



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO CONCEPTUAL Y DE DETALLE DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL BASADA EN HUMEDAL
ARTIFICIAL PARA UNA COMUNIDAD *HÑÄHÑÚ* EN HIDALGO,
MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ALICIA MARIANO GALVÁN

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/035/16

Señorita
ALICIA MARIANO GALVÁN
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"DISEÑO CONCEPTUAL Y DE DETALLE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL BASADA EN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA UNA COMUNIDAD HÑÁHNÚ EN HIDALGO, MÉXICO"

- RESUMEN
- INTRODUCCIÓN
- I. MARCO TEÓRICO
- II. COMUNIDAD "EL ALBERTO"
- III. METODOLOGÍA
- IV. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 19 de abril del 2016.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar

Recibido

4/19/2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

Aceptación de Trabajo Escrito

DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA U.N.A.M.
Presente.

En relación con el Examen Profesional de **MARIANO GALVAN ALICIA**, registrada con número de cuenta **412003996** en la carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, del cual hemos sido designados sinodales, nos permitimos manifestarle la aceptación del trabajo escrito desarrollado por la citada alumna.

Atentamente,

M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA

FECHA DE ACEPTACIÓN: 26 julio / 2016

26 julio / 2016

DRA. ALMA CHAVEZ MEJIA

FECHA DE ACEPTACIÓN: _____

DR. HUMBERTO JUAN FRANCISCO MARENGO
MÓSOLLÓN

FECHA DE ACEPTACIÓN: 26 JULIO-2016

M.I. ALBA BEATRIZ VAZQUEZ GONZALEZ

FECHA DE ACEPTACIÓN: 25 de julio 2016.

M.I. ENRIQUE ELIZALDE ROMERO

FECHA DE ACEPTACIÓN: 25-JULIO-16

FECHA DE EMISIÓN: **25 de Julio de 2016**

ÍNDICE

RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 CALIDAD DEL AGUA	17
1.2 NORMATIVIDAD.....	18
1.3 PRINCIPALES SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN EL PAÍS	21
1.4 PROBLEMÁTICA EN MÉXICO RESPECTO AL SANEAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	23
1.5 COMUNIDADES RURALES Y SU VÍNCULO RESPECTO AL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.....	24
1.6 PROCESOS DE SANEAMIENTO EN EL AGUA RESIDUAL DE LAS COMUNIDADES RURALES EN MÉXICO.....	25
1.7 PRETRATAMIENTO: FOSA SÉPTICA	25
1.7.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	26
1.7.2 TIPOS DE BIODIGESTORES	26
1.7.3 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	27
1.7.4 BIODIGESTORES COMERCIALES	27
1.8 HUMEDALES.....	28
1.8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES.....	29
1.8.2 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	29
1.8.3 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	30
1.8.3.1 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL.....	30
1.8.3.2 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	31
1.8.3.2.1 HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL	32
a) HIDROLOGÍA.....	32
b) ESTRUCTURAS PARA EL CONTROL DEL FLUJO	33
ENTRADAS	33
SALIDAS.....	34
c) SUSTRATO	34
d) VEGETACIÓN	37

1.8.3.2. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL	38
1.9 PARÁMETROS DE DISEÑO	40
1.10 COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN ENTRE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL Y FLUJO VERTICAL.....	40
CAPÍTULO 2. COMUNIDAD “EL ALBERTO”	42
2.1 UBICACIÓN	43
2.2 CLIMA	44
2.3 TOPOGRAFÍA.....	45
2.4 GEOLOGÍA	47
2.5 EDAFOLOGÍA	48
2.6 HIDROLOGÍA	49
2.6 DEMOGRAFÍA.....	50
2.6.1 ORGANIZACIÓN ESPACIAL.....	51
2.6.2 ORGANIZACIÓN SOCIAL.....	51
2.6.3 ASPECTOS ECONÓMICOS	52
2.6.4 MIGRACIÓN.....	53
2.7 SANEAMIENTO.....	54
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	56
3.1 MUESTREO DEL AGUA RESIDUAL.....	57
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	59
3.3 GASTO DE DISEÑO	61
3.4 LEVANTAMIENTO DEL TERRENO.....	61
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	63
3.5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	63
3.5.2 PRUEBA DE PERMEABILIDAD A CARGA CONSTANTE.....	64
3.5.3 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA DE LOS SÓLIDOS O GRAVEDAD ESPECÍFICA DE UN SUELO.....	65
3.3 PRETRATAMIENTO.....	67
3.3.1 LOCALIZACIÓN	68
3.4 HUMEDAL ARTIFICIAL.....	69

CAPÍTULO 4.....	72
DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	72
4.1 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA LOCALIDAD	73
4.2 POBLACIÓN DE PROYECTO	77
4.3 GASTOS DE DISEÑO	79
4.4 SUELO	80
4.4.1 GRANULOMETRÍA	80
4.4.2 PERMEABILIDAD	83
4.4.2.1 PERMEABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO.....	84
4.4.2.2 PERMEABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DIRECTO	84
4.4.2.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA DE LOS SÓLIDOS O GRAVEDAD ESPECÍFICA DE UN SUELO.....	85
4.5 BIODIGESTOR	86
4.6 HUMEDAL.....	87
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS.....	91
ANEXOS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Humedal artificial de flujo superficial, (García Serrano & Angélica, 2008).	31
Ilustración 2. Humedal subsuperficial de flujo horizontal, (Morel & Diener 2006).	32
Ilustración 3. Estructuras de entrada y salida (Rathor, 2014).	33
Ilustración 4. Estructura de un humedal artificial de flujo horizontal (Rathor, 2014).	35
Ilustración 5. Configuración típica para un humedal de flujo subsuperficial, vista de planta (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).	36
Ilustración 6. Configuración típica de un humedal de flujo subsuperficial, vista de perfil (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).	36
Ilustración 7. Densidad de vegetación en un humedal de flujo subsuperficial (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).	38
Ilustración 8. Humedal subsuperficial de flujo vertical, (Morel & Diener, 2006).	39
Ilustración 9. Ubicación del Valle del Mezquital (CONAGUA, 2014).	43
Ilustración 10. Perfil topográfico de la línea de conducción que va del registro a la entrada del humedal.	47
Ilustración 11. Vista aérea del terreno para la instalación de la planta de tratamiento de agua residual.	47
Ilustración 12. Flujo de las descargas de aguas negras de la Ciudad de México hacia el valle del Mezquital (Lesser Carrillo, Lesser Illades, Arellano Islas, & González Posadas, 2011). ...	49
Ilustración 13. Punto de muestreo, con latitud N20°24'50.7" y longitud W099°13'06.6" ...	59
Ilustración 15. Balneario de El Alberto.	60
Ilustración 14. Pequeño laboratorio montado en el balneario de la localidad.	60
Ilustración 16. Kiosco e iglesia aledaños al terreno destinado a la PTAR, marzo 2015.	62
Ilustración 17. Poligonal del sistema dual biodigestor-humedal artificial.	62
Ilustración 18. Muestra del suelo para el análisis granulométrico.	63
Ilustración 19. Prueba de permeabilidad a carga constante.	64
Ilustración 20. Método para la determinación de la densidad de arena y finos.	66
Ilustración 21. Método para la obtención de la densidad de gravas.	66
Ilustración 22. Muestra puntual, 6:52 am.	74
Ilustración 23. Muestra puntual, 3 horas con 32 minutos después.	74
Ilustración 24. Muestreo puntual sin gasto, 17:37 horas.	75
Ilustración 25. Muestreo puntual sin gasto, 15:32 horas.	75
Ilustración 26. Ángulo de excavación en función al tipo de suelo (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013).	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica (mg/L) (Metcalf & Eddy, 1995). ..	18
Tabla 2. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (SEMARNAT, 1996).....	20
Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes (SEMARNAT, 1997).	21
Tabla 4. Evolución en la cobertura de tratamiento del agua residual (Elaboración propia, basado en datos de CONAGUA 2008, 2011 y 2014).....	22
Tabla 5. Clasificación de humedales según la vegetación y el flujo (Cano, 2013).	30
Tabla 6. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales (Delgadillo, 2010).....	37
Tabla 7. Penetración de la raíz en el medio, (Villaseñor Huidobro, 2011).	38
Tabla 8. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en humedales subsuperficiales de flujo horizontal (Cano, 2013).	38
Tabla 9. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en humedales subsuperficiales de flujo vertical (Cano, 2013).	39
Tabla 10. Parámetros de diseño (Metcalf & Eddy, 1995).....	40
Tabla 11. Comparación del porcentaje de remoción entre humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical (Mautner, 2015).	41
Tabla 12. Temperatura media anual (°C) del municipio de Ixmiquilpan con datos de INEGI 2000 y 2014.	44
Tabla 13. Precipitación total anual (mm) del municipio de Ixmiquilpan con datos de INEGI 2000 y 2014.	44
Tabla 14. Comparación entre clima de Ixmiquilpan y El Alberto, elaboración propia a partir de (ASRVM, 2010).....	45
Tabla 15. Geología de El Alberto, elaboración propia basada en (INEGI, 2000).	48
Tabla 16. Regiones, cuencas y subcuencas de Hidalgo (INEGI, 2000).	49
Tabla 17. Evolución de la población de El Alberto de 1900- 2010 (INEGI).	51
Tabla 18. Frecuencia de muestreo para el proceso generador de la descarga (SEMARNAT, 1996).	57
Tabla 19. Vértices de la poligonal de la planta de tratamiento de agua residual “Escuela”. ..	62
Tabla 20. Eficiencia en biodigestor Rotoplas®, (Rotoplas, Manual biodigestor).	67
Tabla 21. Número de usuarios, (Rotoplas, Ficha técnica biodigestor autolimpiable, 2014). ..	67
Tabla 22. Dimensiones biodigestor (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013).	67
Tabla 23. Purga de lodo y cantidad de cal para mantenimiento anual (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013).....	67
Tabla 24. Volumen mínimo del registro de lodos (Rotoplas, Ficha técnica biodigestor autolimpiable, 2014).	68

Tabla 25. Distancias mínimas recomendadas para la ubicación de una fosa séptica (SEMARNAT, 1999).	68
Tabla 26. Caracterización del agua residual en el sitio del proyecto.	73
Tabla 27. Resultados obtenidos en la caracterización de la muestras compuestas, punto de muestreo "escuela".	75
Tabla 28. Resultados de metales en la caracterización del agua residual comparados con los límites máximos permisibles establecidos por las normas oficiales mexicanas.	76
Tabla 29. Parámetros estadísticos para el punto de muestreo "Escuela"	77
Tabla 30. Tasas de población "El Alberto"	78
Tabla 31. Valores máximo, mínimo y medio del gasto.	80
Tabla 32. Porcentaje de partículas en el suelo.	81
Tabla 33. Propiedades más importantes del suelo SP.	82
Tabla 34. Suelo SP como material de terraplén (Crespo Villalaz, 2004).	82
Tabla 35. Suelos SP como material de cimentación (Crespo Villalaz, 2004).	83
Tabla 36. Valores para el cálculo para el coeficiente de permeabilidad.	84
Tabla 37. Porcentaje de absorción y densidad relativa de los sólidos en el suelo de la PTAR.	85
Tabla 38. Personal equivalente y carga másica.	86
Tabla 39. Parámetros de diseño para suelo del lugar.	87
Tabla 40. Parámetros de diseño usando tezontle como medio de soporte.	88
Tabla 41. Dimensionamiento del humedal con suelo SP y tezontle.	88
Tabla 42. Comprobación de parámetros.	88

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparativa entre valores medios de muestra puntual y normativa con valores mensuales.	74
Gráfica 2. Evolución de la población El Alberto 1900- 2010 (INEGI).	78
Gráfica 3. Curva granulométrica del terreno para la PTAR "Escuela".	81

Agradezco y dedico el presente trabajo a las personas que me alentaron en mi carrera, la mayoría lejanas mientras mi estadía en la Universidad: Rafael y Alfonso importantes en mi vida y motores de mi quehacer, padres por todo lo inculcado, por brindarme la oportunidad de crecimiento y confiar en mí.

Familia: abuela, tíos, primos por el apoyo sincero y continuo. Pequeñas Laila y Valeria sorpresas que siempre me animaron. A todas las personas entusiastas que me condujeron hasta aquí: Yuryana, Julieta, Daniela, Amanda, Ileana, Zaira, Canedo. A los verdaderos amigos que en cada visita a Xalapa me recargaban de pila: joven Pantoja, Vianey, Betsabé, Mich, Juan Carlos, Tania, Mel, Nat.

A los cercanos: A las familias adoptivas que hicieron de mi estancia amena y llena de dicha en especial a la familia Gutiérrez Trejo. Roomies de los cinco techos en los que viví: gracias por la dichosa compañía y vivencias inolvidables: Morán, Carmen, Isabel, Diana, Marisol, Marcelino, Monter, Gil y chicas de la residencia. A los compañeros de clase por ser parte de mi historia, a la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles de la Facultad de Ingeniería por confiar y permitirme desarrollarme junto a ustedes, a la residencia universitaria “Un Solo Corazón” por recibirme con los brazos abiertos y acogerme como en hogar en especial a la hermana Lucía. A mis colegas inyectores que me puentearon el camino y siempre estuvieron al pie del mismo. A los compañeros del Instituto de Ingeniería, a los revisores de tesis que prometí mencionar Politóloga Yuryana por sus grandiosas lecciones, Ingeniero Israel colega en nuestro primer proyecto de campo, Ingeniero Tornero por sus vistazos desde Francia e Ingeniero Montañez por sus valiosas clases de gramática.

A Luis, el amor de mis días: por cultivarme, protegerme y aceptarme. Gracias por ser mi amigo, colega y compañero. Sin tu colaboración no hubiese concluido con los agradecimientos. Estoy segura que nos esperan éxitos en compañía.

Agradezco también a mi colega Andrea Hernández por la fortuna de contar con su amistad y por las lecciones aprendidas. De igual forma retribuyo al Ingeniero Luna por su fraternidad y consejos que me instruyeron en la vida laboral.

A las figuras de sabiduría que me inspiraron y me formaron: Maestra Alba, Maestro Garduño, epónimo Demeneghi, Dr. Marengo, profesor Rojas Tapía, Dr. Gavaldón.

Profunda gratitud a mi grandiosa alma mater por todas las postales que me obsequió e Instituto de Ingeniería por haberme brindado la fortuna de ser miembro de su comunidad.

Dra. Alma Chávez Mejía, estoy en deuda con usted por asignarme el proyecto de tesis y haber conformado su equipo de trabajo.

“En todas las épocas y en todas partes ha habido hombres dotados que han poseído ese raro sentido llamado `común”.

Nabor Carrillo Flores

RESUMEN

Los humedales artificiales son algunas de las tecnologías eficientes para el tratamiento del agua residual. Comparado con otros sistemas de tratamiento convencionales, los humedales artificiales son de bajo costo, fáciles de operar y de dar mantenimiento, además de contar con un gran potencial para su aplicación en países en desarrollo, particularmente en comunidades rurales (K Kivaisi, 2001).

El Valle del Mezquital es la zona más contaminada del estado de Hidalgo (Hernández Gracia & García Velázquez, 2011), en cuanto al saneamiento de su agua residual ocupa el lugar 29 de 32 (CONAGUA, 2014), además la pobreza y la migración son altos indicadores en el municipio de estudio. A pesar de lo anterior, Bunge en 2010 no encuentra correlación alguna entre el nivel de saneamiento de las cuencas y el nivel económico de una nación lo que nos conduce a la siguiente cuestión: ¿Nos hace falta planeación o se está proyectando en otra dirección?

La siguiente investigación, presenta el diseño de un sistema de tratamiento de agua residual para la comunidad rural llamada “El Alberto”, ubicada en el municipio de Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo, México, basado en un humedal de flujo horizontal. Debido a la variación de carga orgánica y gasto se empleará como pretratamiento un biodigestor comercial.

Bajo la composición típica del agua residual doméstica establecida en Metcalf & Eddy (1995) y mediante el muestreo y análisis estadístico del agua residual a tratar, se obtuvo que el agua residual tiene una concentración alta, de hecho, 4 de 6 parámetros (DBO₅, grasas y aceites, SST y coliformes fecales) establecidos en las normas oficiales mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997) están por encima de los límites máximos permisibles.

Debido a que la zona donde se instalará el humedal presenta un clima templado la evapotranspiración y la precipitación no son efectos críticos para el desempeño adecuado del humedal (EPA, 2015) de igual forma el humedal contará con una geomembrana ocasionando que para el diseño la infiltración sea despreciable. En el apartado correspondiente a los anexos se presenta el armado de las celdas paralelas para que el humedal se comporte como un reactor biológico con régimen de flujo pistón y flujo laminar. Los parámetros de diseño cumplen con los criterios sugeridos por Metcalf y Eddy (1995) y Cano (2013).

El terreno destinado para la planta de tratamiento de agua residual bajo el sistema unificado de clasificación suelos corresponde a una arena con grava con pocos finos (SP) que cuenta con una superficie de aproximadamente 286 m² relativamente cercano al Río Tula con una

pendiente suave. Del análisis para determinar la población de proyecto correspondiente al periodo de diseño de 10 años (sugerido para planta de tratamiento de agua residual CONAGUA, 2007) resultó de 705 habitantes correspondiendo un gasto de 0.756 L/s (casi el triple del valor medio del caudal aforado 0.262 L/s).

