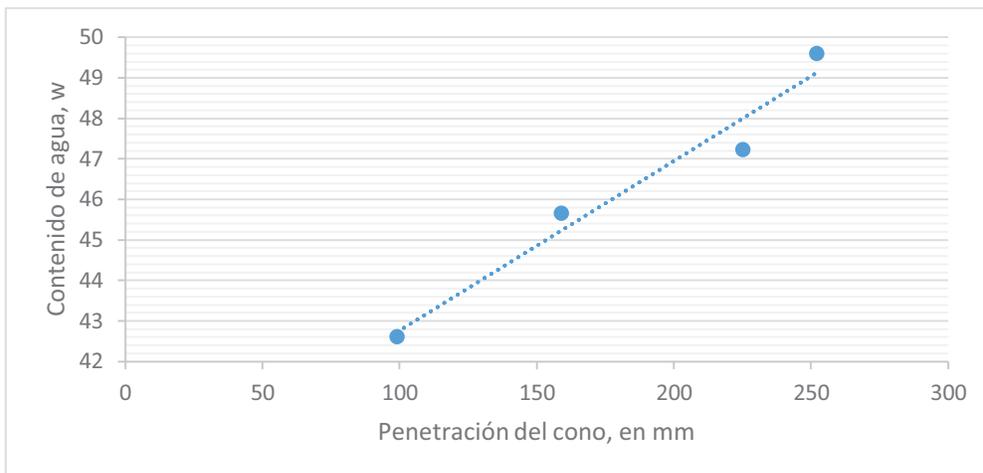
LÍMITE LÍQUIDO								
Prueba No	Penetración mm	Capsula No	Masa de la capsula	Masa de capsula más suelo húmedo	Masa de capsula más suelo seco	Masa del agua	Masa del suelo seco	Contenido de agua
1	99	C-6	38.15	44.51	42.61	1.9	4.46	42.6
2	159	A-4	38.1	45.15	42.94	2.21	4.84	45.66
3	225	B-4	38.1	47.11	44.2	2.89	6.12	47.22
4	252	Y-9	38.3	47.56	44.49	3.07	6.19	49.59

Tabla 24. Datos obtenidos en la prueba de límite líquido. Resultados

**Tabla 25. Datos obtenidos en la prueba de límite plástico. Resultados**

LÍMITE PLÁSTICO							
Prueba No	Capsula No	Masa de la capsula	Masa de capsula más suelo húmedo	Masa de capsula más suelo seco	Masa del agua	Masa del suelo seco	Contenido de agua
1	A-1	48.17	49.72	49.34	0.38	1.17	32.47
2	V-3	60.76	62.52	62.1	0.42	1.34	31.34
3	Z-0	60.44	61.79	61.46	0.33	1.02	29.41

**Gráfica 4. Curva de contenido de agua vs penetración para obtener los límites líquido y plástico.**



LL% = 46.9  
 LP%= 31.91  
 IP% = 14.99

**ECUACIONES PARA CLASIFICAR UN SUELO FINO**

IP= 0.73 (LL-20)= 19.64 %  
 L.L= 50% < 46.9 %  
 I.P= 0.90( LL-8)= ----

CLASIFICACIÓN : **ML**

**En conclusión,** el suelo con el que contamos es una ARENA LIMOS (SM). Arena de forma subredondeada a subangulosa, con arena pomítica y gravas aisladas; color grisáceo, con presencia de raíces. Las implicaciones que tendrá sobre la planta son adversas, debido a que es un suelo permeable. Esto implica que tendremos que colocar un material impermeable para evitar que el agua residual se filtre hasta el manantial que se encuentra en la zona.

### 5.1.3. Análisis estadístico de la calidad del agua residual y el gasto

Debido a la alta variabilidad en los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual en 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.

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

Parámetros fisicoquímicos	Parámetros estadísticos				
	Media	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Coefficiente 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	0.09	120.25

Tabla 26. Parámetros estadísticos para el punto de muestreo.

Debido a la variabilidad de los datos obtenidos 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.

## 5.2. DISEÑO CONCEPTUAL Y DE DETALLE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

### 5.2.1. PRETRATAMIENTO

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

Para facilitar la operación del sistema por parte de la comunidad, se optó por un pretratamiento a base de una fosa séptica con características de fácil mantenimiento, para ello, se implementó un biodigestor prefabricado, considerando principalmente el costo de construcción y mantenimiento. Se seleccionó un biodigestor con capacidad de 7,000 L con base al número de personas equivalente (usuarios), el cual debido a que no se tiene registro de la red de alcantarillado, se calculó 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.

$$persona\ Equivalente = \frac{Q * DBO_5}{C}$$

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).

De acuerdo a la ecuación anterior, el personal equivalente es de **34** personas conectadas al sistema de alcantarillado.

Concentración media de DBO <sub>5</sub> (g/L)	53.2
Gasto (L/d)	38862.7
Carga másica (g/d)	2067.5
Personal equivalente	34

Por lo tanto, se usara un biodigestor con una capacidad de 7,000 L.

Este pretratamiento consiste en un tanque biodigestor que actúa como sedimentador, cuyo objetivo es remover las partículas en suspensión. Al retirar la mayor parte de los sólidos en suspensión, se previene la saturación de los humedales artificiales que necesitan de un tratamiento previo para garantizar el funcionamiento adecuado y una larga vida útil.

Dado las condiciones del lugar y falta de interés y conocimiento por parte de la comunidad, fue necesario diseñar un sistema sencillo de operar. Por lo tanto, se decidió que un tanque biodigestor sería lo más apropiado para la comunidad. Este sistema sustituye, de manera eficiente, los sistemas tradicionales como fosas sépticas de concreto y letrinas, las cuales son focos de contaminación al agrietarse las paredes y saturarse con sólidos.

El diseño del biodigestor, permite resolver necesidades de saneamiento a través de diferentes capacidades de caudal, respondiendo a los requerimientos de las diferentes obras. Incorpora la estructura de doble pared, la pared interior con su construcción esponjosa le otorga mayor resistencia y aislación térmica, la pared exterior otorga una perfecta terminación lisa, esta pared contiene aditivos para evitar el envejecimiento al estar a la intemperie.

Es un tanque hermético que funciona lleno, por rebalse, a medida que entra agua residual, una cantidad igual sale por el otro extremo. En las figuras 40 y 41 se describe el funcionamiento de cada parte del biodigestor.