La selección del material granular para el humedal fue crítica para el éxito del sistema, a medida que la distancia del flujo aumenta, la resistencia al mismo se hace mayor. La caracterización del suelo brindó información para determinar el ángulo de excavación para la instalación del biodigestor (entre 60 y 75 grados) asimismo, el uso del suelo como relleno evitando el uso de rocas angulosas. En cuanto al humedal, se presentan dos diseños: uno con sustrato de gravas del sitio y el otro con tezontle debido a que dicho material ha desempeñado alta eficiencia en la remoción de carga orgánica en el tratamiento del agua residual y es un material de gran abundancia en el país.

En el pretratamiento, la remoción esperada de la carga orgánica es del 20%. El diseño del humedal con arreglo SP resultó de ancho 77.6 m y largo 22.2 mientras que el integrado por tezontle es de ancho 38.8 m y largo 43.9 m con ello se asegurará una DBO_5 en el efluente final de 20 mg/L, CF < 1000 NMP/100 ml. A pesar de que el dimensionamiento con tezontle como material de sustrato resulta con un humedal más pequeño, se concluye que el terreno otorgado por los pobladores es insuficiente para la ubicación de la planta de tratamiento de agua residual.

INTRODUCCIÓN

La falta de recursos tanto humanos como financieros para operar y dar mantenimiento a las plantas de tratamiento de agua residual es la principal causa de la baja eficacia del tratamiento de agua en México (Moeller y Escalante, 2000).

El Alberto es una comunidad rural con menos de 1,000 habitantes (SEDESOL, 2013), ubicada en el Valle del Mezquital, Ixmiquilpan, estado de Hidalgo. Asimismo, es una comunidad indígena *hñähñú*¹ que practica el auto gobierno regido por sistemas normativos, conocidos como "usos y costumbres".

Existen tres escuelas: un jardín de niños, una primaria y una secundaria, cuenta también con un pequeño centro de salud.

Los hombres de la comunidad se encargan de la agricultura ya sea para el autoconsumo o para el ganado, en cambio las mujeres se dedican a la explotación de la fibra del maguey (ixtle, en lengua *hñähñú*) para la fabricación de esponjillas y a las labores del hogar. No obstante, la migración a los Estados Unidos de América (alto según el índice de intensidad migratoria, 2010) ha provocado que la entrada de remesas sea el principal activo en la economía de El Alberto, sin olvidar que el turismo también es esencial.

A pesar de que en el Valle del Mezquital se encuentra la mayoría de balnearios de gran demanda turística, es la zona más contaminada del estado de Hidalgo (Hernández Gracia & García Velázquez, 2011). Sin embargo, mediante un programa internacional El Alberto logró construir un parque ecológico llamado el "EcoAlberto", contando con un balneario.

Frente a los problemas de contaminación y degradación de la calidad del agua, la falta de capacitación en las comunidades rurales sobre el tema y los costos para la depuración del agua es necesario implementar ecotécnicas para producir beneficios con el agua tratada.

Al respecto, los humedales artificiales cumplen con la normatividad vigente en materia de tratamiento, son de bajo costo, eficientes y sustentables debido al uso de plantas nativas y la oferta de calidad de agua permitida para el riego agrícola (Martínez Espinosa, Peña López, Cabirol, & Rojas Oropeza, 2013).

Es por ello que, mediante este estudio, se propone el diseño de un sistema de tratamiento de agua residual basado en humedales artificiales ubicado en el sitio que hemos nombrado "Escuela" con el objetivo de tratar el agua residual generada por la escuela y un pequeño centro de salud con y así, reusarla en riego agrícola, ya que la contaminación afecta no sólo

¹ Pueblo indígena otomí que habita en el Valle del Mezquital.

a habitantes de la entidad por el contacto directo del agua, sino a los de todo el Valle de México, que consumen productos cultivados en Hidalgo.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 CALIDAD DEL AGUA

Las características biológicas, químicas y físicas del agua afectan su capacidad para sustentar la vida y su idoneidad para consumo y uso humanos (CEC).

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estas características afectan la capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal (CEC).

De ahí que el agua residual cuya composición es variada y que tiene origen en las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas poseen características que admiten su mala calidad (SEMARNAT, 1996).

Debido a que pueden medirse fácilmente y constituir una forma de clasificar posibles factores de estrés para la salud del sistema acuático, los parámetros básicos de la calidad del agua incluyen la temperatura, conductividad, turbiedad, pH y oxígeno disuelto (Peters & Campoy Favela José, 2009).

Igualmente la calidad del agua puede determinarse mediante el contenido de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio), sólidos suspendidos, sólidos disueltos, metales pesados, agentes patógenos y compuestos orgánicos, permitiendo determinar los posibles impactos en la vida acuática y en los seres humanos (Peters & Campoy Favela José, 2009).

A continuación, en la Tabla 1, se presentan los contaminantes físicos, químicos y materiales orgánicos del agua residual de tipo doméstico. No se incluyen los bacteriológicos (Coliformes fecales y totales, *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Salmonella*, *Giardia lamblia*) debido a que estos dependen del lugar de muestreo y no es posible considerar un promedio para establecerlos como concentración típica.

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica (mg/L) (Metcalf & Eddy, 1995).

Constituyente	Concentración		
	Alta	Media	Baja
Sólidos totales	1,200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijos	525	300	142
Volátiles	325	200	105
En suspensión totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables (mg/l)	20	10	5
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días y a 20°C	400	220	110
Carbono Orgánico Total (COT)	290	160	80
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1,000	500	250
Nitrógeno total (N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo total (P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (Co ₃ Ca)	200	100	50
Grasa	150	100	50

1.2 NORMATIVIDAD

La preocupación por las descargas del agua residual y sus efectos al entorno ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico, La Protección al Ambiente y la Ley de Aguas Nacionales, cuyo objetivo es prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos (de la Peña, Ducci, & Zamora, 2013).

Asimismo, el Estado Mexicano ha creado un marco jurídico que se encarga de regular las descargas de agua residual a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas:

La **NOM-001-SEMARNAT-1996**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas del agua residual en aguas y bienes nacionales, mientras que la **NOM-002-SEMARNAT-1996** establece los límites máximos permisibles de

contaminantes en las descargas del agua residual a los sistemas de alcantarillado. Por otra parte, la **NOM-003-SEMARNAT-1997** establece los límites máximos permisibles de contaminantes para el agua residual tratada que se reúsen en servicios al público.

Para este estudio, nos centraremos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

La primera establece la concentración de contaminantes básicos y tóxicos para las descargas del agua residual a aguas y bienes nacionales, estos últimos pueden ser ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras, suelo y humedales naturales.

La concentración de contaminantes puede variar dependiendo del uso del cuerpo receptor como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (SEMARNAT, 1996).

Parámetro mg/l	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo					
	Uso público urbano (B)		Uso en riego agrícola (A)		Protección de vida acuática (C)		Uso público urbano (C)		Uso en riego agrícola (B)		Recreación (B)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Estuarios (B)		Uso en suelo agrícola (A)		Humedales Naturales (B)			
	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
CONTAMINANTES BÁSICOS																						
T (°C) (1)	40	40	NA	NA	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	NA	NA	40	40	
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia floculante (3)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	NA	NA	1	2		
Sólidos suspendidos totales (SST)	75	125	150	200	40	60	40	60	75	125	75	125	150	200	75	125	NA	NA	75	125		
DBO5	75	150	150	200	30	60	30	60	75	150	75	150	150	200	75	150	NA	NA	75	150		
N total	40	60	40	60	15	25	15	25	40	60	NA	NA	NA	NA	15	25	NA	NA	NA	NA		
P total	20	30	20	30	5	10	5	10	20	30	NA	NA	NA	NA	5	10	NA	NA	NA	NA		

PD= promedio diario, PM= promedio mensual, A=ausente, NA= no es aplicable. Unidades en mg/l excepto en donde se indica.

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

(1) Instantáneo (2) Muestra Simple Promedio Ponderado (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006

Especificaciones:

El límite máximo permisible para la concentración de contaminantes patógenos para las descargas de agua residual vertidas a cuerpos receptores es de 1,000 y 2,000 el número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.

Para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), el límite máximo permisible de huevos de helmintos para riego restringido es de 5 por litro, para el riego irrestricto es de 1 por litro.

A continuación se enuncian definiciones que son de utilidad para comprender la norma.

Los coliformes fecales son bacterias alimentadas por residuos humanos o animales que sirven como indicadores de contaminación.

El riego restringido se refiere a la utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas.

En cuanto al riego irrestricto, es la utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

Por otra parte, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para el agua residual tratada que se reúsen en servicios al público tales como lagos artificiales con y sin acceso al público, en servicios al público con contacto directo como fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines y finalmente en servicios al público con contacto ocasional como panteones o sistemas de abastecimiento contra incendios

Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas según la NOM-003-SEMARNAT-1997, son los establecidos en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes (SEMARNAT, 1997).

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL					
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l	
Servicios al público con contacto directo	240	≥1	15	20	20	
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤5	15	30	30	

1.3 PRINCIPALES SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN EL PAÍS

Al cierre de 2014, el registro de plantas en operación fue de 2,337 instalaciones, con una capacidad instalada de 151.9 m³/s y un caudal tratado de 111.3 m³/s, que significa una cobertura nacional de tratamiento de agua residual municipal del 52.7% (CONAGUA, 2014).

La Tabla 4 corresponde a la evolución en la cobertura de tratamiento del agua residual hasta los datos más recientes publicados en noviembre del 2014.

Tabla 4. Evolución en la cobertura de tratamiento del agua residual (Elaboración propia, basado en datos de CONAGUA 2008, 2011 y 2014)

Año	2007	2010	2013	2014
Plantas de tratamiento de agua residual en operación	1,710	2,186	2,287	2,337
Caudal tratado (m ³ /s)	79.3	93.6	105.9	111.3

Ahora bien, la Comisión Nacional del Agua calcula el déficit de tratamiento en función del agua que recibe en las plantas de tratamiento (según INEGI, 2005, el 67.6% de la población está conectada a una red de drenaje); por el contrario, para este estudio, se empleará en función al volumen de agua residual generada, independientemente de si ésta llega a una planta de tratamiento (Bunge, 2010).

El tratamiento del agua residual tiene como principal objetivo reducir el impacto ambiental, proteger la salud y promover el bienestar de las sociedades. La complejidad de su depuración, se da en función de la carga contaminante y se clasifica en pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado.

El pretratamiento tiene como objetivo remover del agua residual constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que no pueden tratarse conjuntamente con los demás componentes del agua (Romero, 2004).

El tratamiento primario se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro sistema, este tratamiento remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual y entre 35 y 50% de la DBO.

El tratamiento secundario remueve DBO soluble y sólidos suspendidos principalmente, e incluye procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación.

El tratamiento terciario, generalmente remueve nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o para mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua residual para su reuso (Romero, 2004).

El proceso de tratamiento más común en México se lleva a cabo en lagunas de estabilización (38%), seguido por las plantas de lodos activados (24%).

Sin embargo, en términos del caudal tratado, un poco más del 40% se procesa con lodos activados mientras que el 18% se trata en lagunas de estabilización. (Bunge, 2010)

Los tres estados con la menor cobertura de tratamiento de agua residual son Hidalgo, Campeche y Yucatán con el 6.3%, 5.3% y 3.3%, respectivamente (CONAGUA, 2014)

En cuanto al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales, para diciembre de 2014 el Inventario Nacional de PTAR tiene registrados a 71, en su mayoría ubicados en Oaxaca, Michoacán y Tabasco, y 93 sistemas de tratamiento basados en fosa séptica-humedal.

El sistema de tratamiento de agua residual que se empleará para la comunidad El Alberto, Ixmiquilpan, Hidalgo será un sistema dual biodigestor + humedal, el primero en Hidalgo en su tipo (CONAGUA, 2014).

En México, se habían habilitado, hasta el año 2000, 130 humedales artificiales, de los cuales, la mayoría eran de flujo horizontal y algunos de flujo vertical, entre todos trataban un caudal de $0.48\text{m}^3/\text{s}$, sólo un 0.61% del total de agua residual en México. (Miranda, 2000).

1.4 PROBLEMÁTICA EN MÉXICO RESPECTO AL SANEAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

En México, las infecciones intestinales —además de las respiratorias— son la principal causa de muerte en niños menores de cinco años (Bunge, 2010).

Nuestro país ha experimentado un crecimiento considerable en su población, incrementándose de manera importante el consumo de agua, y consecuentemente, el volumen de agua residual.

Ya sea en zonas rurales o urbanas, el 64% de las plantas de tratamiento del país vierten sus aguas tratadas en cuerpos de agua naturales, como ríos, arroyos, esteros, acuíferos o en el mar. Aunado a lo anterior, la mayor parte del caudal tratado no remueve la totalidad de los patógenos y sólidos suspendidos, pocas veces se cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los cuerpos de agua resultan severamente contaminados.

En cuanto al nivel de saneamiento en sus aguas, los países más ricos sobresalen, sin embargo, las correlaciones entre el nivel de saneamiento de las cuencas y el nivel económico o de desarrollo de las mismas no resultan positivas.

Probablemente su rendimiento se debe, más que a las capacidades económicas de los territorios, a la fortaleza de sus instituciones y a la planeación adecuada de las plantas de tratamiento. Ya que algunas de ellas no están adaptadas a las condiciones climáticas y físicas del lugar al que prestan servicio.

El reto entonces será explorar si verdaderamente el saneamiento deficiente en nuestro país tiene que ver con cuestiones relacionadas a la estructura, vínculos y capacidades institucionales o a meros intereses de tipo político (Bunge, 2010).

1.5 COMUNIDADES RURALES Y SU VÍNCULO RESPECTO AL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual no tratada, al ser liberada en un cuerpo de agua, afecta a aquellas comunidades más marginadas que no tienen acceso al agua entubada y que consumen agua proveniente directamente de los reservorios naturales o artificiales (Bunge, 2010).

En México, existe un gran número de comunidades rurales, semiaisladas, (47,233 localidades con 100-2,499 habitantes, datos de 2011) que no cuentan con sistemas de captación de aguas residuales, por lo que comúnmente se vierte el agua residual en el terreno o a un cuerpo de agua cercano, repercutiendo en la calidad del suelo, de agua superficial y del agua subterránea (CEPIS, 1992); o bien se utiliza para el riego de cultivos con la consecuencia de un aumento en la morbilidad y mortalidad por enfermedades infecciosas (Bitton, 1994).

Sin embargo, como se mencionó en la sección anterior, no existe relación entre el nivel económico (PIB), desarrollo (IDH), grado de urbanización (índice de urbanización) o población (número absoluto y densidad) y el nivel de saneamiento de una cuenca. Esta falta de relación vuelve el asunto más complejo y queda pendiente averiguar las causas reales del déficit de tratamiento del agua residual, no sólo en las zonas rurales, sino también en todo el país (Bunge, 2010).

1.6 PROCESOS DE SANEAMIENTO EN EL AGUA RESIDUAL DE LAS COMUNIDADES RURALES EN MÉXICO

“El derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos” (ONU, 2010). Sin embargo, esto no ocurre, entre otras razones, por la falta de tecnología y recursos, así como por la mala gestión hídrica (Torres Alonso, 2014).

Por su propia situación geográfica y desarrollo, las pequeñas comunidades presentan una serie de problemas específicos que hacen difícil la provisión de sistemas tanto de abastecimiento de agua potable como de tratamiento del agua residual.

Los principales problemas que se presentan están relacionados con: 1) normativas de vertido estrictas, 2) costes por habitante elevados, 3) limitaciones de financiación y 4) presupuestos limitados para la explotación y mantenimiento de las instalaciones. (Metcalf & Eddy, 1995).

Los sistemas de tratamiento que más se emplean en las comunidades rurales, que cuentan con plantas de tratamiento de agua residual municipal son las lagunas de estabilización y los humedales artificiales precedidos de sedimentación o fosa séptica (Zurita Martínez, Osvaldo, & Araceli, 2011).

1.7 PRETRATAMIENTO: FOSA SÉPTICA

Las fosas sépticas son las unidades de tratamiento que más comúnmente son instaladas para tratar el agua residual doméstica de pequeñas localidades donde no existe drenaje, estas unidades deben construirse lo más alejado posible de la zona habitada.

Su tiempo de retención varía de 1 a 3 días, esto depende del grado de eliminación de materia orgánica que se desee. Con este tratamiento se obtiene una remoción del 30% al 60% de DBO₅ y SST (Tesillos Martínez & Ubaldo Alvide, 2007).

1.7.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia corresponde a la degradación y estabilización de compuestos orgánicos mediante microorganismos en ausencia de Oxígeno (biometanización) que conduce a la producción de biogás (Vögeli, Riu Lohri, Gallardo, Diener, & Zurbrügg, 2014).

La degradación de materia orgánica por bacterias anaeróbicas para producir metano es un proceso que constituye uno de los principales mecanismos de putrefacción de la naturaleza, además, la digestión anaerobia ha sido practicada por décadas en países en desarrollo (Vögeli, Riu Lohri, Gallardo, Diener, & Zurbrügg, 2014).

1.7.2 TIPOS DE BIODIGESTORES

Un biodigestor es un reactor cerrado, hermético e impermeable, donde se lleva a cabo una digestión o fermentación en un sistema cerrado, cuyo interior es anaerobio y dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (Young, 1986).

A continuación se presenta una clasificación basada en el régimen de carga de la materia orgánica (Cázares Martínez, 2013).

a) *Régimen estacionario*: este tipo de biodigestor se carga una sola vez en forma total y se descarga una vez que se detiene la generación de biogás. Cuenta con una sola entrada/salida para la materia orgánica y una salida de gas conectada a un gasómetro flotante donde se almacena el biogás.

Normalmente se aplica cuando la materia a procesar está disponible de manera intermitente. Es un sistema de fácil construcción y produce una mayor cantidad de biogás en comparación con biodigestores de otro tipo.

b) *Régimen semicontinuo*: Más pequeño que el reactor anterior, los hace ideales para uso doméstico en el medio rural. Generalmente cuentan con 3 orificios: uno central que se utiliza para realizar la carga inicial y cuando se requiere limpiar el tanque, un segundo orificio de entrada que permite cargar el tanque periódicamente con pequeñas cantidades de materia orgánica nueva y finalmente un orificio de salida que permite retirar de manera periódica el material orgánico degradado. Representa poca eficiencia en la producción de biogás, pero excelente en la producción de bioabono debido a los extensos tiempos de retención.

- c) *Régimen continuo*. Se utilizan principalmente para el tratamiento de agua residual en plantas de gran tamaño, la cantidad de biogás generado es grande.

1.7.3 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para evitar fallas durante el proceso es necesario tomar medidas de control en los siguientes aspectos (A, 2008):

- El intervalo de pH está comprendido entre 6.2 y 7.8, presentándose el rango óptimo entre 7 y 7.2. Con valor de pH menor a 6.2, las bacterias metanogénicas se ven afectadas severamente ocasionando la falla en el proceso.
- Mientras mayor sea la alcalinidad, se podrá mantener un pH a pesar de la generación de iones H^+ . Debido a la mayor actividad de las bacterias acidogénicas, ante sobrecargas de materia orgánica el sistema puede acidificarse, lo que puede evitarse manteniendo una óptima alcalinidad con la presencia del ión bicarbonato o utilizando hidróxido de sodio (sosa).

1.7.4 BIODIGESTORES COMERCIALES

Existen en el mercado marcas que ofrecen al público un tanque biodigestor autolimpiable construido de polietileno, sin embargo, el propósito de dichos reactores no es la generación de biogás sino el tratamiento del agua residual (Cázares Martínez, 2013).

En el país, las empresas comerciales disponen de productos denominados biodigestores, diseñados para lugares donde no se cuenta con drenaje. Los biodigestores tienen varias capacidades (600 hasta 7,000 litros) y se plantea sobre todo para comunidades rurales. Básicamente cumple las funciones de una fosa séptica (Cázares Martínez, 2013).

Instalación: La profundidad máxima a partir de la tapa del biodigestor y la línea del terreno natural deberá ser de 10 cm.

En el fondo se requiere de una plantilla de concreto de espesor de 5 cm y diámetro de 60 cm. Verificando que el biodigestor quede centrado, adicionar cemento o cal en proporción del 6% del peso del relleno o tepetate (5 partes de tierra por 1 cemento). Usar arena con cemento seco para la parte cónica. Compactar antes de enterrar el biodigestor con ayuda de agua hasta la altura del registro de lodos. Estabilizar paredes con agua. Llenar al biodigestor conforme se va compactando el relleno.

Lodos: La distancia entre el biodigestor y el registro de lodos debe ser menor a 2 metros. La extracción de lodos, se debe realizar de 10 a 30 meses, según su uso. El fondo del registro tendrá un mínimo de 50 cm debajo de la válvula y se recomienda adicionar cal al lodo extraído.

Mantenimiento: Se recomienda realizarlo en periodo de estiaje de 12 a 24 meses, el primero a los 6 meses de la fecha de arranque. Antes de dar mantenimiento dejar ventilar el biodigestor por 10 minutos. Rociar el filtro con agua cada 3 o 4 extracciones de lodo.

Funcionamiento: Para un adecuado funcionamiento no se debe arrojar papeles, bolsas o toallas que impidan el flujo por obstrucción. No limpiar el inodoro con ácido muriático. Limpiar filtro cada 2 años.

1.8 HUMEDALES

Los humedales naturales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites están constituidos por vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional, las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos (Art.3 Fracción XXX de la Ley de Aguas Nacionales).

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

1.8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES

Los humedales son áreas de transición entre el suelo y el agua. El término humedal engloba una amplia gama de ambientes húmedos, incluyendo pantanos, marismas, ciénegas, esteros, praderas húmedas, llanuras de inundación, riberas de ríos (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

Todos los humedales, naturales o construidos, de agua dulce o salada, tienen una característica en común la presencia o cercanía de agua al menos periódicamente (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

1.8.2 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para utilizar las funciones naturales de la vegetación, suelo y población microbiana de un humedal y tratar los contaminantes de agua superficial, agua subterránea o agua residual (ITRC, 2003).

Los humedales artificiales depuran aguas domésticas, industriales y agrícolas, han sido empleados como tratamiento secundario en plantas de tratamiento, igualmente se han construido en climas tropical, subtropical, templado-subhúmedo y desértico-árido (Haro González & Aponte Hernández, 2010).

Funcionan por gravedad en un sistema tipo cascada pasando el agua residual por diferentes etapas de tratamiento hasta lograr su depuración (Urquiza y otros, 2006).

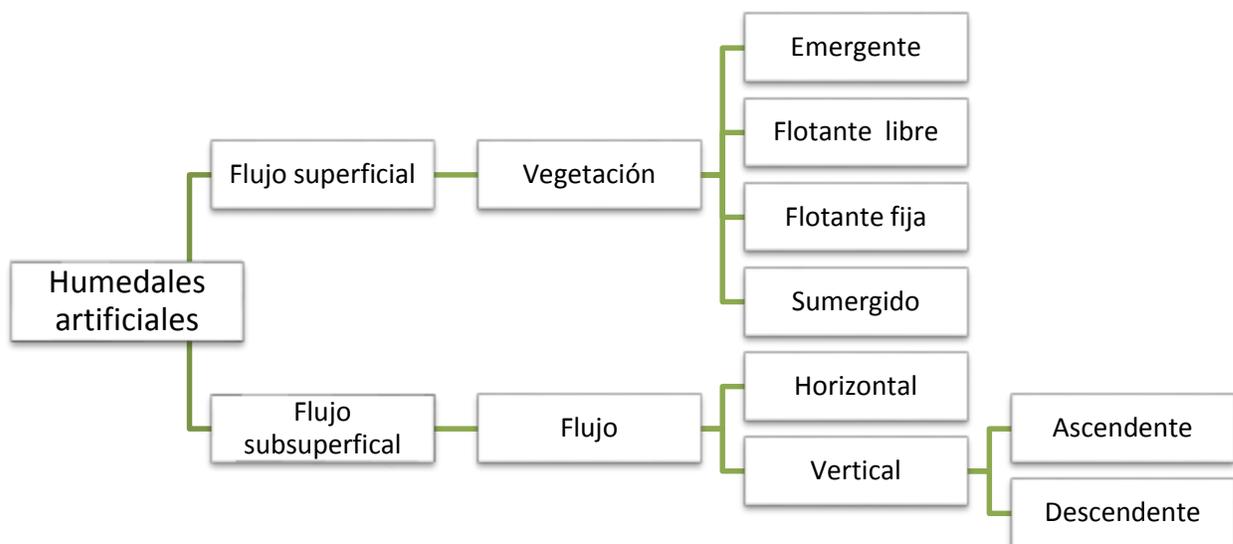
El primer sistema artificial de humedales se puso en marcha en Alemania (1974), desde entonces, estos sistemas se han utilizado a nivel mundial como una alternativa de remoción de contaminantes de agua debido a su alta efectividad y bajo costo (Haro González & Aponte Hernández, 2010).

1.8.3 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

De acuerdo con la clasificación hecha por Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, los humedales artificiales pueden clasificarse según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres.

Los humedales basados en macrófitas enraizadas pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial: si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y 2) humedales de flujo subsuperficial: si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de humedales según la vegetación y el flujo (Cano, 2013).



1.8.3.1 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como surface flow constructed wetlands o freewater surface constructed wetlands) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está directamente expuesta a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas tienen menor profundidad (de 0.1 m hasta no más de 0.60 metros) y tienen plantas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Cuentan también con una clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente (Rodríguez-Pérez de Agreda, 2003).

La profundidad baja del agua, la velocidad baja del flujo, y la presencia de los tallos de las plantas y basura regulan el flujo del agua. El tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (Reed y Brown, 1991) (Figura 1).

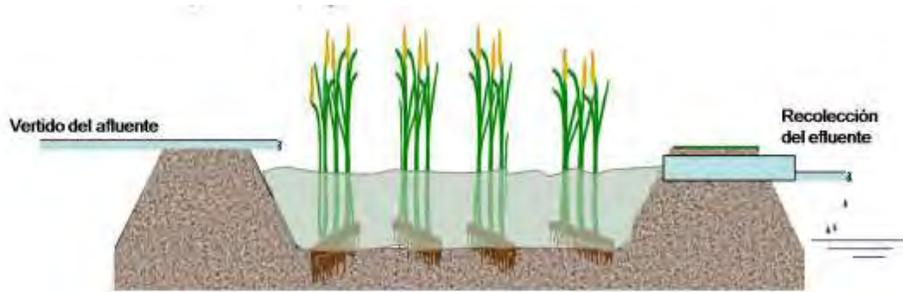


Ilustración 1. Humedal artificial de flujo superficial, (García Serrano & Angélica, 2008).

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden construirse en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.8.3.2 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*, se caracterizan porque la circulación del agua se realiza a través de un medio granular subterráneo, con una profundidad de agua cercana a los 0.60 metros. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema: a) humedales de flujo subsuperficial horizontal y b) humedales de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.8.3.2.1 HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL

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

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0.45 a 1 metro y tiene una pendiente de entre 0.5% a 1% (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)(Figura 2).

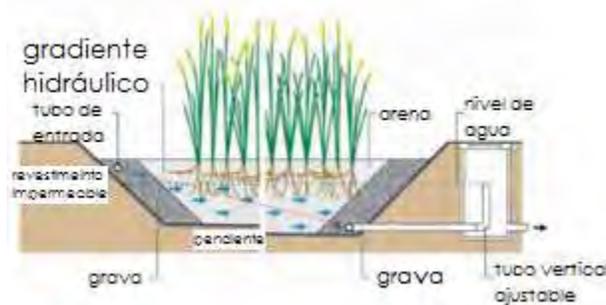


Ilustración 2. Humedal subsuperficial de flujo horizontal, (Morel & Diener 2006).

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

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

a) HIDROLOGÍA

En la mayoría de las zonas templadas con un clima moderado la evapotranspiración y la precipitación no son efectos críticos para el desempeño adecuado del humedal además la evapotranspiración será un factor importante si el área superficial es mayor comparada con el volumen del agua en el humedal (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015). Kadlec en el año de 1993, encontró que los densos de vegetación emergente reducen la

pérdida total de agua en el humedal artificial y llegó a la conclusión de que la vegetación elimina menos agua por transpiración que por lo evaporado de agua de la superficie abierta. Otros datos indican que la mayoría de los humedales muestran evapotranspiraciones iguales o menores a la evaporación en el humedal, que también puede ser alterada por la vegetación que se ubique alrededor del mismo. Si el humedal está sellado correctamente, la infiltración puede ser considerada despreciable.

b) ESTRUCTURAS PARA EL CONTROL DEL FLUJO

Dichas estructuras deben de ser sencillas y fáciles de ajustar, las entradas deben de ser independientes para asegurar una distribución uniforme del flujo. Deben diseñarse para conducir el caudal máximo de diseño y deben ser situados para facilitar el acceso y reducir al mínimo cortocircuitos. El tubo de PVC es recomendable. Si las entradas y las salidas son propensas a cambios por personal ajeno, deben existir estructuras que las protejan (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

ENTRADAS

Las entradas en un humedal subsuperficial incluyen colectores superficiales, colectores de fondo, canales perpendiculares a la dirección del flujo y vertedores simples (Figura 3).

El instrumento del afluente es típicamente un tubo plástico de orificios paralelos de igual tamaño a la misma elevación que se extiende a través de lo ancho del sistema. Se recomienda que el tubo este ubicado ya sea sobre la parte superior o bien cerca de la parte superior del lecho de piedra para futuros ajustes y mantenimiento. Se necesitará un divisor de flujo para celdas paralelas.

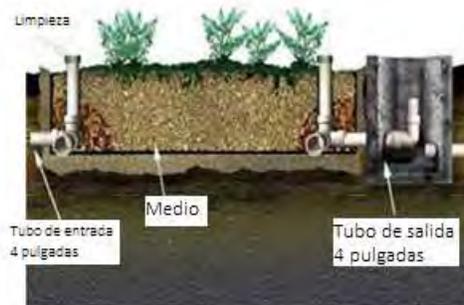


Ilustración 3. Estructuras de entrada y salida (Rathor, 2014).

SALIDAS

Para humedales de flujo subsuperficial las salidas incluyen colectores de fondo, vertedores o estructuras cerradas similares. El colector debe estar situado justo por encima de la parte inferior de la cama para proporcionar el control del nivel de agua, incluyendo el drenaje.

Tubos de subida ajustables o mangueras flexibles ofrecen un control de nivel de agua sencilla. Un codo de PVC unido a un eslabón giratorio ofrece un fácil control del nivel del agua. Si se utilizan tubos, deben evitarse diámetros pequeños (<12 pulgadas) ya que se obstruyen con la basura (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

El instrumento efluente de recolección es generalmente un tubo plástico perforado o con ranuras que se extiende a través de lo ancho del lecho para que recoja el efluente en forma uniforme. Se recomienda que el tubo esté ubicado en el fondo o cerca del fondo del lecho de piedra, e igual forma que el tubo de salida al extremo del efluente del humedal tenga la capacidad de ajustar la elevación, la cual permita que se aumente o disminuya el nivel del agua en el lecho de piedra. Dado que el colector está enterrado y después de la construcción inaccesible, se requiere una cuidadosa nivelación y compactación de sub-base durante la construcción. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio.

c) SUSTRATO

La selección del material granular para el humedal es crítica para el éxito del sistema, a medida que la distancia del flujo aumenta, la resistencia al mismo se hace mayor. Se debe evitar el flujo turbulento (ocasionado por el uso de gravas muy gruesas). Se recomienda colocar grava fina (0.25 – 16 mm) en la parte superior para evitar la formación de turba.

La membrana impermeable debe estar cubierta con 3 o 4 pulgadas de suelo para prevenir que las raíces la penetren. Asimismo, se recomienda compactar el fondo como si fuese una subrasante. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm (Figura 4).

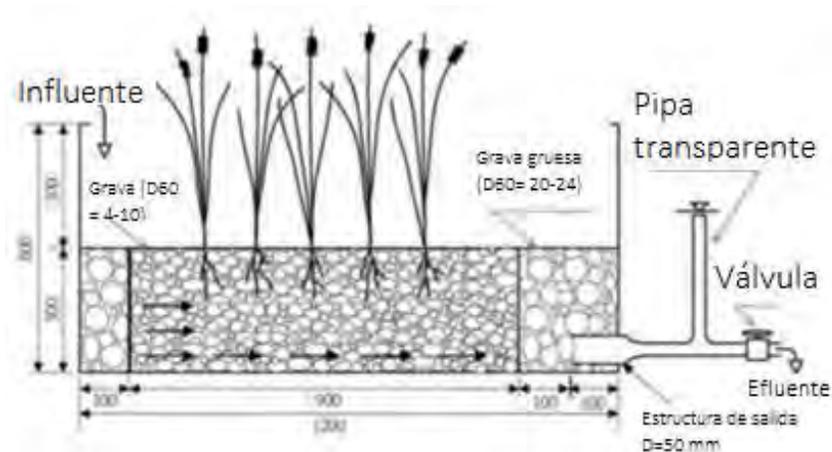


Ilustración 4. Estructura de un humedal artificial de flujo horizontal (Rathor, 2014).

Medio de filtración: A no ser que se garantice una conductividad hidráulica adecuada y permanente del propio suelo como substrato, ocurrirá fracaso del sistema debido a que se presentará la colmatación². Por eso se recomienda la utilización de gravas como substrato (Cole, 1998).

Suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 (mm) y pocos finos. La grava debe estar compuesta de piedras limpias consistentes y duraderas con capacidad de retener su forma y permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo (EPA, 2000). Evitar arreglo a base de arena fina diámetro menor a 0.5 (mm) ya que limitan la infiltración y la conductividad hidráulica (Drizo y otros, 2000). Asimismo, multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o por 0.1 para evitar problemas de atascamiento por acumulado de lodos, raíces y otros (Mena, 2010).

Pendiente preferente del 0.5 al 1% (valor usual 0.5), para humedal de flujo subsuperficial una profundidad de 0.30 a 0.60 (m) además la profundidad del agua será aproximadamente 95% de la profundidad del medio de soporte. Cuanto menor es la relación largo ancho, existirá una mejor distribución del flujo. Las relaciones de largo: ancho 1:1, 3:1 y como máximo 4:1. Un tiempo de retención hidráulica de 5 días garantiza un 80% de remoción (Llagas y Guadalupe, 2006).

La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, de entre 3 mm a 32 mm (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

² Obturación de los poros (Mena, 2007).

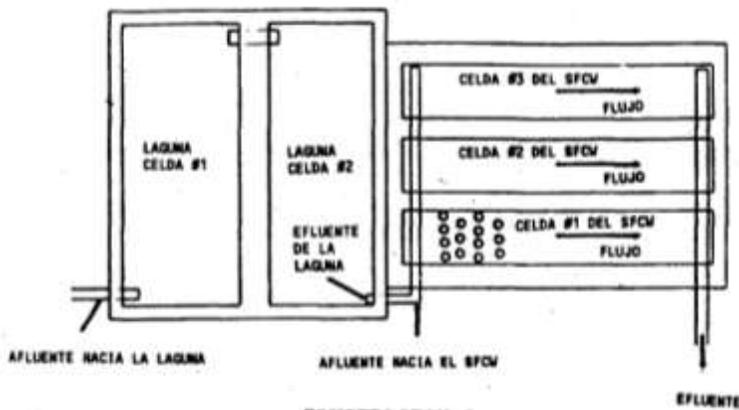


Ilustración 5. Configuración típica para un humedal de flujo subsuperficial, vista de planta (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).