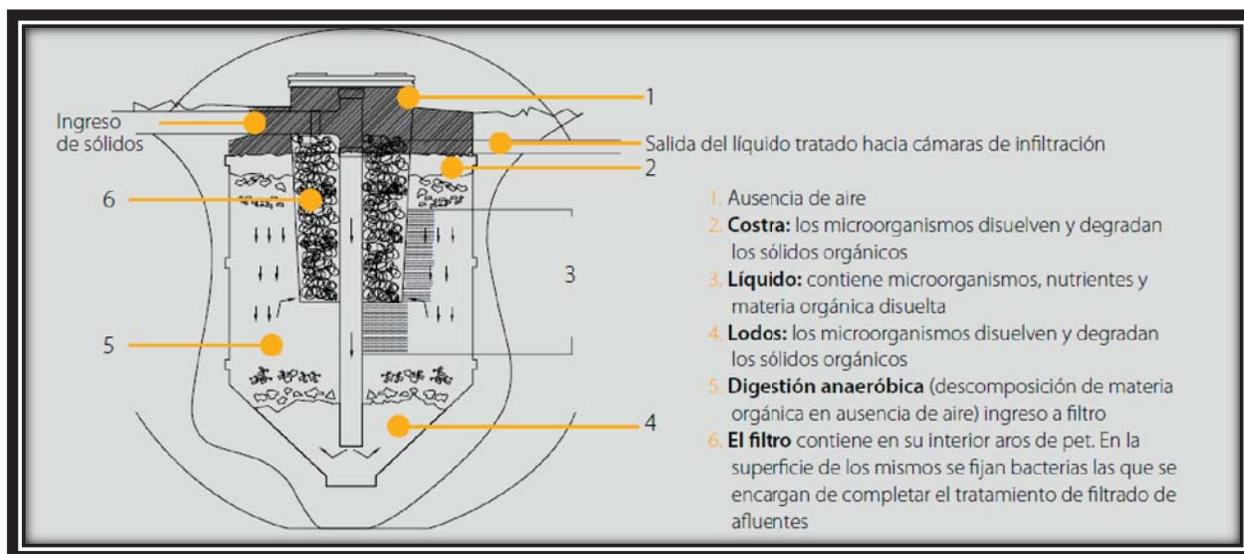


Figura 40. Partes del Biodigestor. Fuente: Manual Biodigestor

El agua entra por el tubo #1 hasta el fondo, donde las bacterias empiezan la descomposición, luego pasa por el filtro #2, donde los microorganismos adheridos al material filtrante retienen otra parte de la contaminación. El agua tratada sale por el tubo #3 y se descarga hacia el siguiente paso, que es el humedal.

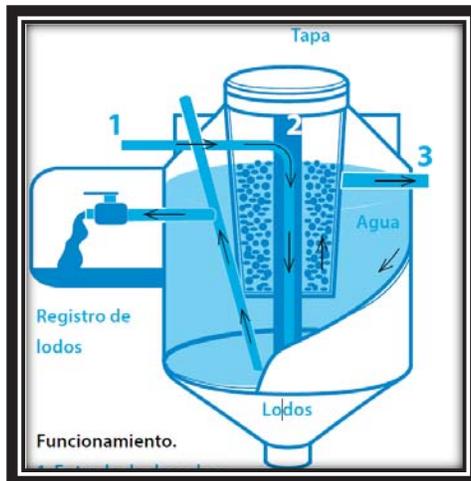


Figura 41. Funcionamiento del biodigestor. Fuente: Manual Rotoplas.

### Registro de lodos

Posee un sistema único que permite extraer sólo los lodos o material digerido, haciendo higiénico, económico, sin malos olores ni contaminación.

El registro de lodos se debe instalar para recibir los sólidos que se producen en el biodigestor.

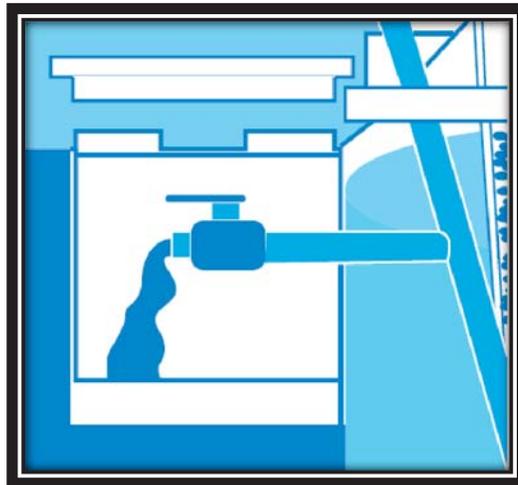


Figura 42. Registro de Lodos

Tabla 27. Purga de lodo y cantidad de cal para mantenimiento anual (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013)

Purga anual, L	1,200
Cal para mezclado (kg)	120

## Mantenimiento

Su mantenimiento no requiere equipo electromecánico especializado para su limpieza. Cada año se abrirá la válvula #4 para que el lodo acumulado y digerido (ver Figura 43), fluya al Registro de lodos. Una vez hecha la purga, se cierra la válvula y se mantendrá así hasta el siguiente mantenimiento. Los lodos son espesos y de color negro. Esto tardará de 3 a 10 minutos. Si se observa que sale con dificultad o la línea se encuentra obstruida, remover el tapón #5 y destapar con un palo de escoba.

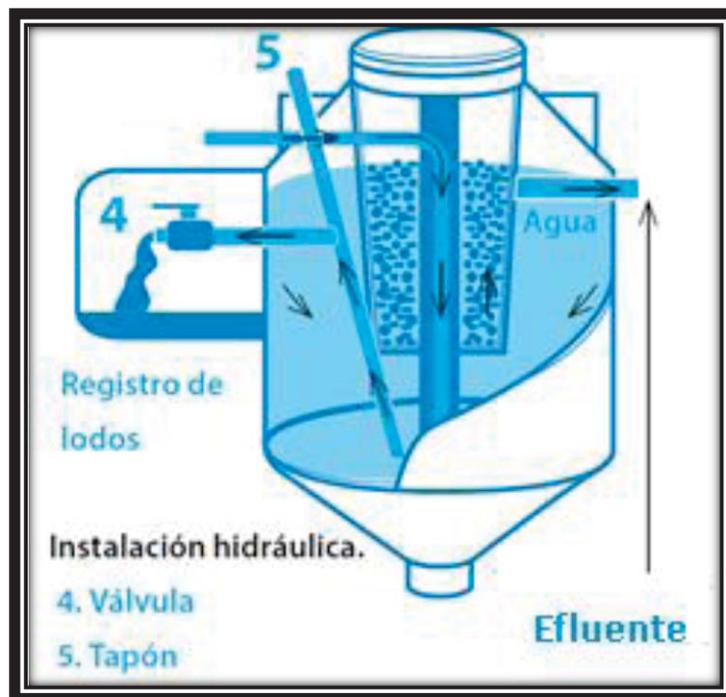


Figura 43. Mantenimiento del biodigestor. Fuente: Manual Rotoplas.

En la figura 44 se muestra el esquema del Biodigestor y en la Figura 45 se muestra en planta los componentes de la estructura.