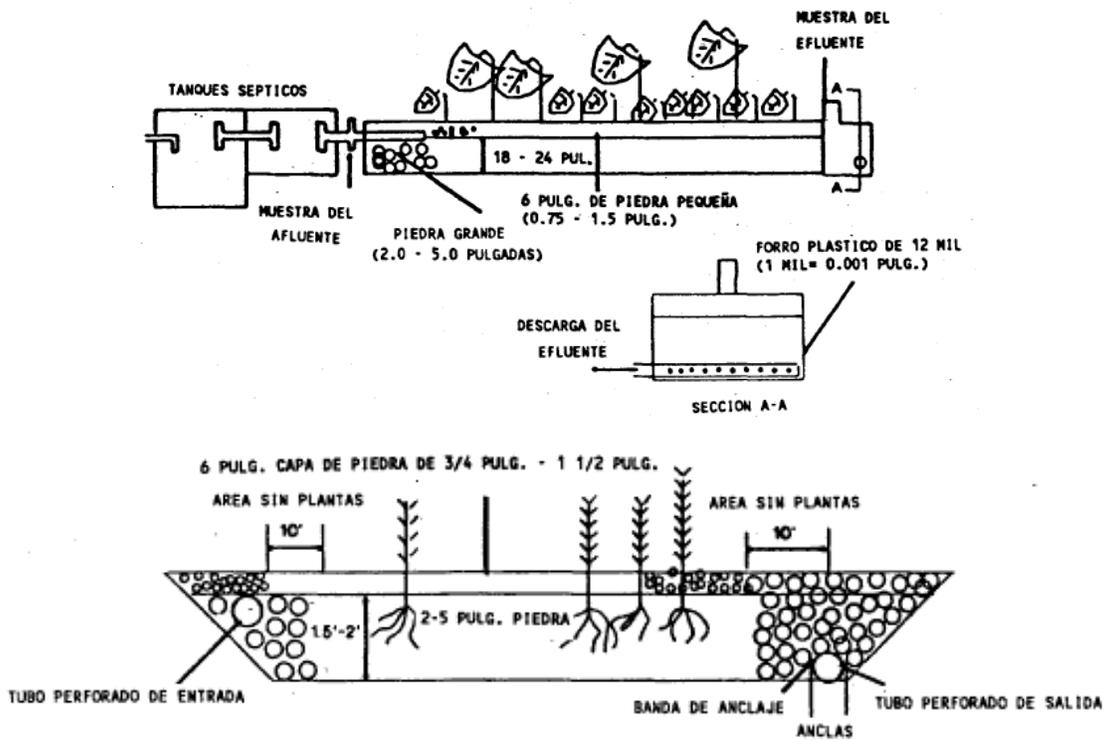


Ilustración 6. Configuración típica de un humedal de flujo subsuperficial, vista de perfil (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).

NOTA: Se requiere de como mínimo 1 día como tiempo de retención hidráulica.

Considerando para el diseño una porosidad de 0.38 para grava media (4 a 16 mm) del terreno natural y una conductividad hidráulica de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ (Tesillos Martínez & Ubaldo Alvide,

2007). Asimismo, se considera una porosidad de 0.59 para el tezontle con partículas de 1 mm (Ordaz Chaparro, 2010), debido a que la conductividad hidráulica es mayor consideraremos un valor de $1,000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ (Tabla 6).

Para el dimensionamiento se multiplicó el valor de la conductividad por 1/3 para evitar problemas de atascamiento por acumulado de lodos, raíces y otros.

Tabla 6. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales (Delgadillo, 2010).

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Conductividad hidráulica, ks ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$)	Porosidad, η %
Arena gruesa	2	100- 1,000	28-32
Arena gravosa	8	500-5,000	30-35
Grava fina	16	1,000-10,000	35-38
Grava media	32	10,000-50,000	36-40
Roca gruesa	128	50,000-250,000	38-45

d) VEGETACIÓN

Muchos humedales subsuperficiales son plantados manualmente. Se recomiendan plantas aleñañas al sistema de tratamiento debido a que ya están adaptadas al clima local.

En los humedales artificiales para el tratamiento de agua residual doméstica, agua residual agrícola, y otras relativamente altos en materia orgánica, los juncos (ya sea de tallo suave (*Scirpus validus*) o comunes de tres cuadrados (*Scirpus punges*)) se utilizan a menudo porque son tolerantes a los altos niveles de nutrientes, se establecen fácilmente y no son invasivos. Corazones de 3 a 4 pulgadas de diámetro (8 a 19 cm) que contengan a la planta pueden ser trasplantados al humedal, sin embargo debe tenerse cuidado que éste no contenga semillas de otra planta que pueda afectar al sistema. Se recomienda el uso de raíz / rizoma individuo con brotes en crecimiento por lo menos de 8 pulgadas (0.2 m) de largo. La raíz / rizoma se debe colocar en el medio a una profundidad igual al nivel de agua de funcionamiento esperado. Se recomienda colocar azalea y apio en la parte final del humedal (Miranda Ríos, 2000). 8 a 10 plantas por metro cuadrado.

Plantar alrededor para controlar erosión y clima.

Tabla 7. Penetración de la raíz en el medio, (Villaseñor Huidobro, 2011).

Planta	Penetración de las raíces en el medio (m)
Junco (<i>Scirpus</i>)	0.30 a 0.60
Carrizo (<i>Phragmites</i>)	0.40

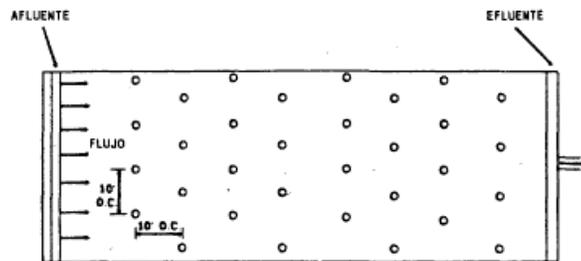


Ilustración 7. Densidad de vegetación en un humedal de flujo subsuperficial (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).

NOTA: Se sugiere que las plantas se coloquen a 10 pies entre sus centros. Se deben eliminar las plantas adicionales que puedan desarrollarse.

Con la intención de comparar la eficacia entre humedales de flujo horizontal y los de flujo vertical, la [Tabla 8](#) presenta porcentajes de remoción de distintos parámetros para un humedal de flujo horizontal.

Tabla 8. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en humedales subsuperficiales de flujo horizontal (Cano, 2013).

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	80-90
Sólidos suspendidos totales	80-95
Nitrógeno total	15-40
Fósforo total	30-45

1.8.3.2. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL

También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben el agua residual de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación

de agua, el agua infiltrada se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del humedal.

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

A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera y los resultados que se han obtenido son promisorios (Kolb, 1998).

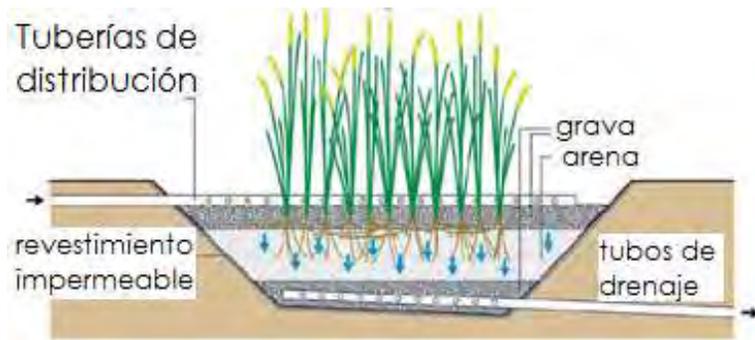


Ilustración 8. Humedal subsuperficial de flujo vertical, (Morel & Diener, 2006).

Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salida al exterior (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Finalmente, en la Tabla 9, se presentan los valores de remoción para un humedal de flujo vertical.

Tabla 9. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en humedales subsuperficiales de flujo vertical (Cano, 2013).

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	75-90
Sólidos suspendidos totales	65-85
Nitrógeno amoniacal	90
Nitrógeno total	< 60
Fósforo total	<35

1.9 PARÁMETROS DE DISEÑO

Los principales parámetros de diseño para sistemas de humedales artificiales incluyen el tiempo de retención hidráulica, la profundidad y geometría de los estanques (ancho y largo), la carga de DBO₅ y la carga hidráulica.

A continuación se presenta en la Tabla 10 los intervalos de valores de estos parámetros recomendados para este proyecto.

Tabla 10. Parámetros de diseño (Metcalf & Eddy, 1995).

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de sistema	
		Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Profundidad del agua	m	0.1-0.6	0.3-0.75
Carga hidráulica	m ³ /m ² *d	0.014-0.046	0.016-0.053
Superficie específica	ha/(10 ³ *m ³ /d)	7.1-2.15	20-70
Recomendaciones de (Cano, 2013)			
Carga máxima de DBO ₅	kg/ha*d	80	75
Tiempo de retención hidráulica	d	5-14	2-7
Espesor del sustrato	m	0.10-0.50	0.1-1.0
Control de mosquitos		requerido	no requerido
Largo: ancho		2:1 a 10:1	0.25:1 a 5:1

1.10 COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN ENTRE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL Y FLUJO VERTICAL

Considerando la teoría anterior, y justificando al humedal subsuperficial de flujo horizontal como solución a nuestro sistema de tratamiento combinado con un biodigestor, se presenta la siguiente Tabla 11 que ilustra un mayor alcance de depuración respecto a un humedal subsuperficial de flujo vertical.

De igual forma, al comparar las tablas 8 y 9 se concluye que con un humedal de flujo horizontal se presenta un mejor nivel de depuración para el agua residual.

Tabla 11. Comparación del porcentaje de remoción entre humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical (Mautner, 2015).

Parámetro (mg/L)	Horizontal (H) o Vertical (V)	Influente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Remoción
DBO ₅	H	162.3	8.1	95.0
	V	490.0	24.0	95.1
Nitrógeno total	H	85.2	25.9	69.7
	V	126.3	65.7	48.0
Fósforo	H	15.5	0.7	95.5
	V	15.5	6.1	60.5

CAPÍTULO 2. COMUNIDAD “EL ALBERTO”

2.2 CLIMA

El Valle del Mezquital, se caracteriza por su clima semidesértico, muy caliente durante el día y con bajas temperaturas por la noche. Hay escasa precipitación y la vegetación es principalmente xerófila (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Durante enero, el mes más frío, la temperatura promedio es de 18°C. Se registra una temperatura promedio de 13°C y de 21°C en los meses más calurosos correspondientes a los meses de junio a agosto. La precipitación anual promedio es de 409 milímetros (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

El municipio de Ixmiquilpan cuenta con una estación meteorológica con el mismo nombre y con clave 13-035, en el paralelo 20°28'55" de latitud norte y meridiano 99°13'15" longitud oeste y una altitud de 1,700 msnm (INEGI, 2014).

A continuación en la Tabla 12 se presentan la temperatura anual (°C) y la precipitación total anual (Tabla 13), registrados en la estación meteorológica Ixmiquilpan.

Tabla 12. Temperatura media anual (°C) del municipio de Ixmiquilpan con datos de INEGI 2000 y 2014.

Estación	Periodo	Temperatura promedio	Temperatura del año más frío	Temperatura del año más caluroso
Ixmiquilpan	1951-2003	18.2	16.3	19.4
	2002-2013	19.3	18.0	21.9

Tabla 13. Precipitación total anual (mm) del municipio de Ixmiquilpan con datos de INEGI 2000 y 2014.

Estación	Periodo	Precipitación promedio	Precipitación del año más seco	Precipitación del año más lluvioso
Ixmiquilpan	1951-2003	362.0	182.7	704.0
	2002-2013	362.9	215.8	544.9

Con la ayuda del mapa 5 del cuaderno estadístico municipal de Ixmiquilpan, Hidalgo, edición 2005 se confirma que el clima de El Alberto corresponde a semiseco templado (BS₁k) y ocupa el clima con el 2° lugar a nivel estatal.

Por otra parte, el clima en la posición número 5 es el semiseco semicálido (BS₁h), el cual se presenta en Ixmiquilpan y en su estación meteorológica (Tabla 14) (INEGI, 2014).

Tabla 14. Comparación entre clima de Ixmiquilpan y El Alberto, elaboración propia a partir de (ASRVM, 2010).

Clima	Descripción	Sitio
BS ₁ h	Semiseco, subtipo semiseco cálido, con temperatura media anual mayor a 22°C, temperatura media del mes más frío menor de 18°C, con lluvias en verano, porcentaje de precipitación invernal entre 5% y 10.2%, cálido.	Ixmiquilpan
BS ₁ k	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	El Alberto

Debido a que las temperaturas bajas, ocasionan que las tasas de descomposición microbiana sean más lentas, las dimensiones del humedal deben aumentar para adaptarse a las velocidades de reacción más lentas (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015). Por lo tanto la temperatura para el diseño del humedal será de 18°C.

2.3 TOPOGRAFÍA

La importancia de la topografía radica en diseñar al humedal con el entorno, es decir integrarlo con el relieve natural del lugar. La selección apropiada del terreno debe considerar el uso de suelo, su acceso, el tipo de suelo, los recursos naturales con los que cuenta el entorno y los futuros efectos en su vecindad, traduciéndose su óptima ubicación en la reducción de costos significativos (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

Asimismo, el humedal debe estar ubicado lo más cercano a la fuente del agua residual y contar con un gradiente hidráulico menor, para que el agua se mueva a través de la gravedad (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

De igual forma, la topografía permite determinar la distribución de los humedales, las áreas potenciales, así como la ampliación o creación de nuevas áreas para determinado tipo de humedal (Lewis, 1982).

Una buena parte del funcionamiento hidrológico del humedal depende del hidroperiodo³. Al mismo tiempo, éste está condicionado por la topografía del relieve donde se ubica el humedal. Cuando el diseño hidrológico no es el adecuado, el humedal no funciona (D'Avanzo, 1989).

Ahora bien, el Valle del Mezquital es una planicie con ligera pendiente que desciende hacia el norte, limitada por elevaciones topográficas que son en su mayoría conos volcánicos y productos asociados (Lesser Carrillo, Lesser Illades, Arellano Islas, & González Posadas, 2011).

La localización del registro que un miembro de la comunidad nos indicó con latitud 20°24'47.90"N y longitud 99°13'8.00"O con una elevación de 1,790 msnm, presenta una altitud mayor que la entrada del humedal. Con la ayuda de un GPSmap 60 CSx, estacas, flexómetro y el programa informático Google Earth se realizó el levantamiento topográfico del lugar que la comunidad nos asignó para la planta de tratamiento de agua residual que se presenta en el capítulo siguiente.

A continuación, en la figura 10 se presenta un perfil topográfico que inicia en el registro y termina en la entrada del humedal. Además se puede apreciar que el entorno brinda una pendiente conveniente para que el sistema trabaje por gravedad.

³ Periodo de tiempo en el cual los sólidos, cuerpos de agua y lugares permanecen mojados.



Ilustración 10. Perfil topográfico de la línea de conducción que va del registro a la entrada del humedal.

2.4 GEOLOGÍA

El Valle del Mezquital se ubica en el Altiplano Mexicano, dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, en donde forma un amplio valle dividido por serranías y cerros separados. En el área afloran rocas de tipo sedimentario e ígneo que varían en edad y composición (ASRVM, 2010).



Ilustración 11. Vista aérea del terreno para la instalación de la planta de tratamiento de agua residual.

El Valle está constituido por una alternancia de material piroclástico, lava y sedimentos lacustres conocidos como Formación Tarango del Paleógeno, que se encuentran cubiertos por una delgada capa de aluvión del Cuaternario. Las sierras que bordean el valle del Mezquital están formadas por rocas volcánicas, principalmente lava y en menor proporción toba del Paleógeno (Lesser Carrillo, Lesser Illades, Arellano Islas, & González Posadas, 2011).

Del mismo modo, el subsuelo se encuentra constituido por aluviones intercalados con sedimentos lacustres y coladas de basalto (Lesser Carrillo, Lesser Illades, Arellano Islas, & González Posadas, 2011).

Consultando el mapa 5 del cuaderno estadístico municipal de Ixmiquilpan, Hidalgo, edición 2005, se presenta en la Tabla 15 la geología de El Alberto.

Tabla 15. Geología de El Alberto, elaboración propia basada en (INEGI, 2000).

Era		Periodo		Roca o Suelo		Unidad litológica	% de la superficie municipal
Clave	Nombre	Clave	Nombre	Nombre	Clave	Nombre	
C	Cenozoico	T	Terciario	Ígnea extrusiva	(a-bvi)	Andesita-brecha volcánica intermedia	6.39

2.5 EDAFOLOGÍA

Los suelos son el producto de la interacción, a través del tiempo, del material geológico, clima, relieve y organismos, igualmente, el suelo constituye una barrera que filtra, retiene, transforma y degrada las contaminaciones (Ambientales, 2014).

El mapa 7 del Cuaderno Estadístico Municipal de Ixmiquilpan, Hidalgo, 2005 muestra los suelos dominantes del estado. En él se aprecia que el suelo que prevalece en el Alberto es el Vp/3.

«V» se refiere al primer tipo de unidad edafológica y es predominante sobre el segundo, conocido técnicamente como Vertisol se caracteriza por su alto contenido de arcilla, la cual se expande con la humedad formando sobre la superficie pequeños montículos conocidos como microrelieve gilgai; en el subsuelo por desplazamiento de bloques se forman superficies pulidas conocidas como facetas. «p» corresponde al subtipo de suelo conocido como pélico y significa negro. «3» Representa la clase textural fina (mayor a 35% de arcilla), dentro de los 30 cm superficiales además, el suelo posee baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. (INEGI, Guía para la interpretación de la Carta Edafológica).

Un aspecto es que la Ciudad de México drena su agua residual hacia el Valle del Mezquital a través de los llamados Gran Canal del Desagüe, Interceptor Poniente, Emisor Central y en un futuro por el TEO. Los dos primeros cruzan la divisoria entre las cuencas de México y Mezquital a través de los túneles de Tequisquiác y el tajo de Nochistongo, para incorporarse a los ríos Salado y El Salto respectivamente (Figura 11) (Lesser Carrillo, Lesser Illades, Arellano Islas, & González Posadas, 2011).

El río El Salto descarga en la presa Requena, de donde continúa como el río Tula circulando hacia el norte. Actualmente la zona recibe aproximadamente 75 m³/s de agua residual no tratada para el riego de unas 90,000 hectáreas (Cuenca, 2008). El agua residual es mezclada con la escorrentía urbana y agua natural superficial antes de ser descargada a las zonas de riego. Cerca del 40% del agua aplicada se infiltra al acuífero (Carmona Paredes & Muñiz Arcila, 2014).

Finalmente el río Tula se une al río Moctezuma que es uno de los principales afluentes del río Pánuco, el cual desemboca en el Golfo de México (ASRVM, 2010).

2.6 DEMOGRAFÍA

Según el Censo de Población y Vivienda del 2010, la comunidad de El Alberto cuenta con una población de 834 habitantes.

A continuación se presenta la evolución de la población de El Alberto de 1900 hasta el 2010.

Tabla 17. Evolución de la población de El Alberto de 1900- 2010 (INEGI).

Año	Hombres	Mujeres	Total
2010	397	437	834
2005	251	289	540
2000	611	624	1,235
1995	662	645	1,307
1990	541	581	1,122
1980	532	494	1,026
1970	-	-	684
1960	275	299	574
1950	306	310	616
1940	73	80	153
1930	62	87	149
1921	52	64	116
1910	62	60	122
1900	279	341	620

2.6.1 ORGANIZACIÓN ESPACIAL

Prácticamente todas las edificaciones actuales son construidas con tabique y concreto. En muchos casos la migración ha copiado la arquitectura estadounidense de casinos y casas. Tanto delegaciones municipales, parques, bibliotecas, kioscos, templos evangélicos y casas particulares, son costeados desde los Estados Unidos (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Los municipios y el estado de Hidalgo se encargan de construir los centros de salud, las escuelas y el alumbrado, pero en muchas ocasiones la comunidad también coopera. Las propiedades en su mayoría son particulares, la propiedad comunal es ejidal (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

2.6.2 ORGANIZACIÓN SOCIAL

Las autoridades civiles en las comunidades responden al esquema de los delegados municipales que el gobierno del estado reconoce a través de la Ley Orgánica Municipal. Estas autoridades son elegidas en asambleas comunitarias. La elección se realiza a través del voto ciudadano, sin importar que los electos pertenezcan al grupo católico o evangélico. Dicha

asamblea es el primer nivel de organización social al interior de la comunidad; de ella emanan las autoridades de la delegación municipal y los comités de agua potable y obras. El delegado es quien gestiona ante las autoridades del municipio las demandas de su localidad y mantiene el orden al interior de la comunidad (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Los migrantes, por su parte, han ido modificando y reelaborando tanto las relaciones sociales como el estatus comunitario, porque aunque físicamente no estén presentes, siguen perteneciendo a la comunidad, siempre y cuando cumplan con su deber ciudadano. En comunidades donde el índice migratorio masculino rebasa el 50%, los delegados son electos incluyendo a los migrantes (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Las faenas son obligatorias, al igual que las cooperaciones. Cuando alguien vive fuera de la comunidad, tiene que pagar la faena a una persona que viva en ella para no perder su estatus como miembro de la comunidad y tener derecho al panteón, riego y voto en las asambleas (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

2.6.3 ASPECTOS ECONÓMICOS

El Valle del Mezquital es una tierra de contrastes, pues a pesar de su aridez, 61% de su población, aproximadamente 420 mil habitantes, viven de la agricultura y han hecho de esta región, mediante el uso del agua residual no tratada, el granero de Hidalgo (Cruz Sánchez, 2011).

Para entender la fertilidad que las aguas negras trajeron a un lugar estéril, tomemos el estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2010) quien encontró que en esta región en 2010 se producían 84 toneladas de alfalfa por hectárea, mientras que la media nacional era de apenas 54.90 toneladas.

Don Gastón, un productor del municipio de San Salvador, espera producir 10 toneladas de maíz por hectárea y un pago de 2 mil 300 pesos por tonelada (Cuenca, 2008). A pesar de que Ixmiquilpan no corresponde a los 14 de los 25 municipios del valle del Mezquital que irrigan con agua cruda la totalidad de sus sembradíos (Cruz Sánchez, 2011), es un asunto que confiere a todos.

Por su ubicación, la comunidad El Alberto goza de una situación privilegiada, en virtud de poseer recursos naturales que le permiten explotar el turismo orientado al termalismo (Hernández Calzada, Salazar Hernández, & Mendoza Moheno, 2010).

Al mismo tiempo, el turismo es una actividad económica que distingue a Ixmiquilpan, ya que sus balnearios, bellezas naturales, ferias culturales, eventos deportivos y de esparcimiento, así como las construcciones del siglo XVI al XVIII atraen a turistas de Hidalgo y de entidades que en su mayoría son vecinas. En la última década se ha favorecido el turismo rural y ecológico con la construcción de dos desarrollos, uno de ellos ubicado en El Alberto: el Gran Cañón. (Ixmiquilpan, 2012).

Por otra parte, el maguey también forma parte de la economía municipal. De sus hojas se obtiene la fibra del maguey (*ixtle*, en lengua *hñähñú*) para elaborar estropajos, ayates y lazos, además del pulque para autoconsumo y venta. (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Hace siete años, en la comunidad El Alberto, 250 mujeres de cinco comunidades del Valle del Mezquital se organizaron para elaborar de manera artesanal estropajos (esponjas para baño) que tienen gran demanda en Inglaterra, mercado en el cual colocan 45 mil piezas anuales (Camacho, 2006).

Después del laborioso proceso de obtención de las largas tiras de hilo, con habilidad, van tejiendo las esponjillas o estropajos por las cuales reciben 15 pesos. Su ingenio les ha permitido crear manteles, estropajos de formas diversas y bolsos de mano (Camacho, 2006).

Finalmente, la ganadería es escasa y su explotación se da a nivel familiar. Se crían principalmente ovinos, caprinos y aves de corral. La migración, por su parte, ha ido fortaleciendo la economía de la región, las casas de cambio abundan en la ciudad de Ixmiquilpan (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

2.6.4 MIGRACIÓN

La migración a los Estados Unidos de América (alto según el índice de intensidad migratoria, 2010) ha ocasionado que las remesas, ascienden a entre tres y cuatro millones de dólares mensuales para el municipio de Ixmiquilpan (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Se ha convertido en tradición que las familias procuren que sus jóvenes emigren desde temprana edad. En muchas ocasiones, a los pocos días de terminar la secundaria los chicos parten hacia Estados Unidos. Los principales puntos de migración en aquel país son Las Vegas, Carolina, Texas, Atlanta y Florida. Antes, el ramo principal en que los migrantes se ocupaban era la agricultura, pero ahora se han diversificado hacia la construcción y los servicios (Moreno Alcántara, Garret Ríos, & Fierro Alonso, 2006).

Debido a la migración, donde los hombres pasan la mayor parte de sus vidas y regresan por temporadas cada dos o tres años, para luego regresar a trabajar en campos agrícolas, restaurantes o fábricas de aquel país, la mayoría de las mujeres son jefas de familia (Camacho, 2006).

2.7 SANEAMIENTO

Actualmente el agua residual generada por la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se envía a Hidalgo y, sin ningún tratamiento se utiliza para riego agrícola en más de 80 mil hectáreas de cultivos (CONAGUA, Planta de Tratamiento de Agua Residual Atotonilco, 2011).

Hidalgo cuenta con tan solo 24 plantas de tratamiento de agua residual posicionándose en el antepenúltimo lugar a nivel nacional en el tratamiento de agua residual, evidenciando la falta de planeación y ejecución en este rubro. Ahora bien, según el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual, 2014 Ixmiquilpan cuenta con tan sólo 2 sistemas de saneamiento de agua residual, siendo el proceso anaerobio su principio. Ambas plantas de tratamiento poseen una capacidad instalada de 2 l/s con un caudal tratado de 1.5 y 1.8 l/s. (CONAGUA, 2014).

El Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social para el municipio de Ixmiquilpan, 2010 indica que el 11% de la población total registrada hasta ese año corresponde a viviendas que no disponen de drenaje, mientras que el 10.5% de las viviendas no disponen de agua entubada de la red pública.

Al parecer el escenario encontrado en la zona es desafiante, debido a que hay sitios que a pesar de contar con diversidad y potencial de desarrollo ya sea turismo o agricultura, tiene indicadores altos de pobreza y migración.

En cuanto al saneamiento y salud, es alarmante debido a que de los 14 casos de cólera que se registraron en el país en 2014, 13 tuvieron lugar en Hidalgo (Martínez, 2016), sin contar con otros padecimientos como tifoidea, diarreas, amibiasis (alrededor de 33 casos por día (Martínez, 2016)), salmonelosis, paludismo, dermatitis, conjuntivitis, asma y la presunción hasta de cáncer (Cuenca, Aguas negras contaminan salud y tierras, 2008).

Cuando acepté este tema de tesis estaba emocionada. Bastó con escribir en el buscador Valle del Mezquital para ilustrarme con diversos estudios, publicaciones, notas periodísticas algunas a favor y otras en contra sobre la arriesgada situación que se crea, vive y acepta en el denominado vergel residual, lugar no tan alejado de la capital del país.

En fin, no sólo el gobierno, agricultores, habitantes e investigadores, exhiben la necesidad con mayúsculas, de ponerse en acción. Todos nos vemos afectados, el entorno, la vegetación y la fauna. Desafortunadamente impera la indiferencia, la costumbre y la condena.

Por consiguiente, un equipo interdisciplinario conformado por futuros ingenieros civiles y un ingeniero químico, asesorados por 2 especialistas en el tema, visitamos El Alberto. Primero reconocimos el lugar y posteriormente muestreamos el agua residual, realizamos actividades de campo y me atrevo a afirmar que a pesar de que la densidad de población es baja, cada habitante desempeña su rol en la comunidad a tal grado que con su organización han adquirido apoyo no sólo económico, sino también de capital humano que busca impulsar el desarrollo y la calidad de vida en su localidad. Tal es el caso de este proyecto, que contribuirá al empleo de agua que cumpla con las normas mexicanas tanto para la descarga de agua residual a aguas y bienes nacionales, como para su reuso en servicios al público.

Ojalá otros pueblos consideraran este suceso y reprodujeran lo que con ayuda de El Alberto será un éxito y ejemplo.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló mediante una serie de visitas a la localidad El Alberto, en las cuales se muestreó el agua residual para su caracterización, se midió su caudal, se realizó el levantamiento del terreno destinado a la planta de tratamiento de agua residual así como la toma de muestras de suelo para su caracterización.

Debido a la carencia de planos de la red de alcantarillado de la comunidad, se estableció el punto de muestreo bajo la recomendación de una comitiva local con conocimiento del punto con mayor número de usuarios conectados a dicha red, para la selección del punto de muestreo, también se tomó en cuenta su cercanía con la ubicación de la planta de tratamiento de agua residual. El punto de muestreo “Escuela” y el nombre del sistema de tratamiento de agua residual se deben a su cercanía con la única escuela primaria de El Alberto. Así, se muestreó el agua residual a partir de un registro localizado antes de la descarga directa al río Tula.

3.1 MUESTREO DEL AGUA RESIDUAL

El muestreo se realizó los días 21, 23 y 24 de abril del 2015, con un horario de 6:00 a 21:00 horas. Asimismo, se realizaron 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 18. Igualmente, se aforó el gasto de la descarga para la obtención de un caudal promedio.

Tabla 18. 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

Las consideraciones para el muestreo del agua residual fueron las siguientes y cumplen con lo mencionado en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Una muestra simple es la que se toma en el punto de descarga de manera continua, en un día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente los procesos más representativos de las actividades que ocasionan la descarga. La duración deberá ser la necesaria para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer la composición del agua residual.

La muestra compuesta resulta de mezclar el número de muestras simples, según lo indicado en la siguiente Tabla 18.

Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMSi = VMC \frac{Qi}{Qt}$$

Donde:

$VMSi$ Volumen de cada una de las muestras i , (L).

VMC Volumen de la muestra compuesta, (L).

Qi Caudal medido en la descarga, (L/s).

Qt Suma de los gastos medidos en la descarga, (L/s).

Para la caracterización del agua residual, se requirieron 10 L de muestra compuesta recaudada del punto de muestreo de la figura 13. Finalmente, se obtuvieron 6 muestras simples y una muestra compuesta por cada día de muestreo, con un total de 36 muestras simples y 6 compuestas.



Ilustración 13. Punto de muestreo, con latitud N20°24'50.7" y longitud W099°13'06.6"

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Toda caracterización de agua residual implica un programa de muestreo apropiado para asegurar representatividad de la muestra y un análisis de laboratorio de conformidad con normas estándar que aseguren precisión y exactitud de los resultados (Fuentes Vivanco, 2016).

La composición del agua residual se refiere a la cantidad de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual. Tanto los constituyentes como sus concentraciones presentan variaciones en función de la hora del día, el día de la semana, el mes del año, y otras condiciones locales (Metcalf & Eddy, 1996).

Para la determinación de dichos componentes, la comunidad de El Alberto nos asignó un área de trabajo dentro de su balneario, donde se montó un pequeño laboratorio para medir parámetros de calidad *in situ*, como temperatura, pH, turbiedad, conductividad, oxígeno disuelto (OD) y salinidad para cada una de las muestras simples.



Ilustración 14. Balneario de El Alberto.

Ilustración 15. Pequeño laboratorio montado en el balneario de la localidad.

Otros parámetros analizados para las muestras simples y compuestas fueron: dureza, alcalinidad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), carbono orgánico total (COT), nitrógeno amoniacal y ortofosfatos, los cuales se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería, UNAM. La tarea desempeñada por el equipo de trabajo fue crucial para la caracterización tanto de muestras simples como compuestas, desde su almacenamiento temporal en el laboratorio *in situ* hasta su almacenamiento en la cámara fría del LIA, que se llevaron a cabo diariamente.

Adicionalmente a los parámetros indicados anteriormente, también se realizó el análisis de los parámetros biológicos: coliformes fecales y huevos de helmintos, obtenidos con ayuda del personal encargado del área de microbiología del LIA. Debido a que el Laboratorio de Ingeniería Ambiental no cuenta con los reactivos ni con el material para su determinación, el análisis de las muestras compuestas fue elaborado por el laboratorio certificado IDECA, analizando los parámetros grasas y aceites (G y A) y metales pesados, correspondientes a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

3.3 GASTO DE DISEÑO

Para propósitos de diseño, el caudal Q se debe considerar constante: puede ser el valor promedio del caudal producido en la vivienda, el valor máximo esperado o un valor estimado a partir de la dotación recomendada para la zona climática de interés (CONAGUA, 2010), y el porcentaje de aguas negras equivalentes a esa dotación (NEERI, 2007).

Para este estudio, se empleará al gasto máximo extraordinario como gasto de diseño para un periodo de diseño de 10 años.

3.4 LEVANTAMIENTO DEL TERRENO

Después de un levantamiento a un terreno con buenas dimensiones y alejado de la vida cotidiana. Se realizó el levantamiento del terreno que la comunidad destinó para la planta de tratamiento de agua residual, dicho procedimiento fue ejecutado con la ayuda de un GPSmap 60 CSx, estacas y flexómetro.

La superficie que corresponde a la planta de tratamiento de agua residual llamada "Escuela" cuenta con una superficie de aproximadamente 286 m^2 , delimitados por la poligonal azul de 84 metros de perímetro ilustrada en la figura 17.

Dicho polígono se encuentra relativamente cerca del Río Tula, alrededor de 170 metros. Además, al ubicarse en una cota más alta que la cota correspondiente a las zonas de cultivo, su ubicación favorece a la distribución del agua tratada para el riego agrícola.



Ilustración 16. Kiosco e iglesia aledaños al terreno destinado a la PTAR, marzo 2015.

Ilustración 17. Poligonal del sistema dual biodigestor-humedal artificial.

A continuación se enlistan los vértices del polígono obtenidos mediante el levantamiento del terreno disponible para la planta de tratamiento de agua residual.

Tabla 19. Vértices de la poligonal de la planta de tratamiento de agua residual “Escuela”.