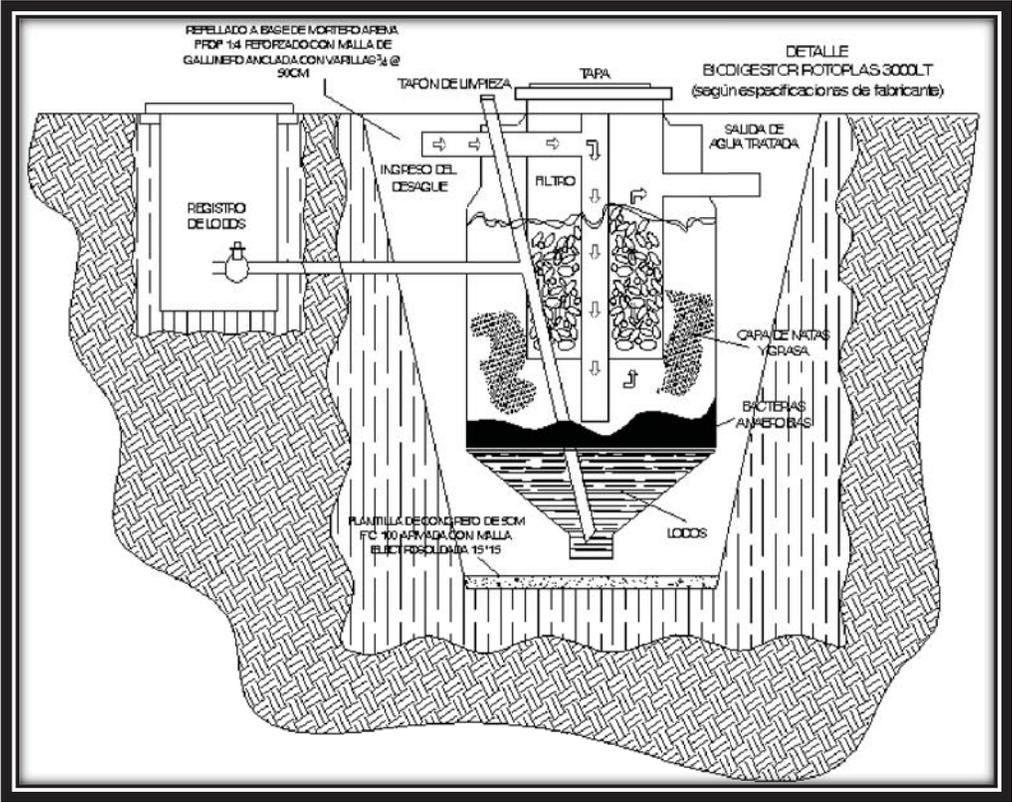


Figura 44. Esquema y componentes del Biodigestor. Fuente: Elaboración propia.

# Esquema de instalación de Biodigestor en Fosa Tradicional

FOSA SEPTICA RP-3000 mod. 2

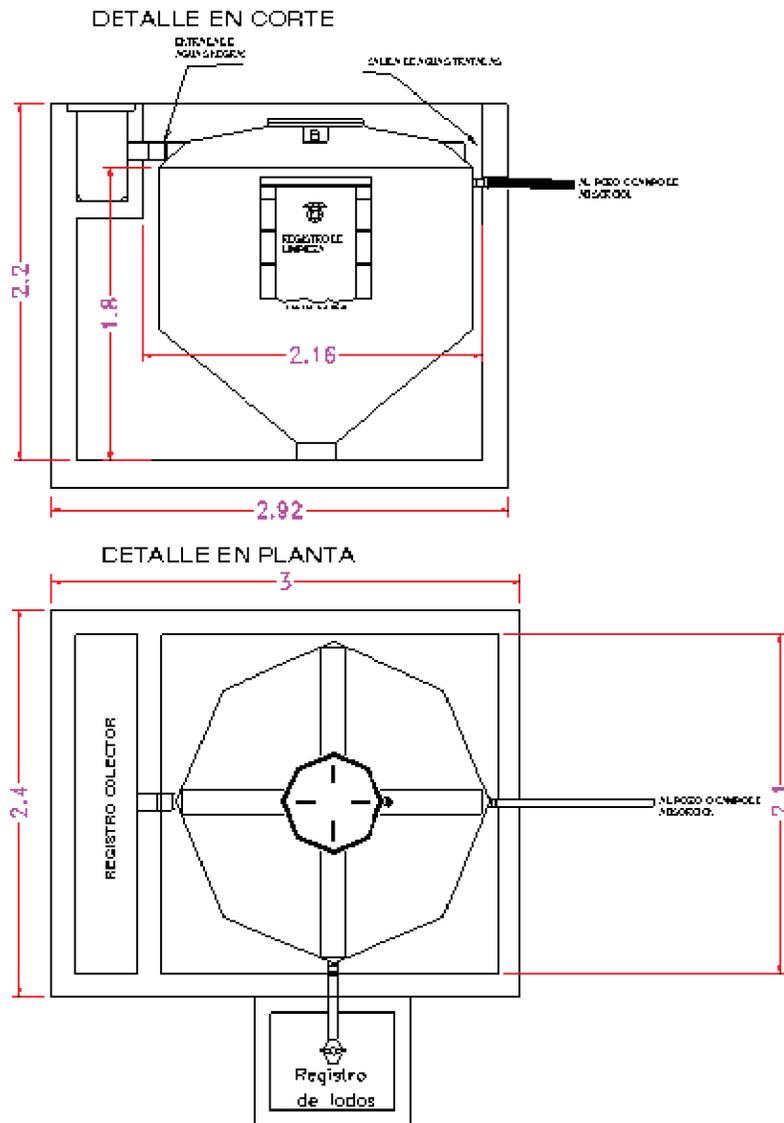


Figura 45. Esquema y medidas del biodigestor

## 5.2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO CON HUMEDALES

A partir de la caracterización del agua residual y de las metas de tratamiento, se realizó el diseño siguiendo la metodología de Kadlec (1993), descrita en el capítulo 3, y modificada con base en las características particulares de la topografía, clima y tipo de suelo. Los parámetros de diseño obtenidos son los que se señalan en la tabla 28.