VÉRTICE	Latitud	Longitud
1	N 20°24'47.32"	W 99°13'4.5"
2	N 20°24'47.4"	W 99°13'4.8"
3	N 20°24'47.4"	W99°13'5.1"
4	N 20°24'48.2"	W 99°13'4.3"
5	N 20° 24'48.2"	W 99°13'4.6"

Finalmente el terreno presenta para la dirección noreste una pendiente suave del 4%, mientras que para el sentido de sur a norte se presenta una pendiente del 9%.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

La caracterización del suelo se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Para determinar algunas propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, primero cualitativamente y después cuantitativa como: características de esfuerzo -deformación y resistencia, compresibilidad, permeabilidad, velocidad de variación volumétrica, etcétera-granulometría, densidad de los sólidos, nivel de expansión para el diseño de la planta de tratamiento de agua residual, se desarrollaron diversas pruebas como el análisis granulométrico, la prueba de permeabilidad a carga constante, la determinación de la densidad relativa de los sólidos mediante el método por vía húmeda para arenas y finos y el método de picnómetro para gravas.

A continuación se describirán de manera breve dichos métodos.

3.5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



El método mecánico consiste en la determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño y en función de lo anterior clasificar el suelo de acuerdo a su graduación.

Ilustración 18. Muestra del suelo para el análisis granulométrico.

Mediante los cálculos de porcentajes de suelo retenido parcial, suelo retenido acumulado y suelo que pasa, se dibuja la curva granulométrica. Finalmente se calculan los % de grava, de arena y de finos, así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c). La curva y los coeficientes mencionados, permiten determinar la caracterización del suelo así como el cálculo del coeficiente de permeabilidad de una forma aproximada.

3.5.2 PRUEBA DE PERMEABILIDAD A CARGA CONSTANTE

La permeabilidad es la facilidad con que pasa el agua a través del suelo, lo cual depende de los huecos o vacíos que tenga el material y si estos están intercomunicados. Así, un suelo grueso tendrá mayor permeabilidad que un suelo fino, debido a que posee más huecos.

El objetivo de la prueba, es determinar la velocidad del agua a través de un suelo, expresada en cm/s. Existen dos tipos de método: *a)* la prueba de permeabilidad a carga constante (para suelos gruesos: gravas y arenas) y *b)* la prueba de permeabilidad a carga variable (recomendable para suelos finos: arcillas y limos).

El agua fluye a través de la muestra de suelo de área transversal A y longitud L , confinada en un tubo, se somete a una carga hidráulica h , midiéndose el volumen en cm^3 que pasa en el tiempo t . Aplicando la ley de Darcy:



Ilustración 19. Prueba de permeabilidad a carga constante.

$$k_t = \frac{V L}{H \Delta t} = \frac{Q L}{A H}$$

Donde

k_t = Coeficiente de permeabilidad, cm/s.

A = Área de la muestra, cm².

H = carga hidráulica, cm³/cm².

t = tiempo de prueba, s.

$$k_{20^\circ C} = k_t \frac{\mu_t}{\mu_{20^\circ C}}$$

$k_{20^\circ C}$ = coeficiente de permeabilidad corregido por temperatura, cm/s.

μ_t = Viscosidad cinemática del agua, m²/s.

3.5.3 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA DE LOS SÓLIDOS O GRAVEDAD ESPECÍFICA DE UN SUELO

La densidad de sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos. Generalmente la variación de la densidad de sólidos es de 2.60 a 2.80, aunque existen excepciones como en el caso de la turba⁴ en la que se han registrado valores de 1.5 y aún menores, debido a la presencia de materia orgánica. En cambio en suelos con cierta cantidad de minerales de hierro la densidad de sólidos ha llegado a 3.

El peso específico relativo de los sólidos o densidad de sólidos, es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos, debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la Mecánica de suelos, en forma relativa, con los diversos valores determinados en el laboratorio pueden clasificarse algunos materiales.

Existen 2 procedimientos para esta prueba (Figuras 20 y 21), uno para la determinación de la densidad de arena y finos y otro para la para la densidad en gravas (método de picnómetro)

⁴ Combustible fósil formado de residuos vegetales acumulados en sitios pantanosos.

que tiene su fundamento en el principio de Arquímedes. De igual forma, esta prueba permite la determinación de la absorción en gravas de río.



Ilustración 20. Método para la determinación de la densidad de arena y finos.



Ilustración 21. Método para la obtención de la densidad de gravas.

Las pruebas anteriores permiten conocer, cualitativamente, el comportamiento de los suelos y la oportuna toma de decisiones en nuestro proyecto ingenieril por ejemplo, la elección del ángulo de excavación para el biodigestor, conocer el grado de estabilización de la pared de excavación o determinar la factibilidad del uso del suelo como soporte del humedal por mencionar algunos.

En cuanto a éste último, es importante mencionar que la variación de la conductividad hidráulica es inversamente proporcional a la variación del espesor de la biopelícula y que el crecimiento paulatino de éste consorcio de microorganismos, provoca una reducción del área de flujo y un incremento en la carga hidráulica superficial, lo cual hace que la velocidad de flujo del agua se incremente; sin embargo, con el transcurso del tiempo, se puede llegar al punto en que la reducción del área sea tal que se llegue a la colmatación, impidiendo el flujo del agua, dando lugar a la inundación y el derramamiento del sistema. De igual forma dichas variables hidráulicas dependen de la porosidad (Amábilis Sosa, 2010).

3.3 PRETRATAMIENTO

El diseño del proyecto integra al biodigestor comercial como pretratamiento primario de agua residual, mediante un proceso de retención y degradación séptica anaerobia de la materia orgánica, para después ser infiltrada al humedal artificial. Su diseño genera un proceso de retención de sólidos y otro biológico que le da un tratamiento adicional.

La Tabla 20 muestra los resultados de muestreos realizados en Argentina empleando al biodigestor.

Tabla 20. Eficiencia en biodigestor Rotoplas®, (Rotoplas, Manual biodigestor).

Parámetro	Remoción	Valores obtenidos
DBO ₅	94 %	15-80 mg/L
DQO	88%	80-190 mg/L
Grasas y aceites	93%	30-45 mg/L
Sólidos sedimentables	98%	0.05-0.3 ml/L
pH	Estabilizado	7.5-8.5 unidades pH

Tabla 21. Número de usuarios, (Rotoplas, Ficha técnica biodigestor autolimpiable, 2014).

Capacidad, L	Número de usuarios según su consumo diario de agua*		
	150 L/usuario	90 L/usuario	40 L/usuario
7,000	47	78	175

**El consumo diario de agua de una persona en zona urbana es de 150 L, en zona periurbana y/o rural es de 90 L y en zona rural y/o asentamientos humanos es de 40 L.

Tabla 22. Dimensiones biodigestor (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013).

Modelo de biodigestor	RP-7000
Capacidad, L	7,000
Altura máxima con tapa, m	2.65
Diámetro máximo, m	2.4

Tabla 23. 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

Tabla 24. Volumen mínimo del registro de lodos (Rotoplas, Ficha técnica biodigestor autolimpiable, 2014).

Modelo del biodigestor	RP-7000
Volumen de lodos a evacuar, L	1,500
Volumen mínimo del registro de lodos, L	1,800

3.3.1 LOCALIZACIÓN

Se recomienda que en la instalación de la fosa séptica se eviten los terrenos pantanosos, de relleno o sujetos a inundación, asimismo, que se localice al menos a 3 metros de distancia de cualquier paso de vehículos. Su ubicación debe considerar las necesidades de espacio para localizar la instalación de disposición del efluente. Las distancias mínimas requeridas para la ubicación de las fosas sépticas se presentan en la [Tabla 25](#) (SEMARNAT, 1999).

Tabla 25. Distancias mínimas recomendadas para la ubicación de una fosa séptica (SEMARNAT, 1999).

Localización	Distancia, m
Distancia a embalses o cuerpos de agua utilizados como fuentes de abastecimiento	60
Distancia a pozos de agua	30
Distancia a corrientes de agua	15
Distancia a la edificación o predios colindantes	5

El manual del biodigestor incluye indicaciones para la excavación y colocación del biodigestor, el relleno, la instalación hidráulica, el funcionamiento, limpieza y mantenimiento.

3.4 HUMEDAL ARTIFICIAL

Para que un diseño sea válido debe tomar en cuenta las consideraciones hidráulicas y térmicas, sin pasar por alto la cinética de la remoción o diseño hidráulico. Dado que los humedales pueden ser considerados como “reactores biológicos” con régimen de flujo pistón, es posible calcular su rendimiento utilizando una ecuación cinética de primer orden, para la remoción de DBO₅ y N₂. Los modelos presentados en esta sección son los sugeridos por Sherwood C. (1993).

Citando la ecuación básica para los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_t t} \quad (1)$$

Donde: C_e = concentración del contaminante en el efluente, mg/L
C_o = concentración del contaminante en el influente, mg/L.
k_t = constante de temperatura del sistema, 1/d.
t = tiempo de retención hidráulica, d.

El tiempo de retención hidráulica (t) es el tiempo que permanece el agua a tratar dentro del sistema depurador y se establece en función del tiempo considerado como necesario para remover los contaminantes y la materia orgánica presente en el agua residual.

Si la alimentación es de tipo continuo, la ecuación que define al tiempo de retención hidráulica es:

$$t = \frac{L * w * \eta * y}{Q} \quad (2)$$

Donde: L = largo de la celda del humedal, m.
w = ancho de la celda del humedal, m.
y = profundidad de la celda del humedal, m.
η = porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal, %
Q = caudal medio a través del humedal, m³/d.

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

Donde: Q_e = caudal de salida, m³/d.

Q_o = caudal de entrada, m³/d.

Para un diseño preliminar, se considera que los caudales de entrada y salida son iguales, partiendo de este supuesto es posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$As = Lw = \frac{Q * \ln(Co/Ce)}{k_T * y * \eta} \quad (4)$$

Donde: As= área superficial del humedal, m².

Con respecto a la constante k_T , si el agua residual posee temperaturas diferentes a 20°C, se emplea la siguiente ecuación:

$$k_T = k_{T20} * 1.1^{(T-20)} \quad (5)$$

Donde: k_{T20} = constante a la temperatura estándar de 20 °C, l/d.
T= temperatura, °C.

En los humedales de flujo subsuperficial el área del lecho se calcula de acuerdo a la ley de Darcy. Esta ecuación es aplicable cuando la celda se encuentra rellena de arenas, gravas y suelos, siempre y cuando se mantengan las condiciones de flujo laminar. Sin embargo el flujo turbulento puede presentarse cuando las gravas son gruesas, el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, no obstante varía con la precipitación, evapotranspiración y filtración, así como una mala construcción o desigual porosidad, si se minimizan estos inconvenientes al máximo posible, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal de flujo subsuperficial.

$$v = k_s s \quad (6)$$

$$v = \frac{Q}{wy} \quad (7)$$

Ley de Darcy:

$$Q = k_s SA_c \quad (8)$$

donde: k_s = conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo, m/d.

A_c = área de la sección transversal, perpendicular al flujo, m².

s = gradiente hidráulico o pendiente de la superficie del agua en el sistema, m/m.

La velocidad de flujo definida por el producto $ks*s$ se debe delimitar a 6.8 m/d para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas. Así mismo, la anchura necesaria es función de la superficie transversal y de la profundidad de diseño, y se calcula (Metcalf & Eddy, 1995):

$$w = \frac{A_c}{y}$$

Para realizar el diseño el primer paso es asumir la profundidad del agua y la temperatura y con ello resolver las ecuaciones cinéticas y así predecir el área requerida para remover los contaminantes. Comparado con el criterio de eliminación de sólidos en suspensión, los modelos desarrollados para la eliminación de la DBO_5 , resultan convenientes, ya que éstos arrojan áreas de tratamiento mayor. Además la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente del humedal ha demostrado una relación estrecha con la concentración de DBO_5 en el efluente (EPA, Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial, 1993).

CAPÍTULO 4.

DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

4.1 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA LOCALIDAD

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual se muestran en la siguiente Tabla, en la cual se presenta un mínimo, un máximo y la media para cada parámetro de las muestras puntuales.

Tabla 26. Caracterización del agua residual en el sitio del proyecto.

Parámetros	Unidades	Valor máximo	Media	Valor mínimo
Temperatura	°C	24.7	21.9	17.6
pH	-	8	7.3	7.0
Turbiedad	UTN	479.5	150.7	7.1
Conductividad	μS/cm	2,220	1,588	788.0
Salinidad	%	1	0.80	0.10
OD	mg/L	5.8	3.9	0.40
Ortofosfatos	mg/L	2.7	7.1	12.10
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	450.4	417.6	370.3
COT	mg/L	7.9	153.9	0.2
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	100	32.5	0.20
DBO ₅	mg/L	620.3	95.2	3.4
DQO	mg/L	1,105	247.7	30.0
SST	mg/L	250	90.1	8.0
G y A	mg/L	39	25.2	<5
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	1,900,000	358,000	3,500
Huevos de Helminthos	HH/L	1.8	0.7	0.2

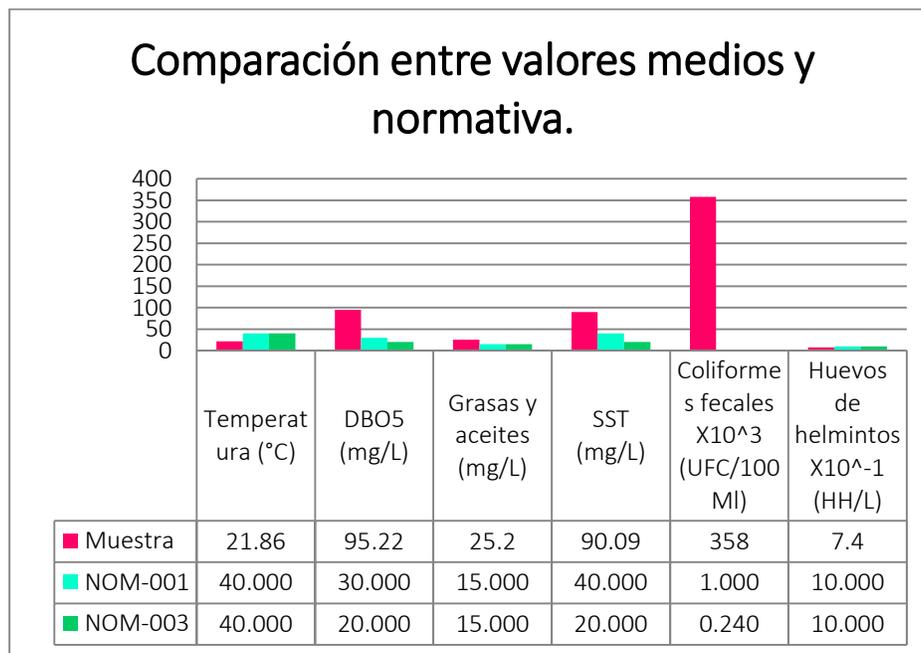
Como puede apreciarse, se presenta variabilidad en la mayoría de los parámetros de la calidad del agua, tal es el caso del parámetro de DQO donde se obtuvo un valor máximo de 1,105 mg/L y un valor mínimo de 30 mg/L, dicha variabilidad en la calidad del agua se obtuvo en la mayoría de los parámetros medidos y puede apreciarse en las imágenes 22 y 23, que presentan muestras puntuales del mismo día a diferente hora.



Ilustración 22. Muestra puntual, 6:52 am.



Ilustración 23. Muestra puntual, 3 horas con 32 minutos después.



Gráfica 1. Comparativa entre valores medios de muestra puntual y normativa con valores mensuales.

En la gráfica 1 se observa que 4 valores promedio obtenidos en la caracterización del agua están por encima de los límites máximos permisibles establecidos en las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 columna embalses naturales y artificiales apartado uso público urbano y NOM-003-SEMARNAT-1997 servicios al público con contacto directo debido a que ésta cumple para el uso con riego agrícola como para embalses naturales y artificiales como para uso en riego agrícola suelos por lo que es necesario establecer un sistema de tratamiento de agua residual para cumplir con ambas normas.

En la Tabla 27, se presenta los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos medidos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental para las muestras compuestas para el punto de muestreo.

Tabla 27. Resultados obtenidos en la caracterización de la muestras compuestas, punto de muestreo "escuela".

Parámetros	Unidades	MC1	MC2	MC3
Ortofosfatos	mg/L	9.5	SD	3.3
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	390.3	SD	410.4
COT	mg/L	266.0	SD	62.0
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	>100	SD	5.0
DBO ₅	mg/L	475.0	SD	13.0
DQO	mg/L	463.9	SD	48.0
SST	mg/L	100.0	SD	42.0
Alcalinidad	mg/L	538.0	SD	458.0

SD= sin dato MC=muestra compuesta

Como se aprecia, no se obtuvo muestra compuesta del día 23 de abril del 2015, ya que únicamente se aforaron 3 muestras puntuales, la falta de gasto fue ocasionada por una reunión que se llevó acabo en la escuela cercana al punto de muestreo por parte de los pobladores de El Alberto(Figuras 23 y 24).



Ilustración 25. Muestreo puntual sin gasto, 15:32 horas.



Ilustración 24. Muestreo puntual sin gasto, 17:37 horas.

Para el caso de los metales se obtuvieron los valores medios que se muestran en la Tabla 28, así mismo, se comparan dichos parámetros con lo establecido en la normatividad.

Tabla 28. Resultados de metales en la caracterización del agua residual comparados con los límites máximos permisibles establecidos por las normas oficiales mexicanas.

Parámetros (mg/L)	MC-E	NOM-001	NOM-003
Arsénico	0.0044	0.10	0.20
Boro	< 0.05	---	---
Cadmio	< 0.005	0.10	0.20
Cianuros	< 0.001	1.00	2.00
Cobre	0.0090	4.00	4.00
Cromo	< 0.008	0.5	1.00
Mercurio	0.00045	0.005	0.01
Níquel	< 0.02	2.00	2.00
Plomo	< 0.02	0.20	0.50
Zinc	0.1175	10.00	10.00

Muestra compuesta "Escuela" (MC-E)

Los valores de metales obtenidos en las muestras compuestas están por debajo del límite máximo permisible establecido en ambas normas, dichos valores corresponden para el caso de la NOM001SEMARNAT-1993 columna embalses naturales y artificiales apartado uso público urbano promedio mensual, si en un futuro se desea emplear para riego agrícola verificar dicho apartado.

Debido a la notable variabilidad en los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual, se realizó un análisis estadístico de acuerdo a Metcalf & Eddy, 1996 de los parámetros, con el fin de determinar el diseño óptimo del humedal.

A continuación, se muestra en la Tabla 29 un resumen para cada punto de muestreo de los resultados obtenidos con el análisis estadístico de los parámetros analizados.

Tabla 29. Parámetros estadísticos para el punto de muestreo "Escuela".

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS					
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE SIMETRÍA	COEFICIENTE DE CURTOSIS	VALOR AL 87.5 %
Temperatura	21.9	2.4	-0.4	1.6	25.1
pH	7.3	0.4	0.9	1.9	7.8
Turbiedad	150.7	173.6	0.9	2.0	361.3
Conductividad	1588	408.4	-0.3	2.4	2129.8
Salinidad	0.8	0.3	-1.9	5.8	0.9
OD	3.9	1.6	-0.9	2.8	5.9
Ortofosfatos	7.1	3.3	0.2	1.4	11.5
Dureza total	417.6	31.4	-0.3	1.6	458.6
COT	153.9	143.3	1.9	5.6	202.1
Nitrógeno Amoniacal	32.5	34.7	1.2	2.9	85.7
DBO ₅	95.2	188.2	2.2	6.1	272.7
DQO	247.7	324.7	1.8	4.9	590.7
SST	90.1	91.9	0.9	2.1	202.1

Mediante los valores de los parámetros del promedio de la muestra compuesta y del análisis estadístico se concluye que el agua del sitio en estudio es un agua residual doméstica con una concentración alta (Metcalf & Eddy, 1995).

4.2 POBLACIÓN DE PROYECTO

Con la ayuda de la [Tabla 17](#) "Evolución de la población de El Alberto de 1900- 2010 (INEGI)" y considerando el periodo de diseño de 10 años para una planta de tratamiento de agua residual (CONAGUA, Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario, 2007) la población de proyecto compete al año 2026. El método utilizado para la obtención de la población de proyecto es el método geométrico o método del interés compuesto.

$$Pf = P(1 + i)^n \quad (9)$$

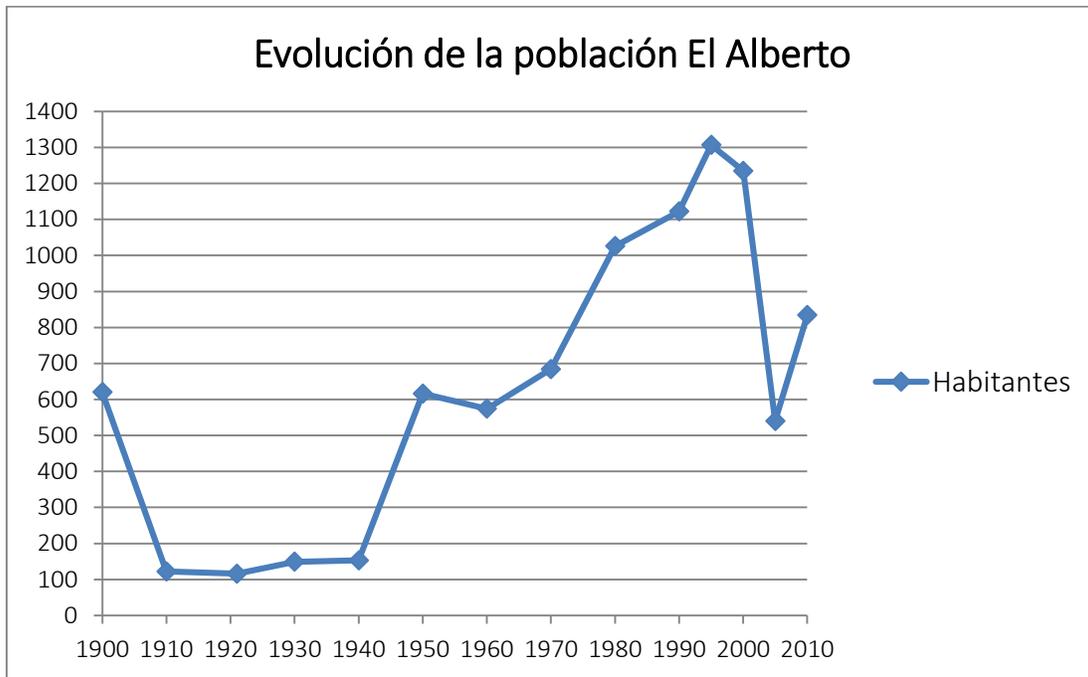
Donde: Pf= población para el año más actual

P= población del año precedente

n= Diferencia de años, Pf-P

i= tasa de población

Para obtener un promedio de tasas, se despeja i de la ecuación (9). Además se analizarán a las poblaciones de 1990 a 2010 con intervalos de 5 años.



Gráfica 2. Evolución de la población El Alberto 1900- 2010 (INEGI).

Tabla 30. Tasas de población "El Alberto".

Periodo		i
2005	2010	9.08
2000	2005	-15.25
1995	2000	-1.13
1990	1995	3.10

El promedio de las tasas es de -1.05%. Por lo tanto, usando la ecuación (9) la población de diseño es de 705 habitantes.

4.3 GASTOS DE DISEÑO

La dotación considera la temperatura media anual y la clase socioeconómica del lugar, se tiene que para un clima templado (12-17.9 °C) y considerando que la mayoría de los habitantes corresponden a una población popular, la dotación en El Alberto es de 100 L/hab/día.

Para el cálculo de la aportación se consideró un coeficiente de retorno de 0.75 debido a que otro valor corresponde a una zona industrial.

$$A = 100 * 0.75 = 75 \text{ L/hab/día} \quad (10)$$

La fórmula para el cálculo del gasto medio es la siguiente:

$$Qm = \frac{AP}{86,400} \quad (11)$$

Sustituyendo obtenemos:

$$Qm = \frac{75 * 705}{86,400} = 0.61 \text{ L/s}$$

El gasto mínimo corresponde a:

$$Qmín = \frac{Qm}{2} = 0.31 \text{ L/s} \quad (12)$$

El cálculo del gasto máximo instantáneo emplea un coeficiente de variación máxima instantánea que está en función del número de habitantes, debido a que nuestra población de diseño cuenta con menos de 1,000 habitantes, el coeficiente M corresponde a 3.8.

$$QMI = M * Qm \quad (13)$$

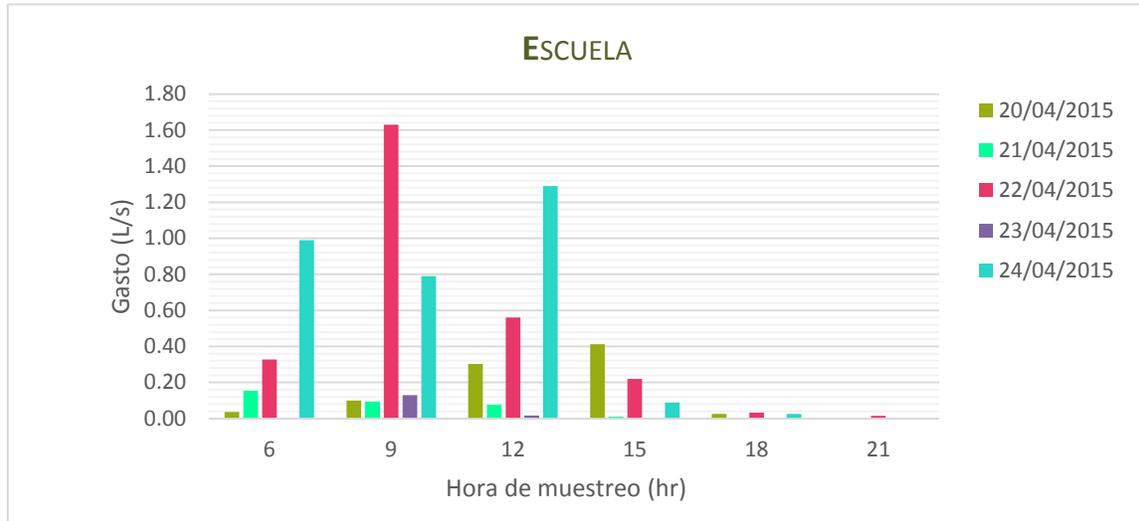
QMI resulta 1.16 L/s.

Finalmente, el gasto máximo extraordinario resulta del producto del gasto máximo instantáneo por un coeficiente de seguridad, dicho factor depende de la existencia de una red combinada (agua residual más agua pluvial), pérdidas en la línea de conducción, etcétera. Como en la localidad no se cuenta con planos de la red de alcantarillado se asume que la red es combinada y se usa un factor de seguridad de 1.3. Obteniendo un QME= 1.51 L/s.

Ahora bien, debido a que el sistema no es para toda la población sólo se considerará el tratamiento de la mitad del caudal correspondiente a 0.756 L/s.

Por otro lado, se muestran los resultados obtenidos de los gastos medidos durante el muestreo, en la gráfica 3 se presentan los gastos del aforo en el sitio del proyecto.

GRÁFICA 3. Gastos medidos en el punto "Escuela".



Finalmente, en la Tabla 31 se muestran los valores del gasto máximo, mínimo y medio.

Tabla 31. Valores máximo, mínimo y medio del gasto.

GASTOS	VALOR (L/s)
MÁXIMO	1.6300
MÍNIMO	0.0095
MEDIA	0.2618

4.4 SUELO

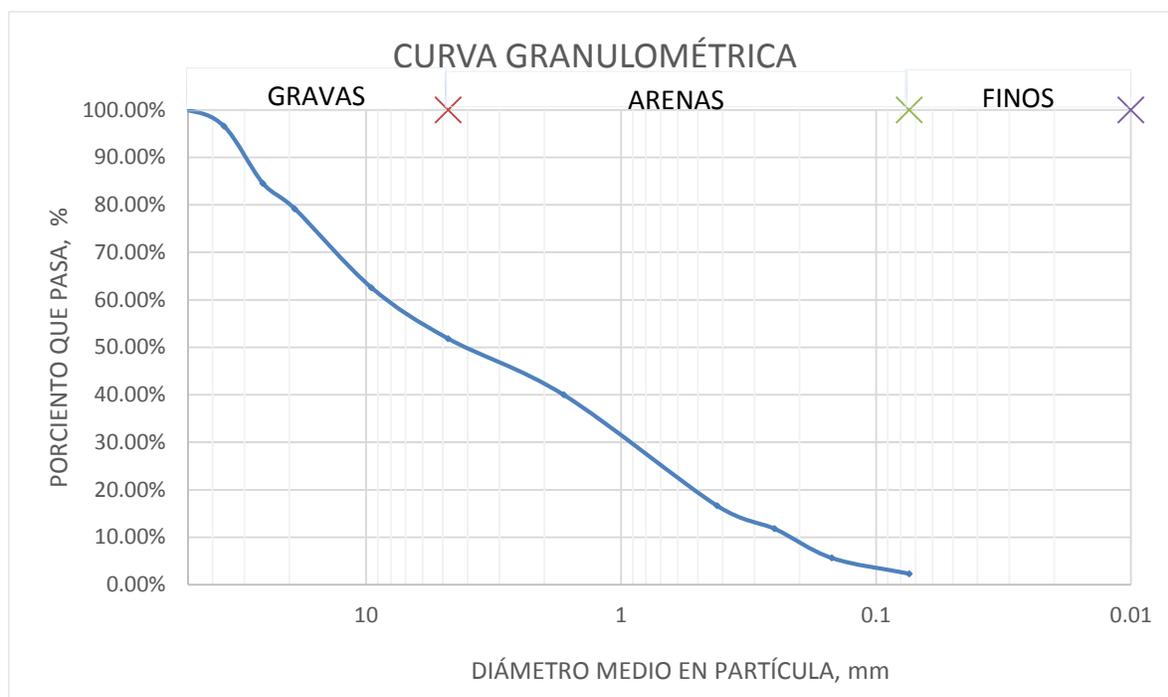
4.4.1 GRANULOMETRÍA

Una de las más importantes funciones de un sistema de clasificación de suelos es la de proporcionar la máxima información normativa, a partir de la cual el técnico sepa en qué dirección profundizar su investigación (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos está basado en el de Aeropuertos (fundado por el doctor A. Casagrande en la Universidad de Harvard). El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200, las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

El terreno con pendiente suave, resultó ser un suelo grueso, una arena con gravas (SP), cuenta con gravas sub redondeadas a sub angulosas de color grisáceo. Es un material prácticamente limpio de finos, mal graduado; es decir, son de apariencia uniforme o presentan predominio de un tamaño o de un margen de tamaños. No plástica

Enseguida se presenta la curva granulométrica, la forma de la curva da inmediata idea de la distribución granulométrica del suelo.



Gráfica 3. Curva granulométrica del terreno para la PTAR "Escuela".

La composición de las partículas del suelo se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Porciento de partículas en el suelo.

% GRAVAS	%ARENAS	%FINOS
48.19	49.51	2.29

El coeficiente de uniformidad resultó de 36.1, lo que significa que el suelo es uniforme. Mientras que el coeficiente de curvatura de 0.5 indica que tenemos un suelo mal graduado.

Como puede observarse en la Tabla 32, en el suelo SP predominan 2 tamaños de partículas gruesas. El material es limpio, no hay suficiente arcilla para aglomerar las partículas de arena por lo tanto, la plasticidad es nula.

Para complementar algunas propiedades importantes, se anexan las siguientes tablas.

Tabla 33. Propiedades más importantes del suelo SP.

Denominaciones típicas de los grupos de suelos	Símbolo del grupo	Propiedades importantes			
		Permeabilidad en estado compacto	Resistencia al corte en estado compacto y saturado	Compresibilidad en estado compacto y saturado	Facilidad de tratamiento o en obra
Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos	SP	Permeable	Buena	Muy baja	Regular

Tabla 34. Suelo SP como material de terraplén (Crespo Villalaz, 2004).

Permeabilidad	Semipermeable a permeable
Resistencia a tubificación	Baja a muy baja
Resistencia al corte	Alta
Compresibilidad	Baja siempre y cuando hayan sido colocados y compactados adecuadamente. Su compactación es fundamental.
Susceptibilidad al agrietamiento	Ninguna
Susceptibilidad a la licuación	Cuando están bien compactadas, no son susceptibles
Manejabilidad	De buena a correcta

Tabla 35. Suelos SP como material de cimentación (Crespo Villalaz, 2004).

Permeabilidad	Permeable
Compresibilidad y expansibilidad	Los asentamientos son pequeños cuando el material es bien compactado, y la magnitud de los esfuerzos reducida. Si los depósitos son heterogéneos pueden dar lugar a irregularidades importantes en la compresibilidad.
Resistencia al corte	Muy variable dependiendo de la compacidad del depósito y su homogeneidad.
Tubificación	Mala resistencia
Susceptibilidad del suelo a heladas	Ninguna a muy baja

El comportamiento mecánico de SP es de aceptable a bueno, capacidad de drenaje excelente (Bañón Blázquez). Compacidad baja (Muelas Rodríguez).

En cuanto a la variación de la consistencia en función de la humedad (plasticidad) es propia de suelos finos (arcillas y limos) ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta (Muelas Rodríguez).

4.4.2 PERMEABILIDAD

El coeficiente de permeabilidad de un suelo se define como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico dado. Indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, esta facilidad a su vez depende de toda una serie de propiedades físicas del suelo (relación de vacíos, estructura, estratificación del suelo) y, también de algunos factores, tales como temperatura (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Hay diversos procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelo: unos directos, así llamados porque se basan pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente y otros indirectos, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Se realizó el cálculo de la permeabilidad del suelo mediante el permeámetro de carga constante (método directo) y mediante el cálculo a partir de la curva granulométrica (método indirecto).

La arena, la grava y la turba no tienen plasticidad, su $LP=0$. Son fáciles de compactar resultan poco afectadas por la humedad y no están sujetas a la acción de la helada. Las arenas y gravas bien graduadas son generalmente menos permeables y más resistentes a la erosión y a la

tubificación que las arenas. Las arenas y gravas bien graduadas son generalmente menos permeables y más estables que aquellas deficientemente graduadas (granulometría uniforme).

4.4.2.1 PERMEABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO

Prácticamente todos los métodos del tipo indirecto siguen la fórmula clásica de Allen Hazen, 1892.

$$k = CD_{10}^2 \quad (14)$$

Donde: k = coeficiente de permeabilidad, cm/s.

D_{10} = diámetro efectivo de Hazen

$C=116$

Obteniendo $k = 116 * (0.023)^2 = 0.061 \text{ cm/s}$

4.4.2.2 PERMEABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DIRECTO

Ahora bien, la fórmula anterior es de valor muy limitado, válida como norma de criterio, pero nunca sustitutiva de métodos más precisos, del tipo que se da a continuación.

El permeámetro de carga constante es el método más simple para determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo.