**Tabla 28. Parámetros de diseño del humedal y sus componentes**

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto	0.45	L/s
Temperatura	22.5	°C
DBO <sub>5</sub>	80	mg/L
SST	133	mg/L
Topografía	Regular	---
Clima	Seco semicálido	---
Tipo de suelo	Arena Limosa (SM)	---
Permeabilidad del suelo	1.567	(cm/s) x10 <sup>4</sup>
Superficie de terreno disponible	2,000	m <sup>2</sup>
Tiempo de retención hidráulica	3.45	Días
Pendiente	1	%
Profundidad de grava	0.6	m
Profundidad media del agua en el humedal	0.55	m

Los humedales de tratamiento son celdas cuyo funcionamiento se basa en la interacción de tres componentes principales: grava como sustrato, vegetación y microorganismos que interactúan formando una biopelícula y efectuando el tratamiento cuando el flujo de agua atraviesa el sistema. Debe procurarse que el agua fluya en líneas paralelas desde la entrada hasta la salida de la celda y por este motivo se colocan tubos horizontales perforados, perpendiculares a la pendiente de los humedales. Estos serán colocados a la entrada de la celda. En la tabla 29 se muestran los parámetros indicativos para el diseño conceptual del humedal artificial de flujo Subsuperficial que se realizó con base a las ecuaciones mencionadas en la sección 3 de este documento y de acuerdo a los valores del influente obtenidos en el análisis estadístico (tabla 26).

**Tabla 29. Parámetros para el diseño del humedal**

Parámetro de Diseño	Unidad	HFSS*
Gasto	m <sup>3</sup> /d	38.9
Temperatura	°C	22.49
DBO <sub>5</sub>	mg./L	80
SST	mg./L	133

\*HFSS?

También debe considerarse el material filtrante dentro del lecho, dadas las características de este acuerdo con su granulometría, como se señala en la tabla 30.

**Tabla 30. Material filtrante**

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad (n)	Conductividad Hidráulica (K) m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d
Arena gruesa	2	28E32	100-1000
Arena gravosa	8	30E35	500-5000
Grava fina	16	35E38	1000-10000
Grava media	32	36E40	10000 E 50000
Roca gruesa	128	38E45	5000 E 250000

Fuente: Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales (Lara, 1999)

- **Diseño conceptual del humedal artificial**

Las consideraciones para el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial fueron las siguientes:

- $Q = 0.267 \text{ lt/s}$
- $Co = 56 \text{ mg/lt}$
- $Ce = 20.00 \text{ mg/lt}$
- $d = 0.5 \text{ m}$

Donde:

$$Q = \text{gasto, lt/s}$$

$$Co = \text{Concentración del contaminante em el influente, mg/lt}$$

$$Ce = \text{concentración del contaminante en el efluente, mg/lt}$$

$$d = \text{tirante, m}$$

**Cálculo del área**

Acorde a lo visto en el capítulo 3, el diseño conceptual se llevará a cabo el cálculo del humedal artificial.

La cinética para un humedal con plantas Hidrófitas con flujo Subsuperficial es la siguiente:

$$A = [Q * (\ln Co - \ln Ce) / kt * d * f]$$

$$A = ?$$

$$Kt_{@ 20} = 0.932$$

$f = 0.32$  fracción porosa del medio

$t = 22.49 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatura de diseño

$$Kt = K_{20} \times 1.06^{(T - 20)}$$

$$Kt = 0.6^{(t-20)}$$

$$Kt = 0.932$$

$$A_{22.49 \text{ }^\circ\text{C}} = \mathbf{159.43 \text{ m}^2}$$

Donde:

$$A = \text{Área, m}^2$$

**Tiempo de retención hidráulica**

$$TRH = \frac{A * d}{Q}$$

Donde:

$$A = \text{Área, m}^2$$

$$d = \text{tirante, m}$$

$$Q = \text{Gasto a tratar, m}^3$$

$$\mathbf{TRH = 3.45 \text{ días}}$$

En la bibliografía revisada establece que el tiempo de retención hidráulica sea de 3 a 5 días, por lo tanto estamos dentro del intervalo sugerido (3.45 días).

- **Cálculo del volumen**

$$V = A * d$$

Donde:

$$A = \text{Área, m}^2$$

$d = \text{tirante, m}$

$$V = (159.43 \text{ m}^2)(0.5 \text{ m}) = 79.71 \text{ m}^3$$

- **Consideraciones Hidráulicas**

$$v = Ks * s$$

$v = \text{velocidad a través del área}$

$s = \text{pendiente del lecho; para este caso se toma como un canal normal}$

$Qp = \text{flujo promedio, considerando un 5 \% de evaporación}$

$$Qp = 22.51 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$W = \text{ancho del canal}$

$$v = 7.2 \text{ m/d}$$

$$Ac = \frac{Q}{(Ks * s)}$$

$Ac = \text{Área de la sección transversal del lecho}$

$$Ac = 3.13 \text{ m}^2$$

$$W = 6.25 \text{ m}$$

$$L = 12.74 \text{ m}$$

$\text{Número de celdas} = 2$

$$\text{Área de oportunidad} = 79.0 \text{ m}^2$$

Los resultados finales para el dimensionamiento del humedal artificial se presentan en la tabla 31.

**Tabla 31. Resultados finales para del dimensionamiento del humedal artificial.**

CONCEPTO	MEDIDA	Referencia establecida en la literatura
Ancho (a)	6.25 m	----
Largo (l)	12.75 m	----
Volumen Total (V)	79 m <sup>3</sup>	----
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	3.45 días	"NATURAL SYSTEMS FOR WASTEWATER TREATMENT" Manual of Practice FD-16
Relación Largo/Ancho	2.04	NATURAL SYSTEMS FOR WASTEWATER TREATMENT" Manual of Practice FD-16 Manual of Practice FD-16
Área de oportunidad	79 m <sup>2</sup>	----
Número de celdas	2	----

NOTA: Estas dimensiones serán ajustadas acorde a las necesidades del terreno existentes.

#### - INGENIERÍA DE DETALLE

En esta sección se presenta el diseño de detalle del humedal subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento del agua residual del sitio denominado "Potabilizadora". Se colocaran dos celdas en paralelo para garantizar el buen funcionamiento del sistema y así brindar mantenimiento sin ocasionar el paro total de la planta

En los siguientes planos se muestra la ingeniería de detalle para los componentes de la planta de tratamiento en el sitio denominado "Potabilizadora.

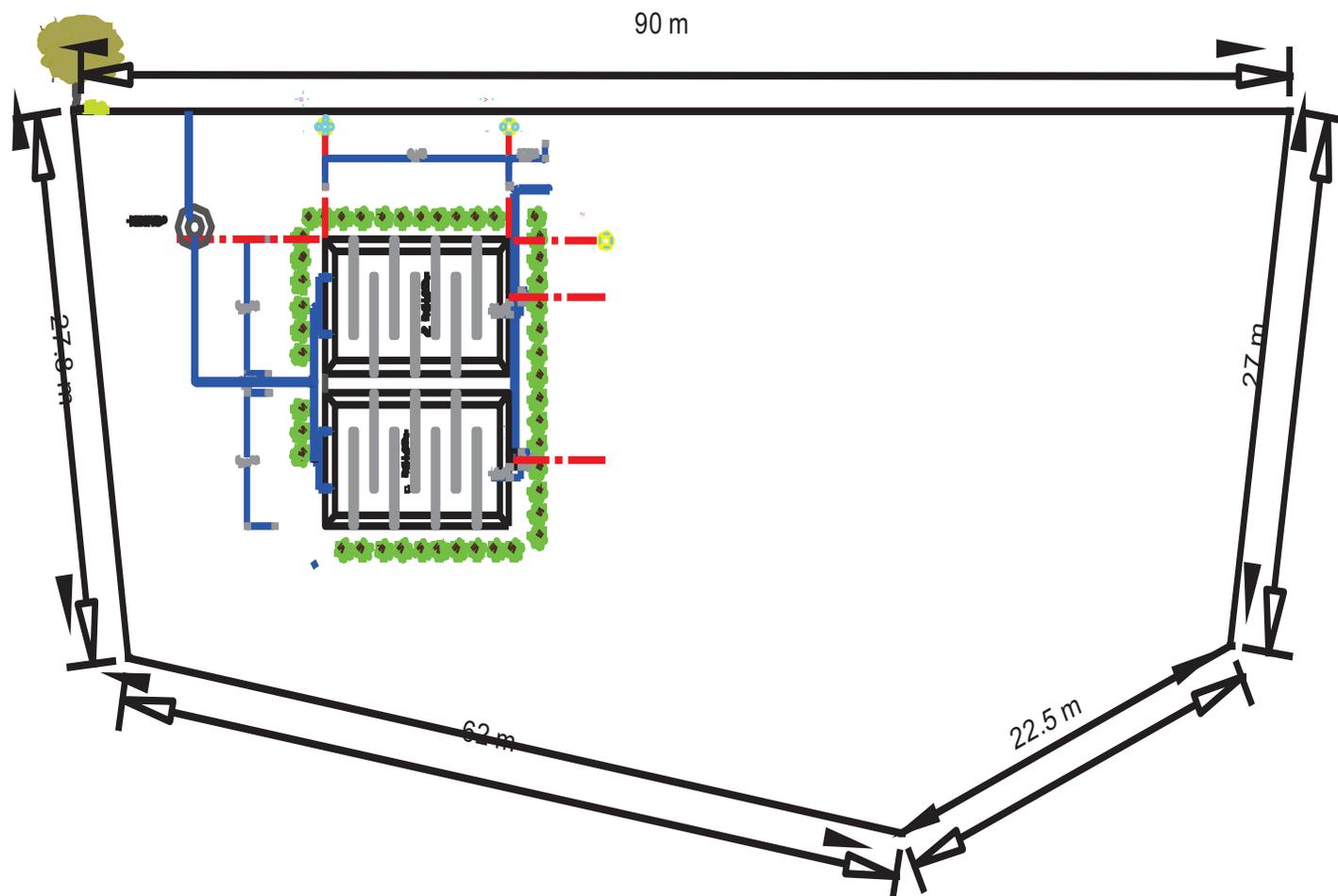


Figura 46. Plata de tratamiento en el terreno disponible.

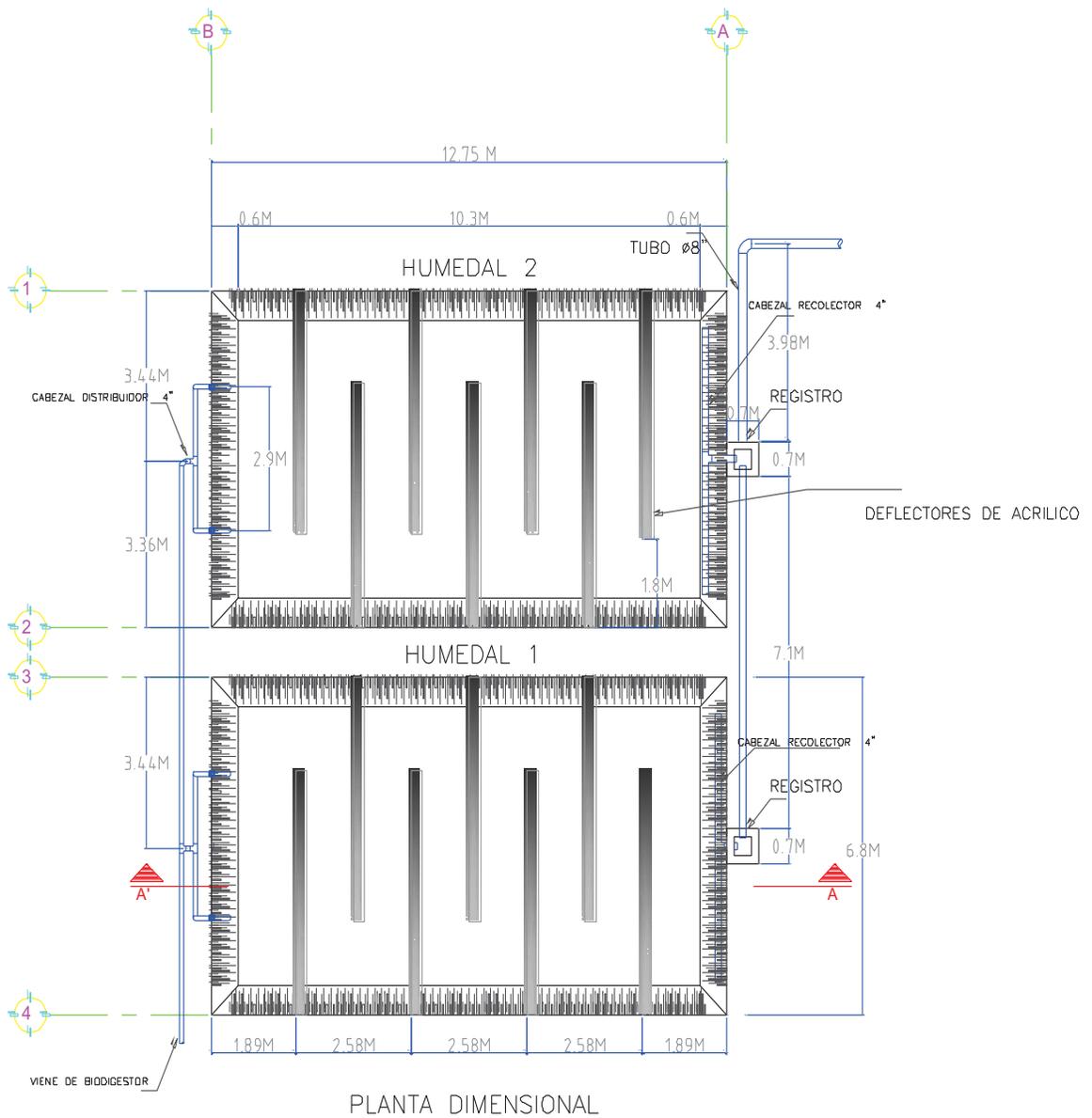


Figura47. Detalle de los humedales para el sistema de tratamiento.

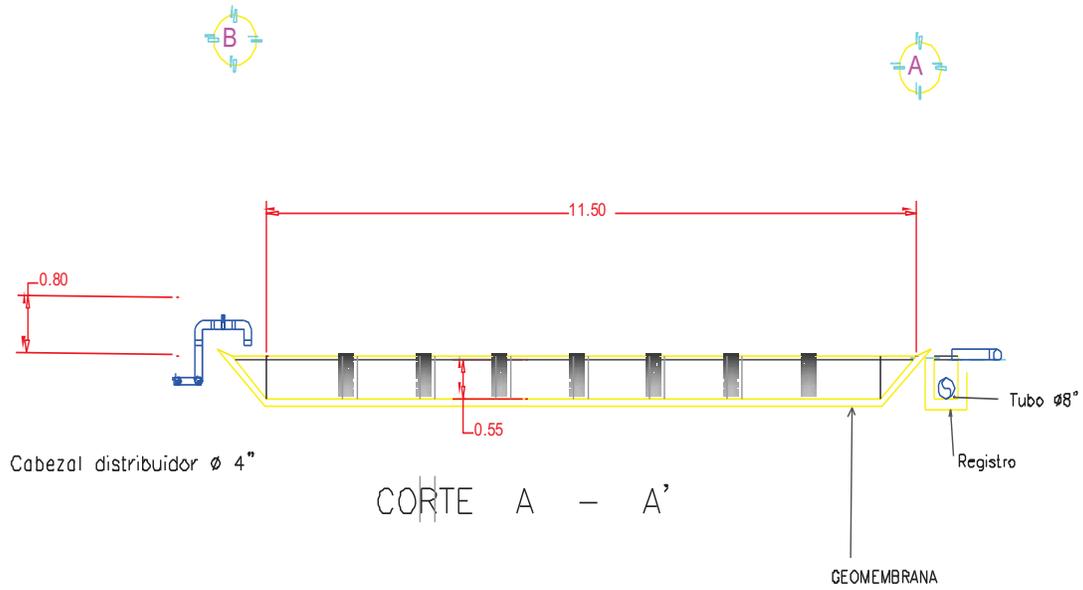


Figura 48. Corte A-A' del sistema de humedales.

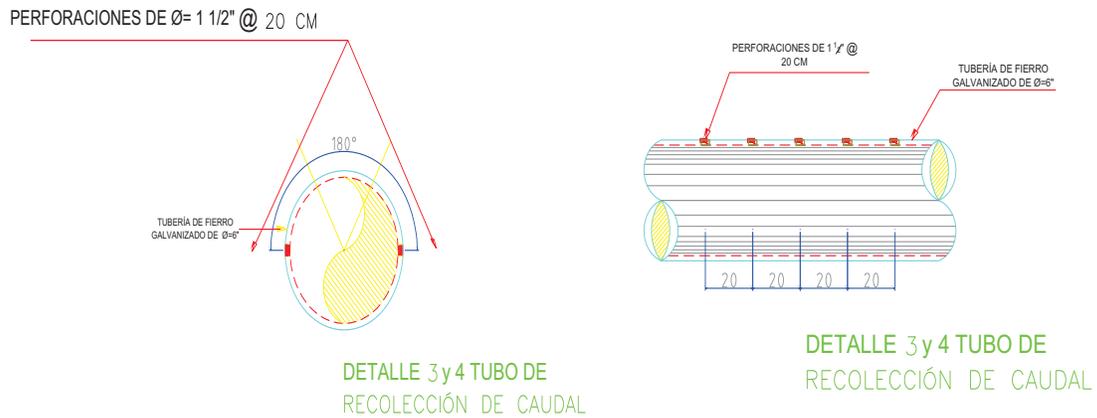


Figura 49. Detalle de la tubería a usar

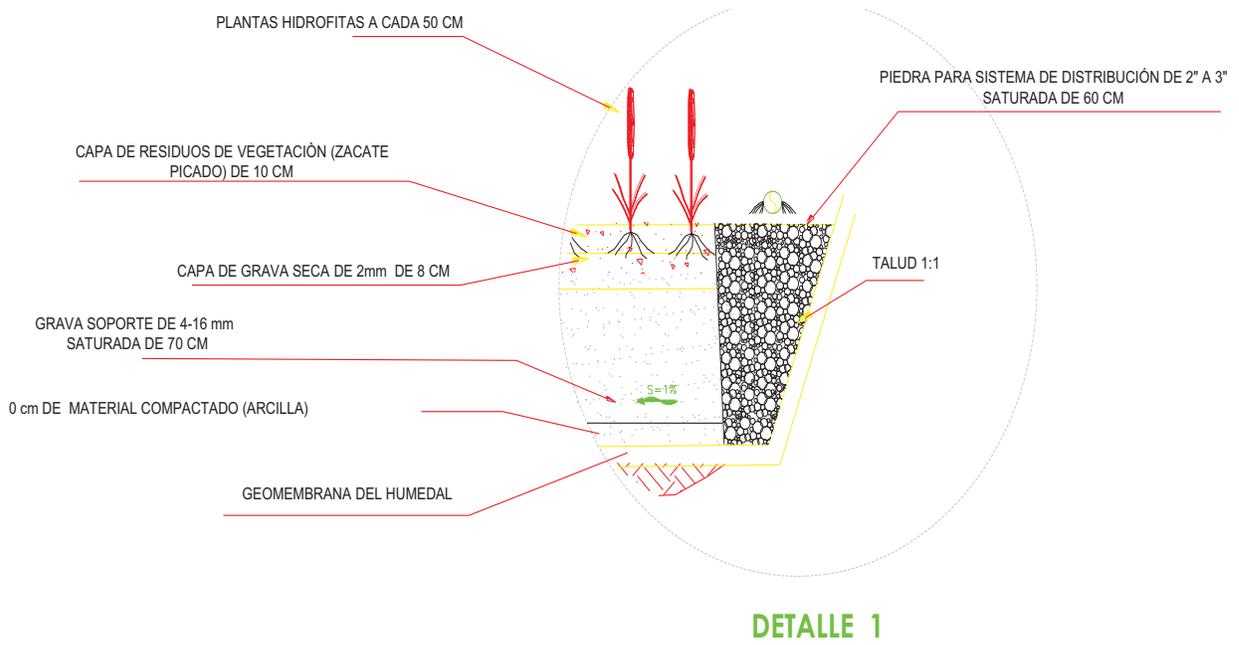


Figura 50. Detalle 1

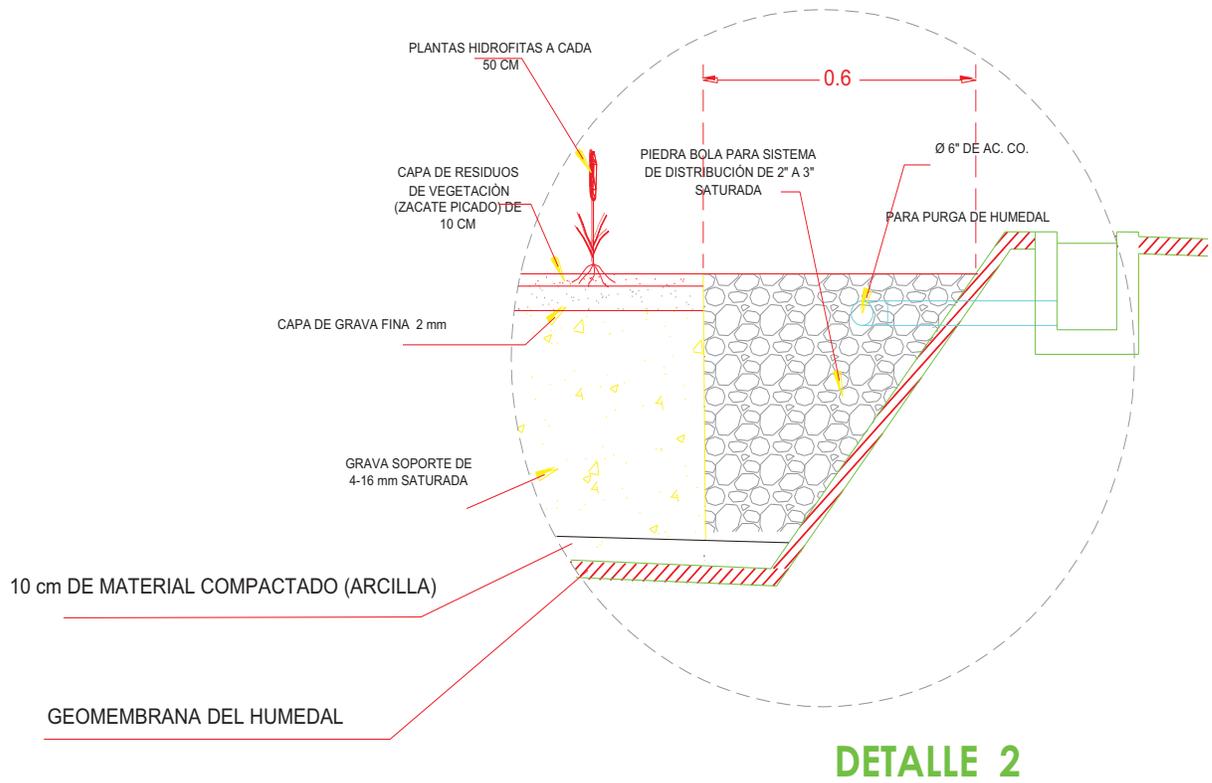


Figura 51. Detalle 2

## ESTABLECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN.

La vegetación recomendada en este proyecto es el Junco de agua (*Juncus Acutus*), esto debido a que es una planta ya se encuentra adaptada a la región y es adecuada para el tipo de humedal que se tiene. Este tipo de plantas están adaptadas para vivir en aguas con una elevada carga orgánica y se caracterizan porque son capaces de transferir el oxígeno captado por las hojas hacia la zona radicular y de ésta al agua. Con ello, posibilitan que se establezcan en sus raíces numerosas colonias de microorganismos que eliminan los contaminantes y degradan la materia orgánica disuelta en el agua.

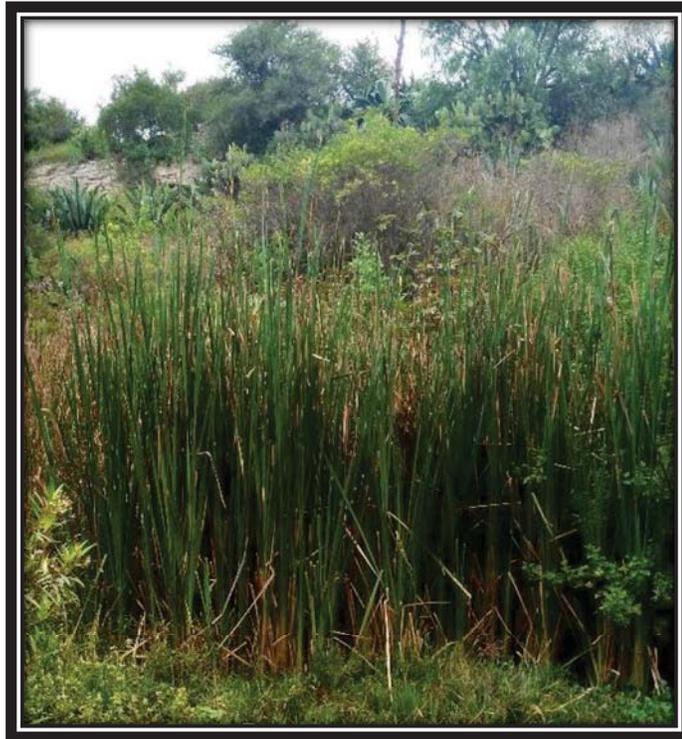


Figura 52. Junco de agua (*Juncus Acutus*). Planta que se utilizará en el sistema de tratamiento.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

La conclusión principal de este proyecto es que los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración del agua residual, especialmente si estas son de origen rural, y puede llegar a tener un gran futuro en países en vías de desarrollo que tengan climas tropicales o subtropicales, donde las condiciones económicas de estos proyectos (necesidades de terreno, menores costes de instalación, operación y mantenimiento), pueden ser determinantes para la toma de decisión de la construcción de una planta de tratamiento de agua residual, si a este punto adicionamos las condiciones climáticas que favorecerían el incremento en las eficiencias de remoción, tendríamos una interesante posibilidad de solución.

Se visualiza un proyecto a largo, mediano y corto plazo, para lograr la concientización de las personas con respecto a este recurso natural, con un objetivo específico, mediante una serie de actividades que se interrelacionan, y la utilización eficiente del manejo de las opciones de solución.

Así mismo, el proyecto tuvo como objetivo principal de contribuir a mejorar la calidad del agua residual, dándole un mejor nivel de vida a la comunidad de El Alberto y desde un punto de vista ambiental. Además de promover el tratamiento de agua mediante el empleo de humedales, es una opción eficaz, relativamente económica y funcional que puede cubrir con las necesidades de la población rural con incapacidad económica para cubrir los gastos de un sistema con mayor tecnología y maquinaria de altos costos.

En la comunidad El Alberto, la calidad del agua residual rebasó los límites permitidos de algunos indicadores de materia orgánica y microorganismos que se descarga a un cuerpo de agua receptor (río Tula).

El dren de tratamiento consistirá de una fosa séptica seguida de un humedal artificial. La elección del método de tratamiento mediante una fosa séptica que responde a la necesidad de contar con una alternativa de saneamiento ecológica. El número de personas beneficiadas en cuestión de salud pública son altos, y los beneficios ambientales son múltiples, ya que el agua producida por la planta de tratamiento podrá ser reusada en riego agrícola.

Debido a la variabilidad del gasto y la carga orgánica, el pretratamiento a base del biodigestor es una buena opción porque permitirá regular el gasto y la carga orgánica para que el humedal funcione con un gasto y carga constante.

El diseño del tratamiento principal, humedal artificial será de flujo subsuperficial, tendrá una capacidad para tratar de  $38.9 \text{ m}^3/\text{d}$ , el cual consiste de una estructura con un volumen total de  $79 \text{ m}^3$ , dividida en dos celdas de  $79 \text{ m}^2$  cada una de ellas, y un TRH de 3.45 días.

En todo sistema de tratamiento, el levantamiento topográfico del terreno y la caracterización del suelo es primordial ya que establece los lineamientos para el diseño conceptual de la planta. El suelo resulta altamente permeable por lo que se requiere utilizar una geomembrana para evitar infiltraciones al acuífero superficial.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- ✚ Al término de la construcción de la planta, se deberán colocar señalamientos para el acceso al humedal y para la identificación de las instalaciones.
- ✚ Se tendrá que dar mantenimiento constante a los caminos de acceso, tanto fuera como dentro del área de tratamiento
- ✚ Se deberá cuidar la invasión de plantas nocivas dentro del humedal, para que la especie de interés, *Juncus Acutus*, se desarrolle en un ambiente adecuado
- ✚ Es importante asignar una persona para realizar las labores de mantenimiento periódico, quien debe ser debidamente capacitada.
- ✚ Colocar un cerca perimetral para evitar daños al sistema por el paso de animales o personas no autorizadas.
- ✚ Realizar con un periodo de tres meses, un análisis físico-químico y microbiológico general para registrar los niveles de concentración de los contaminantes en la entrada y salida en los humedales.
- ✚ Una vez que la planta entre en operación de manera continua, es importante determinar la calidad, al menos se debe contar con un valor mensual del contenido de DBO, SST y coliformes fecales.
- ✚ Es necesario realizar aforamientos del caudal en épocas de estiaje, ya que el sistema se podría ver afectado por el aumento de agua pluvial.
- ✚ Realizar talleres en la comunidad para que conozcan y estén informados de acerca de todo lo relacionado con la planta de tratamiento y ayuden a su buen funcionamiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ BRIX H. Use of constructed wetland in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. Water Sciences Technology, 1999.
- ✓ Crites Y Tchobanoglous, Aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Colombia. Editorial McGraw Hill Interamericana, mayo 2000.
- ✓ Crites, Ronald, and George Tchobanoglous. "Small and Decentralized Wastewater Management Systems." Water Resources and Environmental Engineering (1998).
- ✓ CONAGUA. (2010). Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario.
- ✓ CONAGUA. Estadística del Agua en México, Edición 2011
- ✓ CONAGUA. (2012). PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ATOTONILCO.
- ✓ CONAGUA. (2014). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Agua Residual en Operación. . Ciudad de México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- ✓ CONAPO. (2010). Anexo B. Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos por entidad federativa y municipio.
- ✓ de la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora, V. (2013). Tratamiento del agua residual en México. Banco Interamericano de Desarrollo.
- ✓ 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. Norma Oficial Mexicana. NOM-002- SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal

- ✓ Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana. NOM-003-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se re usen en servicios al público
- ✓ Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-Especificaciones y métodos de prueba.
- ✓ EPA. División de manejo de aguas rama de instalaciones municipales sección técnica. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales.
- ✓ EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Washington, D.C. Septiembre de 2000
- ✓ EPA. Guide to septage treatment systems manual. Cincinnati, U.S. 1994.
- ✓ EPA. (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial.
- ✓ EPA. (2015). A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS.
- ✓ Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de Suelos: Tomo1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Ciudad de México: Limusa.
- ✓ Metcalf, & Eddy. (1995). Ingeniería de agua residual: tratamiento, vertido y reutilización. España: McGraw-Hill.
- ✓ Rathor, R. (2014). Constructed wetland management.
- ✓ Rotoplas. (2013). Manual de instalación y saneamiento.
- ✓ SEMARNAT. (29 de enero de 1999). NORMA Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial.
- ✓ Gobierno del Estado de Hidalgo. (2014). Gobierno del Estado de Hidalgo. Obtenido de Gobierno del Estado de Hidalgo: [http://www.hidalgo.gob.mx/?option=com\\_content&task=view&id=16](http://www.hidalgo.gob.mx/?option=com_content&task=view&id=16).
- ✓ INEGI, 2010. Censo Nacional de Población y Vivienda.
- ✓ INEGI. (2014). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2014 .
- ✓ INEGI. (s.f.). Guía para la interpretación de la Carta Edafológica.
- ✓ Ixmiquilpan, H. A. (2012). Plan de desarrollo municipal 2012-2016. Ixmiquilpan.
- ✓ Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de Suelos: Tomo1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Ciudad de México: Limusa.
- ✓ Kadlec, Robert and Knight Robert, 1996. Treatment Wetlands. The University of Michigan, Ann Arbor and Wetland Management Services. Lewis Publishers.
- ✓ Lara, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría. Barcelona: Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña.
- ✓ Mautner, M. (2015). Humedales: El tratamiento ecológico de agua. Ciudad de México.

- ✓ Metcalf y Eddy; Inc. Ingeniería de agua residual, tratamiento, vertido y reutilizado, Edición tercera. (Tomo I y II). México. Editorial McGraw Hill. 1996.
- ✓ Noyola-Robles, A., Vega-González, E., Ramos-Hernández, J. Q. y Calderón-Mólgora, C. G, Alternativas de tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 3° Ed. México. 2000.
- ✓ Secretaría de la Convención de Ramsar, 2006, Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán) 4ª edición. Secretaría de la Convención de Ramsar Gland (Suiza).
- ✓ Ramalho, R. (1993). "tratamiento de aguas residuales". España: Reverté
- ✓ Reed S.C, Crites R.W, Middlebrooks, E.J, Natural system for waste management and treatment, 2ª Ed, McGraw-Hill, 1995.
- ✓ Romero, J. (1999). "Calidad del agua". México, Alfaomega (1)
- ✓ Sans, R. (1999). "Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos". México: Alfaomega.
- ✓ SEIDEL K. Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen. Naturwii, 1966.
- ✓ Seoanez C. Mariano, (1999). Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnología. Diseño. Ediciones Mundi E Prensa, S.A. Madrid, España.
- ✓ Septic Tank Manufacturing Best Practices Manual. 2005. National Precast Concrete Association.