Tabla 36. Valores para el cálculo para el coeficiente de permeabilidad.

Dimensiones del espécimen de suelo	
Diámetro (D)	7.75 cm
Longitud (L)	20 cm
Área transversal (A)	47.17 cm ²
Carga hidráulica	36 cm

Se realizaron 4 pruebas obteniendo un volumen promedio de 12.89 cm³ con un tiempo de 30 segundos, obteniendo una constante de permeabilidad de 0.0051 cm/s. Para la corrección por temperatura necesitamos la viscosidad del agua a 20°C y 20.4°C. Interpolando se obtiene un valor de 0.9942 x 10⁶ m²/s para 20.4 °C.

$$k_{20^{\circ}C} = 0.0051 * \frac{0.9942}{1.003} = 0.00506 \frac{cm}{s}$$

El coeficiente de permeabilidad indicado para Arena mal graduada es mayor a 60×10^{-5} cm/s y menor que 700×10^{-5} cm/s (Sotelo Ávila, 2002). Por lo tanto, el valor anterior queda verificado.

4.4.2.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA DE LOS SÓLIDOS O GRAVEDAD ESPECÍFICA DE UN SUELO

El método de picnómetro para gravas arrojó los siguientes resultados:

Tabla 37. Porcentaje de absorción y densidad relativa de los sólidos en el suelo de la PTAR.

% de absorción	3.32
Densidad relativa de los sólidos, g/cm ³	2.49

En cuanto a las arenas y finos se encontró una densidad relativa de 2.65 g/cm^3 . El resultado de laboratorio arrojó que la densidad del agregado fino es mayor que el agregado grueso, debido a que éste tiene una mayor compactación y menos espacios de vacíos, lo cual hace que aumente su densidad. Si la densidad real es muy inferior a 2.65 g/cm^3 , podemos pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica, si es significativamente superior a 2.65 g/cm^3 podemos inferir que posee un elevado contenido de óxidos de Fe o minerales ferromagnéticos (Thompson L, 2002).

Por otro lado, la saturación en agua afecta de forma sustancial a otras propiedades físicas y mecánicas de los materiales, tales como densidad global, conductividad térmica y resistencia mecánica, por lo que su medida es importante (UGR, 2007). El coeficiente de absorción de agua es de suma importancia cuando los materiales van a estar colocados a la intemperie, en contacto con agua o con la humedad del suelo (UniOvi). El valor obtenido de 3.32 indica media a baja penetración de agua en los poros de las partículas.

4.5 BIODIGESTOR

Considerando principalmente los costos de construcción, se determinó la capacidad del biodigestor con base al número de usuarios (personal equivalente). El producto del gasto por la concentración de DBO₅ es la carga orgánica.

$$\text{Personal equivalente} = \frac{Q * DBO_5}{C}$$

Donde: Q= gasto, L/d

DBO₅= concentración de DBO₅, g/L

C= aportación de DBO₅ por persona al día, 60g/hab/d

Tabla 38. Personal equivalente y carga másica.

Concentración media de DBO ₅ (g/L)	0.095
Gasto (L/d)	65300
Carga másica (g/d)	6218
Personal equivalente	104

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

Expansión	Alto-Medio	Bajo
Tipo de suelo	Suelo plástico blando o rocoso inestable	Suelo estable o tepetate
Ángulo de excavación		
	Entre 45 y 60 grados	Entre 60 y 75 grados

Ilustración 26. Ángulo de excavación en función al tipo de suelo (Rotoplas, Manual de instalación y saneamiento, 2013).

Los resultados arrojados en el laboratorio indican que el índice plástico es 0, por lo tanto, el suelo posee un grado de expansión bajo (Crespo Villalaz, 2004). Por lo anterior, la excavación tendrá un ángulo de excavación entre 60 y 75 grados y el relleno será el mismo, evitando el

uso de rocas angulosas. El biodigestor deberá estar siempre con agua hasta el nivel del tubo de salida

Asimismo, antes del biodigestor existirá una criba de 1.5", la tubería de conducción contará por lo menos con 10 cm de diámetro y tendrá una pendiente mínima del 2%. En cuanto a la Instalación hidráulica, se sugiere sellar con pegamento para PVC los puntos de unión y las partes roscadas con cinta teflón.

4.6 HUMEDAL

A continuación se presenta el diseño del humedal horizontal para el tratamiento de agua residual del sitio "Escuela" que obedece a las ecuaciones presentadas en la metodología, al promedio de los valores del influente obtenidos en la muestra compuesta, al gasto para una población de diseño de 10 años, así como con la normatividad requerida. La evaporación total anual es de 1,445.6 mm/año (CONAGUA, 2010) al día son 0.004 m/d.

Para obtener el volumen evaporado se multiplicó dicho valor por el ancho y largo de la celda resultando 7.3 m³. Para conocer el % del volumen evaporado se realizó una regla de 3 correspondiendo el 100% al volumen total de la celda.

Así, la evaporación en la celda es de 0.86%.

Las Tablas 39 y 40 presentan los parámetros para el diseño empleando como medio de soporte al suelo del lugar y tezontle y una evaporación del 1%.

Tabla 39. Parámetros de diseño para suelo del lugar.

Parámetro		Valor	
Co	Concentración influente	195.2	mg/L
Ce	Concentración efluente	20	mg/L
Q	Gasto	65.3	m ³ /d
T mín	Temperatura de diseño	18	°C
n	Porosidad del medio de soporte	0.38	
Ks	Conductividad hidráulica	166.67	m ³ /m ² /d
k ₂₀	Constante de T a 20 °C	1.104	
S	Pendiente del lecho	0.01	%
Y	Profundidad del lecho	0.5	M

Tabla 40. Parámetros de diseño usando tezontle como medio de soporte.

Parámetro	Valor	
Co	195.2	mg/L
Ce	20	mg/L
Q	65.3	m ³ /d
T mín	18	°C
n	0.59	
Ks	333.33	m ³ /m ² /d
k ₂₀	1.104	
S	0.01	%
Y	0.5	m

Los resultados obtenidos para el dimensionamiento del sistema se muestran a continuación:

Tabla 41. Dimensionamiento del humedal con suelo SP y tezontle.

Resultados	SUELO SP	TEZONTLE
As (m ²)	1,718.4	1,704.4
t (d)	5	7.7
W (m)	77.6	38.8
L (m)	22.2	43.9
V (m ³)	859.2	852.2
L:w	0.3	1.1

Con un tiempo de retención hidráulica igual a 2.3 días en ambos diseños se asegura un efluente final de 20 mg/L de DBO₅, sin embargo no se cumplen con los parámetros de la carga superficial.

Tabla 42. Comprobación de parámetros

Material de empaque	Suelo SP	Tezontle
Carga hidráulica m ³ /m ² *d	0.04	0.04
Superficie específica ha/m ³ *d	26.32	26.10
Carga de DBO ₅ kg/ha*d	74.18	74.78

Se decidió colocar 2 celdas en paralelo para garantizar el buen funcionamiento del sistema y brindar mantenimiento sin ocasionar el paro total de la planta. Debido a que la localidad cuenta con juncos de agua (*Juncus acutus*), estos se usarán como vegetación en el humedal.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Debido a que los humedales horizontales presentan mejor porcentaje de remoción comparados con los de flujo vertical, resultan eficaces para el tratamiento de agua en el sitio de estudio nombrado "Escuela". Sin olvidar que para una meta de 20 mg/L DBO₅ en el efluente del sistema se debe implementar mantenimiento en la planta de tratamiento de agua.
2. El análisis para el gasto de diseño arrojó un valor de 0.756 L/s, casi el triple del valor medio del caudal aforado 0.262 L/s.
3. Existe la necesidad de emplear un biodigestor como tratamiento previo para contrarrestar la carga orgánica y el gasto del agua residual, lo anterior debido a la variación de dichas variables encontradas en el muestreo.
4. El análisis estadístico resultó una herramienta de ayuda tanto para el dimensionamiento del humedal horizontal así como para la caracterización del agua residual.
5. El agua del sitio resultó con una concentración alta, 4 de 6 parámetros correspondientes a las normas oficiales mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997) están por encima de los límites máximos permisibles.
6. La concentración de metales pesados del agua residual se encuentra por debajo de la normatividad requerida.
7. El suelo del terreno asignado para la ubicación de la planta cuenta con gravas para el soporte y distribución del flujo en el humedal.
8. A pesar de ser uno de los sistemas más usados para el tratamiento del agua residual en comunidades rurales, en México los humedales artificiales sólo se emplean en menos del 1% del total del agua residual en México. Por lo que sería conveniente su implementación, seguimiento y mantenimiento
9. El área del humedal compuesto con SP es de 1,718.4 m² mientras que el de tezontle resultó de 1,704.4 m².
10. A pesar de que el dimensionamiento con tezontle como material de sustrato resulta con un humedal más pequeño, se concluye que el terreno otorgado por los pobladores es insuficiente para la ubicación de la planta de tratamiento de agua residual.

Se recomienda realizar un seguimiento tanto del biodigestor como del humedal ya que del primero se cuenta con escasa investigación sobre su eficiencia. En cuanto al segundo, será necesario realizar determinaciones durante un tiempo prolongado y analizar como disminuye con el tiempo los valores de la conductividad hidráulica. De igual forma, realizar ensayos para determinar el coeficiente de retorno para determinar el gasto de diseño en zonas rurales, ya que para este estudio se empleó el asignado para zonas urbanas.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

- Amábilis Sosa, L. E. (2010). *Análisis del patrón de flujo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial*. Ciudad de México: UNAM.
- Ambientales, E. (2014). *Programa de conservación de suelos, Proyecto "Eólica del Sur"*.
- ASRVM. (2010). *Estudio Regional Forestal*. CONAFOR.
- Bañón Blázquez, L. (s.f.). *Suelos*.
- Bunge, V. (2010). El estado de sanamiento en las cuencas de México. En *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*.
- Camacho, C. (6 de Diciembre de 2006). Subsisten familias del Mezquital con artesanías de ixtle y remesas. *La Jornada*.
- Cano, V. (2013). *Constructed wetlands: design, dimensioning, operation and performance*. São Paulo: University of São Paulo.
- Carmona Paredes, R. B., & Muñoz Arcila, F. (2014). *Contaminación emergente en el Valle del Mezquital*. Puerto Vallarta, Jalisco: CONAGUA.
- Cázares Martínez, R. (2013). *Diseño de un tanque presurizado para trabajar como biodigestor*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería.
- CEC. (s.f.). Calidad del agua. *El mosaico de América del Norte: panorama de los problemas ambientales más relevantes*.
- CONAGUA. (2007). *Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario*.
- CONAGUA. (2011). *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*.

- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mécanica de suelos y cimentaciones*. Ciudad de México: Limusa.
- Cruz Sánchez, A. (12 de Marzo de 2011). Se riegan con aguas negras 60% de cultivos agrícolas en Hidalgo. *La Jornada*.
- Cuenca, A. (8 de junio de 2008). Aguas de drenaje, oro negro del Mezquital. *El Universal*.
- Cuenca, A. (10 de junio de 2008). Aguas negras contaminan salud y tierras. *El universal*.
- de la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora, V. (2013). *Tratamiento del agua residual en México*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de agua residual por medio de humedales artificiales*. Cochabamba – Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- EPA. (1993). *Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial*.
- EPA. (2015). *A Handbook of Constructed Wetlands*.
- Fuentes Vivanco, W. (2016). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare.
- García Serrano, J., & Angélica, C. H. (2008). *Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Catalunya.
- 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.
- Haro González, M. E., & Aponte Hernández, N. O. (2010). *Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular*. Ciudad de México: UNAM.
- Hernández Calzada, M. A., Salazar Hernández, B. C., & Mendoza Moheno, J. (2010). *Caracterización de los balnearios de la zona del Valle del Mezquital en el Estado de Hidalgo*. Pachuca.
- Hernández Gracia, T. J., & García Velázquez, M. d. (2011). *La Responsabilidad Social Empresarial en el Valle del Mezquital, del Estado de Hidalgo*. Pachuca de Soto, Hgo.
- 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.
- K Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 560.
- Lesser Carrillo, L. E., Lesser Illades, J. M., Arellano Islas, S., & González Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Martínez Espinosa, C., Peña López, A. K., Cabirol, N., & Rojas Oropeza, M. (2013). *El Alberto, caso de estudio de la transferencia del agua residual de la Ciudad de México: beneficios y problemáticas*. Ciudad de México: Jornadas del Agua, UNAM.
- Martínez, J. (25 de enero de 2016). Frecuentes en la entidad males de aparato digestivo. *Criterio*.
- Mautner, M. (2015). *Humedales: El tratamiento ecológico de agua*. Ciudad de México.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de agua residual: tratamiento, vertido y reutilización*. España: McGraw-Hill.
- Miranda Ríos, M. (2000). *Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México*. Ciudad de México: UNAM.
- Moreno Alcántara, B., Garret Ríos, M. G., & Fierro Alonso, U. J. (2006). *Otomíes del Valle del Mezquital*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Muelas Rodríguez, A. (s.f.). *Manual de Mecánica de Suelos y cimentaciones*.
- Ordaz Chaparro, V. (2010). *Caracterización física de sustratos*. Texcoco.
- Peters, E., & Campoy Favela José, F. K. (2009). *Ciénega de Santa Clara Comprehensive Monitoring Program*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología.
- Rathor, R. (2014). *Constructed wetland management*.
- Rotoplas. (2013). *Manual de instalación y saneamiento*.
- Rotoplas. (2014). *Ficha técnica biodigestor autolimpiable*. Perú.
- Rotoplas. (s.f.). *Manual biodigestor*. Buenos Aires, Argentina.

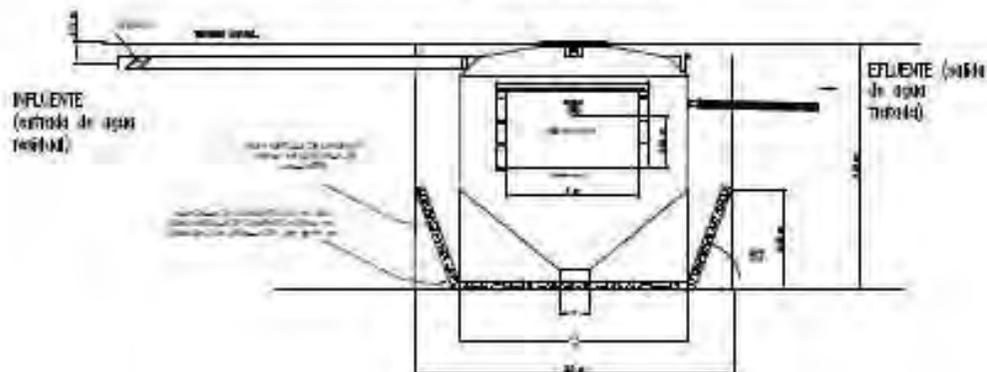
- SEDESOL. (2013). *Sistema de Apoyo para la Planeación del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias (PDZP)*.
- SEMARNAT. (29 de enero de 1999). NORMA Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-Especificaciones y métodos de prueba. *Diario Oficial*.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Tesillos Martínez, C., & Ubaldo Alvide, R. E. (2007). *Programa preliminar de diseño de humedales de flujo horizontal, para emplearse como sistema de tratamiento de agua residual doméstica*. . UNAM.
- THOMPSON L, T. F. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Reverté S.A.
- Torres Alonso, E. (2014). *El agua y su gestión en México (coord.), Gestión pública y social del agua en México*. Ciudad de México: UNAM.
- UGR. (2007). *Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*.
- UniOvi. (s.f.). *uniovi.es*. Obtenido de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion3.RocasOrnamentales.Ensayos.6.3.6.pdf>
- Villaseñor Huidobro, E. (2011). *Prototipo de una celda de humedal artificial para el tratamiento de agua residual generada en un edificio de oficinas*. Ciudad de México: UNAM.
- Vögeli, Y., Riu Lohri, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag).
- Young, M. (1986). *Digestores anaeróbicos criterios de selección, diseño y construcción*. Xalapa, Veracruz: Instituto de Investigaciones sobre recursos bióticos .
- Zurita Martínez, F., Osvaldo, C. H., & Araceli, R. S. (2011). El tratamiento del agua residual municipal en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 139-150.

ANEXOS

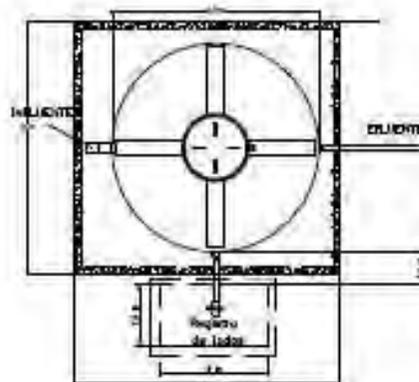
BIODIGESTOR

Esquema de instalación de Biodigestor en Fosa Tradicional
FOSA SEPTICA RP-7000

DETALLE EN CORTE



DETALLE EN PLANTA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



ESPECIFICACIONES

El biodigestor se instalará en la fosa septica tradicional, en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

CONDICIONES

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

REQUISITOS

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

NOTAS

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

REQUISITOS

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

CONDICIONES

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

NOTAS

- 1. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.
- 2. El biodigestor se instalará en la zona de la fosa septica RP-7000, con un diámetro de 1.20 m y una altura de 1.50 m.

GRUPO DE TRATAMIENTO
Y REGISTRO DEL INSTITUTO
DE INGENIERIA, UNAM



PROYECTO

BIODIGESTOR

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Fecha de elaboración:	Fecha de revisión:	Fecha de aprobación:

