



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

PROGRAMA PREELIMINAR DE DISEÑO DE
HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
HORIZONTAL, PARA EMPLEARSE COMO
SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMESTICAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

I N G E N I E R O Q U I M I C O

PRESENTAN

TESILLOS MARTÍNEZ CARMELA
UBALDO ALVIDE RICARDO EMMANUEL

ASESOR: I. Q. EVERARDO ANTONIO FERIA HERNANDEZ

AGOSTO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS DE CARMEN

A DIOS.

Por darme la bendición más grande... el amor de una familia.

A RICARDO, EL COMPAÑERO.

Gracias por todo tu apoyo, por tu paciencia, tu comprensión y gracias por tener siempre las palabras de aliento mas adecuadas para cada una de mis desilusiones, penas o fracasos. Gracias por siempre estar aquí conmigo en las buenas y en las malas, por cultivar en mi la fortaleza del espíritu y la virtud de la paciencia. Ah, y gracias también por esforzarte siempre en ser el mejor padre y esposo.

A MIS HERMANOS.

JAVIER, ARTURO, EDUARDO Y NORMA

Todos nosotros tenemos un mismo origen, compartimos la misma infancia, algunos sueños y las mismas tristezas, y aunque por el momento estamos separados quiero que sepan que siempre le pido a Dios que les de fuerza para luchar por sus ideales y que les ilumine el camino para lograr su felicidad!

A MI PEQUEÑO LALITO.

Gracias por tu amor, por tus sonrisas, por tus caritas felices, porque aún con tu pequeño ser me has enseñado la fortaleza de la vida y con tu inocencia la bendición del perdón. Gracias por recordarme que alguna vez fui niña y que alguna vez tuve un deseo...

Recuerda que toda realidad inicia ahí, que todo nace de un sueño, de un deseo o de una ilusión, y que todo es posible si tienes fe en ti, recuerda que siempre me tendrás a tu lado para ayudarte a cumplir ese deseo, ese sueño, o esa ilusión...

A LOS MAESTROS .

Agradezco el tiempo, la paciencia y dedicación que tuvieron para ser guías en la elaboración de este proyecto y así mismo ayudarme a cumplir con uno de mis sueños más anhelados. Gracias profesor Everardo, J. A. Zamora, Javier, Carlos y Ana Lilia.

A TODOS MIS AMIGAS (OS).

Agradezco a Dios el haberme mandado Ángeles, que al cruzar su camino con el mío compartimos, una alegría, una tristeza, una sonrisa o una lágrima. Para mi es muy valiosos contar con su amistad y todos ustedes saben lo importante que es para mi tener su cariño, su apoyo, y su sinceridad que aunque esta última en ocasiones es dolorosa es mejor que una mentira, por que recuerden que nada es casualidad y que si nos conocimos es porque debemos ayudarnos a cambiar algo en nuestra vida para mejorarla, solo espero que yo pueda ayudarlos en igual o mayor forma para hacer de la vida una aventura maravillosa. A todos ustedes: ¡Muchas gracias por existir y ser como son!

AGRADECIMIENTOS DE RICARDO

A DIOS

*Simplemente, te lo debo todo...
Gracias.*

A BLANQUITA

*Mil gracias por tantos favores recibidos
y por acompañarme desde hace tanto
tiempo, sin tu ayuda no habría sido posible.*

A MIS RAÍCES

**Eulalio Alvide Mondragón †
Luz Cervantes Sánchez †
Gilberto Alvide Cervantes †**

*Por fin se consumó nuestro sueño.
Muchas gracias por darme amor, educación
y buen ejemplo, y por tener fe en mí. Sé
que están conmigo ahora, y algún día nos
reuniremos de nuevo, para no separarnos
jamás. Hasta entonces...*

A CARMEN, LA FLAMA

*Más allá de la vida y de la muerte,
de las constelaciones más lejanas,
tú serás el amor que no se olvida,
el amor que no se apaga
Gracias, por haberme dado luz en mi
oscuridad, y darme un nuevo comienzo.*

A LALITO, MI HIJO

*Eres la bendición más grande con la que fui
colmado, y la responsabilidad más grande
de mi vida. Nunca te fallaré. Y aunque
pasen los años, siempre me tendrás para ti,
pues el amor de un padre no termina ni en
el sepulcro.*

A TODOS MIS AMIGOS

*Sería injusto nombrar a unos cuantos,
ya que he sido afortunado en tener muchos
buenos amigos. Este espacio es para todos ustedes,
por igual, ya que han sido un apoyo en mi vida.
Como dijo un amigo muy querido:
"Los buenos amigos son como las estrellas:
a veces no se ven,
pero siempre estarán ahí".*

ÍNDICE.

A1. PORTADA, AGRADECIMIENTOS.

A2. INDICE.

A3. INTRODUCCION, RESUMEN, OBJETIVOS, ALCANCE.

A4. ASPECTOS GENERALES.

A4.1. ANTECEDENTES.....	1
A4.2. PLANTAS EXISTENTES DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL PAÍS.....	2
A4.3. AGUAS RESIDUALES Y SU CLASIFICACIÓN.....	4
A4.4. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL DEL TIPO DOMÉSTICO.....	6
A4.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	6
A4.4.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	9
A4.4.3. MATERIAL ORGÁNICO.....	12
A4.4.4. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	14
A4.5. DAÑOS CAUSADOS POR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	16

A5. NORMATIVIDAD.

A5.1. NORMATIVIDAD (NORMAS OFICIALES MEXICANAS DEL SECTOR AGUA).....	17
A5.2. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996.....	18
A5.3. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996.....	20
A5.4. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1996.....	21

A6. PROCESOS DE TRATAMIENTOS ACTUALES.

A6.1. ANÁLISIS DE PROCESOS DE TRATAMIENTOS ACTUALES.....	23
--	----

A7. ASPECTOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS FOSAS SÉPTICAS.

A7.1. ASPECTOS TEÓRICOS	30
A7.2. CLASIFICACIÓN	31
A7.2.1. FOSAS SÉPTICAS DE UNA CÁMARA.....	31
A7.2.2. FOSAS SÉPTICAS DE DOS CÁMARAS.....	31
A7.2.3. FOSAS SÉPTICAS DE TRES CÁMARAS.....	31
A7.3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	32
A7.3.1. DIMENSIONES.....	32
A7.3.2. CAPACIDADES.....	33
A7.3.2.1. CAPACIDAD DE TRABAJO.....	33
A7.3.2.2. CAPACIDAD DE TOTAL.....	33
A7.3.3. REGISTRO DE INSPECCIÓN.....	33
A7.3.4. ELEMENTOS DE CONTROL.....	34
A7.3.4.1. ELEMENTO DE ENTRADA HOMBRE.....	34
A7.3.4.2. ELEMENTO DE SALIDA.....	34

A7.3.5.	ESTANQUIDAD, HERMETICIDAD Y RESISTENCIA.....	34
A7.4.	INSTALACIÓN DE FOSAS SÉPTICAS.....	34
A7.4.1.	LOCALIZACIÓN.....	34
A7.4.2.	DISPOSITIVOS PREVIOS A LA FOSA SÉPTICA.....	35
A7.4.3.	EXCAVACIÓN.....	35
A7.4.4.	TUBERÍAS.....	35
A7.4.5.	REGISTROS DE INSPECCIÓN.....	35
A7.5.	INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.....	36
A7.5.1.	INSPECCIÓN Y LIMPIEZA.....	36
A7.5.2.	MANTENIMIENTO.....	36
A7.6.	OXIDACIÓN DEL EFLUENTE SÉPTICO.....	37

A8. ASPECTOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

A8.1.	DEFINICIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	38
A8.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES.....	38
A8.2.1.	HUMEDALES NATURALES.....	38
A8.2.2.	SISTEMAS DE PLANTAS ACUÁTICAS.....	38
A8.2.2.1.	SISTEMAS DE PLANTAS FLOTANTES.....	39
A8.2.2.2.	SISTEMAS DE PLANTAS SUMERGIDAS.....	39
A8.2.3.	HUMEDALES ARTIFICIALES.....	39
A8.2.3.1.	HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE O SUPERFICIAL.....	39
A8.2.3.2.	HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBTERRÁNEO.....	40
A8.2.4.	PRINCIPALES MECANISMOS DEPURATIVOS EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	42
A8.3.	COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	43
A8.3.1.	AGUA.....	43
A8.3.2.	ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA.....	43
A8.3.3.	SUSTRATO.....	43
A8.3.4.	VEGETACIÓN.....	45
A8.3.5.	MICROORGANISMOS.....	50
A8.3.6.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	51
A8.4.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES...51	51
A8.4.1.	SITIO DE LOCALIZACIÓN.....	51
A8.4.2.	IMPERMEABILIZACIÓN.....	52
A8.4.3.	ZONA DE ENTRADA DEL INFLUENTE.....	52
A8.4.4.	ZONA DE CAPTACIÓN DEL EFLUENTE.....	53
A8.4.5.	OPERACIÓN, CONTROL Y MANTENIMIENTO.....	55
A8.4.5.1.	SEMBRADO.....	55
A8.4.5.2.	LIMPIEZA EXTERNA DEL SISTEMA.....	55
A8.4.5.3.	MANEJO DEL NIVEL DE AGUA.....	55
A8.4.5.4.	CONTROL DE MOSQUITOS.....	56
A8.4.5.5.	CONTROL DE OLORES.....	56
A8.4.6.	CONSIDERACIÓN AMBIENTALES Y DE SALUD.....	56
A8.4.7.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS.....	57

A9. ECUACIONES DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES.

A9.1.	MODELOS DE DISEÑO.....	58
A9.1.1.	DISEÑO HIDRÁULICO.....	60

A9.1.2.	ASPECTOS TÉRMICOS.....	64
A9.1.3.	MODELOS PARA LA REMOCIÓN DE LA DBO.....	66
A9.1.4.	MODELOS PARA LA REMOCIÓN DE SST.....	68
A9.1.5.	MODELOS PARA LA REMOCIÓN DEL NITRÓGENO.....	69
A9.1.6.	MODELOS PARA LA REMOCIÓN DEL FÓSFORO.....	72

A10. PROGRAMA.

A10.1.	ALGORITMO DEL PROGRAMA PROPUESTO.....	73
A10.2.	PROGRAMA.....	77
A10.3.	CORRIDA DEL PROGRAMA.....	81
A10.4.	MEMORIA DE CÁLCULO.....	83
A10.4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	100

A11. CONCLUSIONES.....101

A12. BIBLIOGRAFÍA.....102

A13. ANEXO.....104

En la parte introductoria se menciona la forma en la que se encuentra distribuida el agua en la tierra y se citan cifras para ver la cantidad de agua residual que no es tratada, la cual representa el 73% del total de agua residual generada en el país y que es enviada directamente a algún cuerpo receptor. En el Capítulo 1 se menciona la forma de utilización y contaminación del agua, su clasificación, principales contaminantes, su composición típica (aguas residuales domésticas), así como las características Físicas, Químicas y Biológicas del agua residual, finalmente para concluir el capítulo se mencionan los principales daños causados por la contaminación de la misma.

En el Capítulo 2, se hace referencia a norma la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas de bienes nacionales.

Dentro del Capítulo 3, se describen los procesos de tratamiento que son utilizados actualmente, se presenta una tabla comparativa de porcentajes de remoción de contaminantes y otra de costos por tratamiento, posteriormente se describen de manera breve algunos tipos de tratamiento.

Dado que los humedales artificiales brindan mejores resultados cuando se aplican como tratamiento secundario, es necesario dar al efluente un tratamiento primario que en este caso al tratarse de poblaciones rurales es recomendable utilizar tanques o fosas sépticas, cuyas características generales, clasificación y especificaciones de diseño se mencionan en el Capítulo 4, solo como conocimiento complementario de este trabajo, ya que no esta dentro de los alcances del proyecto.

En el Capítulo 5, se mencionan los aspectos y fundamentos teóricos de los humedales artificiales, es decir; su clasificación, sus componentes y consideraciones para su diseño. El modelo utilizado para el diseño del humedal es tratado en el Capítulo 6, mismo que se rige por la ecuación de Darcy, que es aplicable cuando la celda se rellena de arenas, gravas o material arcilloso como medio de soporte y se mantienen condiciones de flujo laminar.

En el capítulo 7, se presenta el algoritmo del programa, el programa, una corrida impresa del programa, memoria de cálculos y el análisis de resultados. Y en la parte final del trabajo se presentan las conclusiones, el glosario, y la bibliografía que fue consultada para el logro de este proyecto.

El agua es un recurso natural muy valioso que se encuentra en forma sólida, líquida o en vapor, distribuida de manera irregular sobre la Tierra (subsuelo y atmósfera). En los *océanos, casquetes polares y glaciares* se encuentra el 99.35% del total existente. El 0.65% restante se encuentra en los grandes ríos, lagos, mares internos, arroyos, manantiales, estanques, pozos, charcos, pantanos, lodazales, la nieve y vapor de agua en la atmósfera, desagües, presas, la nieve y el hielo de las montañas, la humedad de la tierra. El 97% de esta pequeña parte de agua es útil para el hombre y proviene de las aguas subterráneas.

En México existen 320 cuencas hidrológicas que proveen 410,164 millones de m³ de agua al año, las principales cuencas son:

- a) En la vertiente del Pacífico, las de los ríos Yaqui, Fuerte, Mezquital, Lerma, Santiago, Balsas, etc. En la vertiente del Golfo de México las cuencas de los ríos Bravo, Pánuco, Papaloapan, Grijalva, Usumacinta, y la del río Nazas, entre las cuencas endorreicas. De acuerdo a un estudio que realizó la CNA del periodo 1974–2005, las cuencas más contaminadas son el río Lerma, el alto Balsas, el río Blanco y el río San Juan.
- b) Cabe mencionar que el 90% de la carga orgánica total que se genera en el país medida en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se concentra sólo en 20 cuencas. En el año 2000 se realizó un análisis de calidad a 535 cuerpos de agua superficiales, los resultados obtenidos fueron; 5% del agua es excelente, el 22% es aceptable, el 49% poco contaminada, el 15% contaminada, el 7% altamente contaminada y el 2% contiene tóxicos. Estos resultados confirman por un lado el gran problema de contaminación y por otro la gran necesidad de tratar el agua residual para su reutilización.

La preocupación por la contaminación del agua ha llevado al hombre a buscar nuevos métodos para su purificación y como resultado de esa búsqueda se han diseñado varios sistemas de tratamiento utilizados en la actualidad para disminuir la concentración de los contaminantes presentes en las aguas residuales hasta los límites máximos permisibles para su reutilización.

En México la población total es de 103,491,557 habitantes (El 25% vive en comunidades rurales), el 89.5% cuenta con servicio de agua potable y el 85.9% con servicio de alcantarillado, la cantidad de agua residual generada es de 265,633 lps de los cuales se colectan 205,021 lps. y son tratados 71,786 lps. lo cual representa sólo el 27% del total de agua residual generada, esto de acuerdo con los datos de población del II Censo de Población y Vivienda INEGI 2005.

En su mayoría los sistemas de tratamiento empleados son de un alto costo de construcción, operación y mantenimiento a esto se debe que se sitúan principalmente en zonas urbanas, dejando desprotegidas a las poblaciones rurales de nuestro país donde no se cuentan con una economía suficiente para poder construir, operar y mantener un sistema de tratamiento mecánico.

Es por ello que los humedales artificiales ofrecen una buena opción para dar un tratamiento secundario a las aguas residuales domésticas a esta parte de la población, debido a que se obtienen resultados hasta del 80% en remoción de carga orgánica y del 25 al 85% en remoción de nitrógeno, sin embargo los microorganismos patógenos no pueden ser eliminados sólo con este tipo de tratamiento para lo cual se debe desinfectar el efluente con un tratamiento terciario, y por lo que respecta al costo es una de las más económicas y de fácil operación.

La finalidad de este trabajo es poder hacer un cálculo previo de las dimensiones de diseño jugando con las diferentes variables involucradas para poder seleccionar el tipo de vegetación, substrato y el área mínima con los cuales se obtenga una mayor eliminación de los contaminantes en las aguas residuales de tipo doméstico, cuyo influente puede provenir de cualquier comunidad rural, y así no tener la necesidad de utilizar modelos que ya fueron establecidos basándose en datos experimentales de humedales artificiales construidos en otros países cuyo clima, hidrología y concentraciones de contaminantes son muy distintos a las de nuestro país.

1.1. ANTECEDENTES.

El agua es un recurso indispensable para toda forma de vida, sin embargo, la mala distribución (natural), disposición y, sobre todo, el desperdicio inconsciente de la misma, están provocando que sea contaminada en forma acelerada, a tal grado que ya no es posible su recuperación de forma natural como en la antigüedad.

En México, el 60.64% del agua es utilizada en la generación de energía, el 32.78% es destinada al uso agrícola, el 4.55% es para uso doméstico, el 1.34% es utilizada por la industria y el resto es utilizada por la acuicultura. Estos cuatro rubros son las principales fuentes de contaminación del agua, que de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 la cual define al agua residual como **"Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas"**.

La contaminación del agua provoca diferentes enfermedades a los seres humanos, disminuye la reproducción en los seres acuáticos, y en algunos casos puede provocar la muerte. Las enfermedades más comunes son las enfermedades infecciosas intestinales o del "tipo hídrico"; en México se reportaron 4,897 durante el año 2001, lo cual representa el 1.1% de las causas de mortalidad. De aquí la necesidad de disminuir la cantidad de contaminantes emitidos a los cuerpos receptores de aguas residuales, estipulados por la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Norma que deberá ser cumplida al 1 de Enero del 2010 por las comunidades de 2,501 a 20,000 habitantes, según datos del censo del año 2000 existen 196,328 comunidades rurales (1-2,499 habitantes), es decir 24,723,590 hab. y considerando que cada habitante genera en promedio de 100 a 150 litros-habitante/día se habla de 2,472,359,000 lps de agua residual generada diariamente solo en las zonas rurales, que en su mayoría es canalizada a cuerpos receptores sin darle un tratamiento previo.

El costo para tratar el agua varía dependiendo del tipo de proceso así como del influente y condiciones socio-demográficas entre otros aspectos; una planta mecanizada por ejemplo tiene un costo aproximado de 1,100,000 USD, sin olvidar la necesidad de contar con el personal capacitado para la operación y mantenimiento de la misma¹, como se hizo mención en la parte introductoria las comunidades rurales no tienen la capacidad de mantener un sistema de este tipo. Para ellos es más sencillo de operar y mantener un humedal artificial de poca capacidad (1.5-10 lps) cuyo costo aproximado por m³ de agua tratada utilizando de \$1.24.

En México ya se han construido plantas de tratamiento basadas en este principio, por su parte la Comisión nacional del agua tiene registrados en su inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales a 47 humedales artificiales, ubicados en Chihuahua, Tamaulipas, Nayarit, Colima, Michoacán, Hidalgo, Tlaxcala, Oaxaca, operando algunos al 100% de su capacidad de diseño y otros al 50%, obteniendo buenos resultados.

¹ Costo de mantenimiento y operación: 107,000 USD aproximadamente.

Por su parte el PIQAYQA² de la UNAM Dirigidos por la Doctora Carmen Durán de Bazua y otros profesores en cooperación con otras entidades construyeron una planta para demostración en los viveros de Coyoacán en la ciudad de México, D. F. cuyo objetivo fue la disseminación técnica de este sistema, maneja aguas residuales urbanas provenientes del Río Magdalena con un flujo de 5.6 m³/h, un tiempo de residencia de 1.8 días, un área de 75 m², utilizando carrizos, cuya eficiencia de remoción es de 74% para la Demanda química de Oxígeno (DQO) y 75% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), con más del 80% de remoción de nitrógeno amoniacal y 20% de fósforo total, con respecto a los coliformes totales y fecales la reducción es del 99.5 al 99.997%, sin embargo de acuerdo con la normatividad mexicana todavía representan un peligro para la salud.

Otra ventaja adicional al utilizar esta tecnología es la gran remoción de fósforo y nitrógeno amoniacal, lo cual no se logra comúnmente utilizando métodos convencionales. Por otro lado, una desventaja es la gran sensibilidad a las variaciones de carga hidráulica (colmatación) y la poca remoción de coliformes fecales empleando bajos tiempos de retención o altas cargas orgánicas o hidráulicas, es por ello que se debe de incluir un proceso de desinfección (cloración), con la finalidad de asegurar a la eliminación de los coliformes fecales y/o totales.

1.2. PLANTAS EXISTENTES DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL PAÍS.

Actualmente existen en el país 51 plantas de tratamiento de aguas residuales a base de humedales registrados en el inventario nacional de plantas de tratamiento para aguas residuales de la comisión nacional del agua 2006, 30 ubicados en Oaxaca, y los restantes se encuentran en los estados de Aguascalientes, Chiapas, Chihuahua, Jalisco, México, Nuevo León, Tabasco, Tamaulipas, Nayarit, Tlaxcala, Colima y Michoacán.

En la tabla 1.1. se muestran las temperaturas máximas y mínimas de algunos estados de la República donde se encuentran las plantas de tratamiento a base de humedales, así como los gastos de diseño y de operación en lps. , y en la tabla 1.2 se hace mención de los municipios de ubicación.

Tabla 1.1. Estados de la República donde se encuentran las plantas de tratamiento a base de humedales.

Estado	Humedales existentes	Temperatura máxima del mes más frío °C	Temperatura mínima del mes más frío °C	Temperatura máxima del mes más caluroso °C	Temperatura mínima del mes más caluroso °C	Capacidad de diseño lps	Capacidad de operación lps
Chihuahua	2	12	10	26	22	7	4
Colima	1	12	3	22	18	12	7
Hidalgo	1	9	8	31.5	15.4	17.4	8
Michoacán	1	9*	-	21*	-	20	10
Nayarit	2	-	-3	22	18	10.6	3.5
Oaxaca	11	-	18	28	22	79.5	41
Tamaulipas	1	26*	-	18*	-	8	5
Tlaxcala	2	18	3	16	12	23.8	8.4

*Son temperaturas medias anuales.

² Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental. Facultad de Química, UNAM Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México. Correo electrónico (e-mail): mcduran@servidor.unam.mx
Tel. (+52-5) 622-5300, 01, 02, 04, Fax: (+52-5) 622-5303

Tabla 1.2. Municipios donde se encuentran los humedales.

Número	ESTADO	Municipio	Nombre de la planta	Capacidadl de diseño / operación	Desembocadura
1	Chihuahua	Allende	Agua fría	1.0/1.0	Río Parral
2		Casas Grandes	Casas Grandes	6.0/3.0	Río Casas Grandes
3	Tamaulipas	González	Estación Manuel	8.0/5.0	Arroyo
4	Nayarit	Amatlán de las cañas	Estancia de los López	4.7/2.0	Drenaje
5		Ixtlán del Río	Mexpan	5.9/1.5	Arroyo
6	Colima	Tecoman	Bayardo Nuevo Caxitlan	12.0/7.0	Acuífero Valle Tecoman
7	Michoacán	Cuitzeo	Cuitzeo	20.0/10.0	Lago Cuitzeo
8	Hidalgo	Mineral del Monte	Mineral del Monte	17.4/8.0	Arroyo el Manzano
9	Tlaxcala	El Carmen	Tequextitla	20.0/5.0	Laguna Totolcingo
10		Santa Cruz Quileta	Quileta	3.8/3.4	Río Zahuapan
11	Oaxaca	El Espinal	El Espinal	12.0/12.0	Río los Perros
12		San Andrés Zautla	Zautla	6.0/6.0	Río Atoyac
13		San Francisco Telixtlahuaca	San Francisco Telixtlahuaca	4.0/4.0	-
14		San Juan Bautista	Cuicatlán	7.0/7.0	Río Chiquito
15		San Lorenzo Cacaotepec	Santiago Etna	6.0/0.0	-
16		San Pedro Mixtepec	Puerto Escondido	15.0/7.0	Río San Pedro
17		San Sebastián Tula	San Sebastián Tula	10.0/4.0	Riego y Río Salado
18		Santa María Huatulco	Aguaje el Zapote	1.0/0.0	-
19		Huatulco	Huatulco	6.0/0.0	Río
20		Santo Tomas Mazaltepec	Santo Tomas Mazaltepec	1.0/1.0	-
21		Villa Etna	Villa Etna	11.5/0.0	-

También existen tratamientos combinados, es decir, un tratamiento primario y utilizan al humedal como tratamiento secundario de estos se tienen registrados en el inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales de la Comisión Nacional del Agua 2006 las siguientes procesos y cantidades:

FOSA SÉPTICA + HUMEDAL ARTIFICIAL = 40

RAFA + HUMEDAL ARTIFICIAL = 4

SEDIMENTACIÓN + HUMEDAL ARTIFICIAL = 15

Dando un total de 110 plantas de tratamiento basados en este principio construidos en nuestro país.

1.3. AGUAS RESIDUALES Y SU CLASIFICACIÓN.

El agua residual es generada durante la utilización del agua de abastecimiento (agua potable) en una población, en fines domésticos, industriales, comerciales, turísticos, públicos, etc. Durante este proceso le son agregadas diversas sustancias que cambian sus propiedades físicas, químicas y bacteriológicas, incluyendo sus propiedades organolépticas, adquiriendo así apariencia y características típicas de las aguas residuales o de desecho, como es el mal olor y la turbiedad debido al arrastre de sólidos, cuyo color característico es gris en sus diversas tonalidades (dependiendo del tiempo de su generación). La presencia de microorganismos patógenos pueden causar diversas enfermedades conocidas como "hídricas", así como de sustancias que limitan su uso o aceptación. La presencia de estas sustancias o "materiales extraños" deteriora la calidad del agua y la hacen inutilizable para el consumo humano o actividades donde interviene el ciclo de la vida de cualquier especie, los contaminantes que se adicionan a las aguas utilizadas con frecuencia son muy variados y de diversa índole, dichos contaminantes se pueden clasificar de acuerdo a la tabla 1.3.

Generalmente las aguas residuales tienen un aspecto turbio, y contienen material sólido en suspensión. Debido a su naturaleza y al tiempo de vida de la descomposición bacteriana de dichos sólidos, las aguas residuales se clasifican en tres tipos:

- *Aguas residuales frescas*, tienen un aspecto gris y tienen un olor a moho no desagradable, contienen gran cantidad de material flotante como, materia fecal, residuos de alimento, basura, papel, astillas, y otros contaminantes que son producto de la actividad cotidiana de los habitantes de una comunidad (ya sea rural o urbana).
- *Aguas residuales sépticas*, al pasar el tiempo el color gris de las aguas residuales frescas cambian a color negro, el olor se torna desagradable, los sólidos ahora son de color negro, todo esto es producto de que el oxígeno disuelto ya se ha agotado, y por lo tanto, los sólidos se encuentran en la fase de descomposición anaerobia produciendo ácido sulfhídrico (el característico olor a huevo podrido) y otros gases.
- *Aguas residuales estabilizadas*, los sólidos que se encontraban en periodo de descomposición pasan a ser sólidos relativamente inertes, que no están sujetos a descomposiciones posteriores o que se descomponen muy lentamente, el oxígeno que se encuentra presente es absorbido de la atmósfera. Su olor es ligero o nulo, y tiene pocos sólidos suspendidos.

Con respecto a la calidad del agua residual la clasificación se hace de acuerdo a su origen de procedencia en cuatro grupos: de origen domestico, industrial, agropecuario y el que es utilizado en la generación de energía y para fines del presente trabajo solo se presentará en la tabla 1.3., la composición típica de las aguas residuales de origen doméstico.

Tabla 1.3. Clasificación de los compuestos presentes en el agua de acuerdo a la clasificación convencional (tóxicos prioritarios).

Contaminantes convencionales	Parámetro
Bacteriológicos	Coliformes fecales y coliformes totales
	Vibrio cholerae
	Shigella
	Salmonella
	Giardia lamblia
Químicos Físicos	Alcalinidad
	Oxígeno disuelto
	pH
	No metales
	Metales
	Nutrientes (N y P)
	Dureza
Cloro residual	
Físicos	Color
	Olor
	Sabor
	Temperatura
	Turbiedad
	Sólidos
	Conductividad
Materia orgánica	Demanda química de oxígeno (DQO)
	Demanda biológica de oxígeno (DBO)
	Carbono orgánico total (COT)
	Extractables con cloroformo
	Fenoles
	Grasas y aceites
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	

1.4. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL DEL TIPO DOMÉSTICO.

En el agua residual doméstica, se agrupan todas las aguas residuales que se captan por el alcantarillado público, tales como las aguas residuales generadas por la población, zonas comerciales, instituciones públicas (hospitales, cárceles, colegios, etc.), centros recreativos, etc., esta agua tiene aproximadamente la misma composición (ver tabla 1.4), y el flujo tiende a incrementarse en las zonas urbanas, como es el caso del Distrito Federal. La tabla que se muestra a continuación solo considera a los contaminantes físicos, químicos y materiales orgánicos del agua residual de tipo doméstico, no se incluyen a los bacteriológicos debido a que estos son muy variables dependiendo del lugar de muestreo y no es posible estimar un promedio para considerarlo como composición típica.

Tabla 1.4. Composición típica de las aguas residuales domésticas (concentración en mg/l).

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 (DBO ₅ a 20°C)	400	220	110
Carbono Orgánico Total (COT)	290	160	80
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1.000	500	250
Nitrógeno total (como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo total (como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como Co ₃ Ca)	200	100	50
Grasa	150	100	50

1.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL.

Se describirán los parámetros según la clasificación de la tabla 1.4., y se consideraran a las aguas residuales en su estado séptico. El color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, sólidos y conductividad son las características físicas que poseen las aguas residuales.

Color, las aguas residuales tienen un color variable dependiendo del uso previo. Por ejemplo, las aguas negras recientes tienen un color gris que se va tornando a oscuro e incluso negro, debido a la actividad de microorganismos anaerobios que descomponen la materia orgánica utilizando el oxígeno disuelto, dando como

subproductos al ácido sulfhídrico y metano entre otros compuestos más. El color turbio indica la presencia de hierro y magnesio coloidal, además de la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales que pueden ser removidos con ayuda de un coagulante de una sal de ión metálico trivalente como el Al^{+++} o el Fe^{+++}

Olor y sabor, generalmente el olor y el sabor son prácticamente indistinguibles. Varias son las causas de los olores y sabores; entre las más comunes se encuentran: materia orgánica en solución, ácido sulfhídrico, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, hierro, manganeso, fenoles, aceites, productos de cloro, diferentes especies de algas, hongos, etc. Al iniciarse la descomposición de la materia orgánica se generan gases como el ácido sulfhídrico que le da el olor característico a huevo podrido además de la generación de gas metano entre otros (ver tabla 1.5.).

Tabla 1.5. Principales compuestos generados en las aguas residuales al iniciarse su descomposición.

Compuesto	Fórmula condensada	Descripción del olor
Ácido sulfhídrico	H_2S	Huevos podridos
Acetaldehído	CH_3CHO	Fuerte
Alil mercaptano	$CH_2=CH-CH_2-SH$	Fuerte a ajo.
Amil mercaptano	$CH_3(CH_2)_4-SH$	Desagradable y putrefacto
Aminas	$CH_3NH_2, (CH_3)_3N$	Pescado
Amoniaco	NH_3	Amoniaco
Bencil mercaptano	$C_6H_5CH_2-SH$	Desagradable y putrefacto
Diamidas	$NH_2(CH_2)_4NH_2$	Pescado descompuesto
Escatol	$C_8H_5NHCH_3$	Fecal
Indol	$C_6H_4C_2H_4NH$	Fecal, nauseabundo
Sulfuros orgánicos	$(CH_3)_2CH_3SSCH_3$	Basura podrida
Tiocresol	$C_6H_3OHCH_3S$	Rancio
Tiofenol	C_6H_4OHS	Putrefacto

Adaptado de: Sawyer (1978) y Lue Hing et al. (1992); según bibliografía.

Es difícil describir el sabor de un agua residual, ya que por el mismo contenido de microorganismos, bacterias, etc., nadie ha realizado esta prueba. Se relaciona ampliamente el olor con el sabor. Sin embargo, a veces las sustancias minerales disueltas pueden dar sabor al agua sin que se origine olor alguno, por ejemplo, las sales de cobre, cinc, hierro, etc. Por su lado los cloruros y sulfatos en concentraciones altas le dan al agua un sabor salado.

Temperatura, generalmente la temperatura de las aguas residuales es mayor comparada con la temperatura del agua de suministro, debido a la adición de calor que ejercen los usos de las labores domésticas. La temperatura tiene una gran importancia, debido a que favorece la biodegradación de compuestos o materia orgánica contenida en el agua residual, influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes y el desarrollo de la vida. La temperatura no tiene efectos directos sobre la salud. No obstante cuando se encuentra alrededor de $40^\circ C$ favorece el desarrollo de microorganismos y acrecienta los problemas de sabor, olor, color y corrosión. Las reacciones biológicas que se presentan en el agua son favorecidas por la temperatura, actuando como un factor de control. Tomando en cuenta que el oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en la fría, es por ello que una temperatura elevada acaba con la vida aerobia.

Turbiedad, este parámetro mide qué tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad ocasionada por materia coloidal puede ser resultado de la presencia de detergentes en el agua, jabones o emulsificadores, estas sustancias impiden el paso de la luz afectando a la fotosíntesis, y en consecuencia afectan a la flora y fauna acuáticas.

Sólidos, los sólidos incluyen todo tipo de materia, exceptuando el agua contenida en los materiales líquidos, para realizar todo tipo de estudio es importante cuantificar el contenido del material sólido contenido dentro de sustancias líquidas y semilíquidas. Se entiende por sólido, todo residuo que queda después de evaporar el agua a 103° C.

Sólidos totales, son todos los materiales orgánicos o inorgánicos que son arrastrados por el agua una vez que esta ha sido utilizada.

Desde el punto de vista analítico los sólidos totales se definen como el residuo que permanece después de haber evaporado y secado el agua a 103 y 105°C. Los sólidos totales se componen por el material flotante y material en suspensión, en dispersión coloidal y disolución. En las aguas residuales de tipo doméstico de composición media, cerca de la mitad son orgánicos y la otra mitad son inorgánicos.

Sólidos disueltos (o residuo filtrable), son determinados directamente por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. Si se determinan directamente, la muestra se filtra a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch; el filtrado se evapora en una cápsula de peso conocido sobre un baño María y el residuo de la evaporación se seca a 103-105°C. El incremento de peso sobre el de la cápsula vacía representa los sólidos disueltos.

Sólidos suspendidos (residuo no filtrable o material no disuelto), son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a 103-105°C; el aumento de peso sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos.

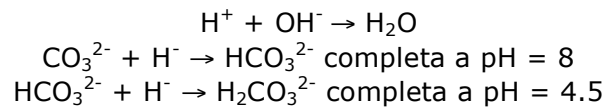
Sólidos volátiles y sólidos fijos, los sólidos definidos anteriormente se dividen en función de su volatilidad, Esto se realiza con la finalidad de conocer la cantidad de materia orgánica presente, una vez obtenido el crisol con sólidos disueltos o suspendidos es calcinado en una mufla, a una temperatura de 550°C, durante un periodo de 15 a 20 minutos. La pérdida de peso se registra como mg/l de sólidos volátiles y el residuo como mg/l de sólidos fijos.

Sólidos sedimentables, son todos aquellos sólidos en suspensión que sedimentan en condiciones de reposo, debido a la gravedad, son gruesos y tienen una gravedad específica mayor a la del agua y una gran acumulación de estos dan origen a los lodos. Se determinan llenando un tanque Imhoff de 1 litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono, al transcurrir una hora, en mg/l.

Conductividad, es la capacidad de una sustancia para transmitir corriente eléctrica cuyo valor depende del tipo de iones, concentración y estados de oxidación de estos. La conductividad del agua residual depende de la fuente de abastecimiento, y se adapta fácilmente a monitoreos continuos siendo un indicador rápido de contaminación en los cuerpos de agua (sólidos disueltos).

1.4.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL.

Alcalinidad se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, reaccionar con iones hidrógeno, aceptar protones o como la cantidad de sustancias alcalinas (OH^-). Son principalmente los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y NH_4^+ ; los más comunes son los de calcio y magnesio, si hay boratos, fosfatos o silicatos son medidos de igual forma. La alcalinidad es medida mediante titulación con un ácido de concentración conocida (H_2SO_4 0.02N), y el resultado se expresa como mg CaCO_3/l . Teniendo las siguientes reacciones:



El contenido de alcalinidad en el agua residual doméstica es del orden de 50 a 200 mg CaCO_3/l .

Oxígeno disuelto, este factor determina la existencia de condiciones aerobias o anaerobias, además de servir como base para cuantificar DBO, aerobividad de los procesos de tratamiento, tasas de aireación en los procesos de tratamiento aerobio y grado de contaminación. Los valores de oxígeno disuelto son muy bajos y disminuyen con el aumento de la temperatura.

pH, se determina de forma directa, la escala varía entre 0 y 14, siendo 7 el valor neutral, es decir la solución no es ácida ($\text{pH} < 7$) ni alcalina ($\text{pH} > 7$). La determinación del pH es útil para dar seguimiento a un proceso (neutralización, corrosión), o bien, para controlar las condiciones de operación (precipitación, floculación, sistemas biológicos anaerobios, desinfección), ya que la velocidad de las reacciones depende de él. El pH del agua residual doméstica es ligeramente alcalino (≈ 7.2).

Metales, son los elementos pertenecientes a los grupos I, II, III y parte del IV de la tabla periódica. Por *metales totales* o *extractables* se entiende a los metales detectados cuando una muestra no filtrada se somete a una digestión fuerte con ácido, y se obtiene una sal.

Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo), son los principales nutrientes requeridos para el crecimiento y reproducción de la flora y la fauna acuática, la abundancia o escasez de los mismos favorece o limita el crecimiento de las plantas acuáticas por lo que ambos son necesarios para acelerar el proceso de **eutroficación**, siendo el fósforo el elemento limitante en la mayoría de los casos.

Nitrógeno, está presente en forma de nitrógeno orgánico (3^- a 1^-), nitrógeno amoniacal (3^-), nitritos (3^+) y nitratos (5^+). Estas formas junto con el Nitrógeno son intercambiables y forman el ciclo del nitrógeno.

- Nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico y el amoniacal se determinan en forma conjunta y se denomina nitrógeno total de Kjeldahl (NTK). Se encuentra en las proteínas, péptidos, ácidos nucleicos, urea, desechos domésticos y agrícolas.

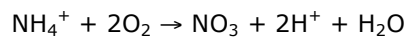
La fracción de nitrógeno orgánico en el agua varía de una centena de $\mu\text{g}/\text{l}$ en lagos hasta 20 mg/l de agua residual doméstica.

- Nitrógeno amoniacal. Es el contaminante que se encuentra con mayor frecuencia en el agua. El amoniaco y el ión amonio existen en solución en equilibrio de acuerdo con la siguiente reacción:



El NH_4^+ es producido por desaminación de compuestos orgánicos nitrogenados y por hidrólisis de la urea. En las aguas residuales de tipo doméstico es encontrado en concentraciones que van desde $10\mu\text{g/l}$ hasta $30\mu\text{g/l}$, asimismo es imposible obtener el cloro libre si no se oxida previamente el nitrógeno amoniacal. Los efectos de este compuestos son:

1. La toxicidad para la flora y la fauna acuática.
2. Disminución de la cantidad de cloro.
3. El consumo de oxígeno ($4.57 \text{ O}_2/\text{mg N}$) de acuerdo con la ecuación:



- Nitrógeno oxidado. Es la suma de nitritos y nitratos expresados como nitrógenos.

El nitrito es empleado como inhibidor de la corrosión en procesos industriales o por la preoxidación parcial del amoniaco, a esto se debe que en ocasiones se encuentra en altas concentraciones. Los NO_3 se emplean como fertilizantes en forma de nitrato de amonio o bien como explosivos cuando son mezclados con derivados del petróleo.

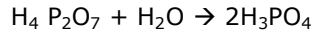
Los nitratos son escasos en las aguas residuales; estos compuestos son esenciales para los organismos autótrofos fotosintéticos y son considerados como nutrientes limitantes del crecimiento. Las alteraciones que producen son:

1. Los nitratos contaminan los cuerpos de agua al favorecer el crecimiento exacerbado de plantas (eutrofización acelerada).
2. El agua con alto contenido de nitratos ($>10 \text{ mgN/l}$) utilizada en la alimentación de infantes menores de 6 meses puede provocar metahemoglobinemia (asfixia).
3. El SO de las aguas que contengan nitritos al preparar alimentos conllevan el riesgo de formar sustancias carcinogénicas llamadas nitrosaminas.

Se recomiendan concentraciones de $11.3 \text{ mg N-NO}_3/\text{l}$ para el nitrato y $0.9 \text{ mg N-NO}_2/\text{l}$ para el nitrito.

Para controlar la presencia de nitrógeno es necesario controlarlo en todas sus formas, ya que es fácilmente intercambiable. El método más eficiente es la nitrificación / desnitrificación biológica donde el 95% de amoniaco se convierte a nitrato y 86% de nitrato a nitrógeno. Constando el proceso en dos etapas, una primera (nitrificación) donde el amoniaco se oxida a nitritos y nitratos, para posteriormente en la segunda etapa reducir los compuestos oxidados a N_2 (gaseoso).

Fósforo, está presente en el agua en forma de fosfatos, ortofosfatos, fosfatos condensados (pirofosfatos, metafosfatos o polifosfatos) y fosfatos orgánicos. Los polifosfatos disminuyen la concentración de equilibrio del calcio y evitan la precipitación de carbonato de calcio en tuberías, torres de enfriamiento o calentadores. Todos los fosfatos poliméricos se hidrolizan (químicamente o biológicamente) en agua o en compuestos más simples, ejemplo:



El fósforo proviene de las plantas, animales, suelos, fertilizantes, detergentes y descargas industriales. Para evitar la proliferación de algas en cuerpos de agua el PO₄ se debe mantener por debajo de 0.5 mg/l. Considerando el alto contenido de fósforo en el agua residual (25mg/l) la eficiencia de cualquier método de remoción debe ser alta, es decir del 98%.

En un sistema de tratamiento, el fósforo se elimina durante la sedimentación (tratamiento primario), durante un tratamiento biológico mediante la asimilación en la biomasa (20% en lodos activados), siendo la precipitación la más eficiente (90–95%). En la tabla 1.6. se muestran los principales compuestos utilizados en la remoción de fósforo.

Tabla 1.6. Principales compuestos utilizados en la remoción de fósforo.

Precipitador	Precipitado
Ca(OH) ₂	Ca ₅ OH(PO ₄) ₃ hidroxiapatita
Ca(OH) ₂ + NaF	Ca ₅ F(PO ₄) ₃ fluorapatita
Al ₂ (SO ₄) ₃	AlPO ₄
FeCl ₃	FePO ₄
MgSO ₄	MgNH ₄ PO ₄

Dureza, representa la concentración de cationes metálicos multivalentes (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Sr⁺⁺, Fe⁺⁺, Mn⁺, Al⁺⁺⁺ y Fe⁺⁺⁺) presentes en el agua capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y aniones (HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SiO₃²⁻) que también reaccionan con el agua para formar incrustaciones. De esto se deriva que las aguas duras impiden la formación de espumas y dificulta la cocción de legumbres, además de provocar incrustaciones en equipos donde se emplean temperaturas elevadas como lo son las calderas, tuberías de agua caliente, calentadores, etc.

La dureza se clasifica en *dureza carbonatada* y *no carbonatada*. La carbonatada es sensible al calor, precipita a altas temperaturas y es considerada como temporal y es equivalente a la alcalinidad. La más común es la del calcio y magnesio, un contenido de 150 a 300 mg/l como CaCO₃, con base a la experiencia se considera que una dureza de 80 a 100 mg/l es aceptable. El método mas utilizado es la precipitación del Mg⁺⁺ y Ca⁺⁺ como hidróxido y carbonato, respectivamente, en pH alto agregando cal y carbonato de sodio.

Cloro residual, la finalidad de la cloración es destruir o desactivar microorganismos patógenos. También mejora de la calidad del agua al reaccionar el cloro con el nitrógeno amoniacal, fierro, manganeso, sulfuros y algunos compuestos orgánicos. El cloro es determinado por la formación de un compuesto amarillo con ortotoluidina, el cual mide de 435 a 490 nm en un espectrofotómetro. La concentración del cloro debe ser de 0.2 a 0.5 mg/l para asegurar un nivel de desinfección aceptable.

1.4.3. MATERIAL ORGÁNICO.

Las aguas residuales de tipo doméstico muestran un alto contenido de compuestos orgánicos clasificados en dos categorías: biodegradables y no biodegradables; la materia biodegradable es consumida por microorganismos y se encuentra en forma de carbohidratos, grasas, proteínas, alcoholes, aldehídos, ésteres, incluyendo productos finales de la descomposición microbiana. Las técnicas analíticas para determinar la materia orgánica, consisten en evaluarla en conjunto, atendiendo características comunes y comprenden a los compuestos que ejercen demanda de oxígeno en terminos de DBO, DQO y compuestos con ligaduras de carbono orgánico total. Dicha determinación es realizada para saber el grado de contaminación del agua o para seguir la eficiencia de un proceso. En el agua residual de tipo doméstico, 75% de los sólidos suspendidos (SS) y 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Los principales grupos presentes son las proteínas (40% a 60%), carbohidratos (25% a 50%), grasas y aceites (10%).

Demanda química de oxígeno (DQO), es una medida cuantitativa de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química del material carbonoso (orgánico) presente, es decir, *mide la capacidad de consumo de un oxidante químico, dicromato o permanganato, por el material oxidable presente en el agua expresadas en ppm de O₂³*. Este ensayo es más rápido que el de DBO y no depende de tantas variables como lo es un ensayo biológico, la mayoría de la materia orgánica es oxidada a CO₂ + H₂O con la ayuda de agentes oxidantes fuertes, en condiciones ácidas.

La determinación de la DQO es realizada preparando una solución estándar de dicromato de potasio 0.25 N (0.0417 M), disolviendo 12.259 g de K₂Cr₂O₇ a un litro de agua. Se realiza entonces una mezcla de la materia orgánica que se está analizando con una cantidad conocida de la solución estándar de dicromato de potasio y H₂SO₄, para que el medio donde se desarrolle la reacción sea ácido. Esta mezcla se somete a reflujo durante dos horas, al término de las cuales se evalúa la cantidad presente de dicromato de potasio, utilizando sulfato ferroso amoniacal como indicador. La cantidad de dicromato de potasio reducida ($K_2Cr_2O_7 \text{ Inicial} - K_2Cr_2O_7 \text{ Final} = K_2Cr_2O_7 \text{ Reducido}$) es una medida de la materia orgánica oxidada. Las aguas residuales domésticas contienen entre 250 y 600 ppm, por otra parte la relación de DBO y DQO es un indicador de la biodegradabilidad de la materia contaminante, si esta relación es menor que 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y si es mayor que 0.6 como orgánico.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medida cuantitativa de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias, en un tiempo y a una temperatura determinada. Este ensayo permite determinar la concentración de materia orgánica del agua, pero no está relacionada con los requerimientos de oxígeno para la combustión química, ya que depende totalmente de la disponibilidad de materia utilizable como alimento biológico y de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos durante la oxidación.

No se puede establecer una relación entre DBO y DQO; si el valor de DQO es mayor que el DBO predomina el material oxidable químicamente, pero no biodegradable, lo que es común en aguas residuales crudas, residuales textiles y residuales de procesadoras de papel.

³ Romero, J. A. "Calidad del agua", Alfaomega 2ª Edición, 134 (2000).

En las aguas residuales típicas la relación de DQO/DBO=2, no así en las plantas de tratamiento de aguas residuales donde la relación puede ser de 3 o más.

Demanda bioquímica de oxígeno DBO₅, es la demanda bioquímica de oxígeno determinada a los cinco días. La técnica analítica normalizada específica que la prueba de la DBO debe determinarse a los cinco días de incubación a 20°C. Esta prueba sólo evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de sulfuros y del ión ferroso, no incluye a la nitrogenada. La DBO mide todos los compuestos biodegradables por vía aerobia; se expresa en mg de O₂/l.

El agua residual del tipo doméstico contiene de 200 a 300 mg de O₂/l, en algunos efluentes industriales alcanza hasta 20 g/l. La DBO es una reacción de primer orden que representa la cantidad de materia orgánica utilizada por los organismos, y se puede expresar como:

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL$$

Donde:

L_t : oxígeno equivalente a la materia orgánica en el tiempo (t)

k: tasa de consumo de oxígeno que es específica para cada tipo de sustrato.

La DBO se utiliza para:

- Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
- En el diseño de las instalaciones de tratamiento de agua residual.
- Medir la eficiencia de algunos procesos de tratamientos.

Carbono orgánico total (COT), evalúa el contenido total de carbono (C) en su forma orgánica, mediante combustión del mismo y su transformación en CO₂, el cual formado, es detectado por infrarrojo.

Extractables con cloroformo, estos compuestos corresponden al contenido de materia orgánica en el agua. Esta prueba se emplea como primer cribado para separar insecticidas clorados, nitrobenzenos y éteres aromáticos. Y cuando se tienen concentraciones superiores a 0.2 mg/l, el agua presenta mal olor y sabor.

Sustancias activas al azul de metileno (SAAM), su presencia produce espumas y sabor cuando se encuentran en concentraciones muy bajas. El estándar de 0.5 mg/l representa un factor de seguridad de 15,000 veces su toxicidad. Este método mide de manera global a los detergentes aniónicos y catiónicos; se lleva a cabo por una reacción con el azul de metileno mediante colorimetría.

Grasas y aceites, las grasas y los aceites son químicamente muy semejantes, ya que se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno en diversas proporciones. Las grasas son de los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por la acción de las bacterias. Sin embargo utilizando ácidos minerales e hidróxido de sodio se transforman a glicerina y ácido graso a sus sales alcalinas. La determinación analítica de las grasas y aceites es de manera global. La grasa afecta a la vida biológica acuática creando películas y materiales imperceptibles flotantes. Los límites son de 15 a 20 mg/l de contenido de grasas.

Fenoles, la prueba de fenoles se emplea para definir si un efluente tiene residuos industriales. Los fenoles alteran el sabor del agua, especialmente cuando es clorada, los fenoles pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones del orden de 500 mg/l; También se usan como biocidas y se generan clorofenoles al desinfectar con cloro. Las técnicas cromatográficas son más precisas en la medición de éstos.

1.4.4. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL.

Coliformes fecales, conforman aproximadamente el 95% de los coliformes totales, se definen como todos aquellos bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gram negativos, no esporulados capaces de producir aldehídos a partir de la fermentación de la lactosa con producción de ácido y gas en 24 hr. a 45.5°C. La técnica más empleada es la de filtro de membrana, en la que se seleccionan las bacterias por medios específicos de cultivo e incubación durante 24 a 48 hr. con la temperatura de 44.5°C. El medio específico de cultivo es una preparación sintética que contienen los nutrientes necesarios para aislar la cepa buscada. Sin embargo esta técnica no se recomienda para aguas muy turbias. Las ventajas de este grupo como indicador son:

- El 95% de los coliformes fecales resultan positivos en la prueba de temperatura.
- Pueden estar ausentes si la contaminación no es de origen fecal.
- Sobreviven menos tiempo que los coliformes totales. Esto nos permite suponer que, si se hayan en concentraciones altas, la contaminación es reciente.
- Los procedimientos de laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos.

Helminetos, este término se aplica a los parásitos con forma de lombriz que pertenecen, principalmente a tres grupos biológicos: nemátodos (nematelmintos o gusanos redondos), trematodos (distomas o duelas), cestodos (tenias).

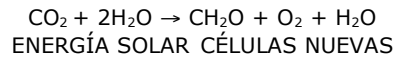
Bacterias. Grupo de organismos microscópicos unicelulares, rígidos y carentes de clorofila. Causantes de problemas gastrointestinales como, cólera (*Vibrio cholerae*), tifoidea (*Shigella*), y salmonelosis (*Salmonella*). No requieren de luz para su desarrollo vital. Desempeñan una serie de procesos de tratamiento, incluyendo oxidación biológica, digestión anaerobia, nitrificación y desnitrificación, y se clasifican como:

- Bacterias anaerobias, se desarrollan en ausencia de oxígeno libre y extraen oxígeno de las sustancias complejas. Al descomponerlas, estas bacterias requieren de oxígeno libre (elemental) para su desarrollo.
- Bacterias anaerobias facultativas, pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno no combinado.
- Grupo coliforme. Grupo de bacterias, que habitan predominantemente en el intestino del hombre, pero que también se encuentran en los vegetales, incluyéndose todos los bacilos aerobios y anaerobios facultativos gram negativos que no esporulan y fermentan la lactosa desprendiendo gases. Si esta fermentación ocurre a temperatura de 35 o 37°C se les denomina coliformes totales y si ocurre a la temperatura de 44 o 44.5°C se les denomina coliformes fecales. En el grupo de coliformes totales se encuentran: *Escherichia*, *E. Aureacens*, *E. Freundil*, *E. Intermidia*, *Enterobacter aerogeneso*, *E. Cloacae*, *Intermediaries bioquímicos* entre los *Escherichia* y *Enterobacter*.

Hongos. Son organismos multicelulares, no fotosintéticos y heterótrofos. La mayoría de los hongos son aerobios estrictos y tienen la propiedad de vivir a niveles de

pH muy bajos, del orden de 2 unidades u altos cercanos a 9; por lo que son importantes en el tratamiento de desechos industriales y en la digestión o composteo de desechos sólidos.

Algas. Son organismos unicelulares o multicelulares, autótrofos y fotosintéticos, cuya propiedad los hace importantes ya que en las lagunas de estabilización tienen la siguiente reacción:



Protozoarios. Son organismos microscópicos usualmente unicelulares. Son en su mayoría aeróbicos heterótrofos y utilizan las bacterias como fuente de energía al ingerirlas, con lo cual ejercen una acción de pulimento en los procesos biológicos.

Rotíferos. Son organismos aerobios, heterótrofos y multicelulares. Son muy efectivos en el consumo de bacterias dispersas y pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia indica una alta eficiencia de remoción en los procesos aeróbicos biológicos.

Crustáceos. Son organismos aeróbicos, heterótrofos y multicelulares, indican efluentes con bajos contenidos de materia orgánica y altas concentraciones de oxígeno disuelto.

Virus. Son organismos de menor tamaño, sólo son observables en un microscopio electrónico, requieren de un huésped para vivir se encuentra en la materia fecal humana, para eliminarlos es necesario la cloración de los efluentes de las plantas de tratamiento.

1.5. DAÑOS CAUSADOS POR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.

Toda aquella agua contaminada, afecta de alguna manera la calidad del agua de una fuente de abastecimiento. Sin embargo, se dice que *un agua residual provoca contaminación solamente cuando ella introduce condiciones o características que hacen al agua de la fuente o cuerpo receptor inaceptable para el propósito de la misma.*

En la tabla 1.7. se muestran de forma breve y generalizada, los efectos de los principales agentes de contaminación de las aguas residuales.

Tabla 1.7. Efectos de la contaminación de las aguas residuales.

Contaminante	Efecto
Materia orgánica biodegradable	Desoxigenación del agua, muerte de los peces, olores indeseables
Sustancias químicas inorgánicas solubles en agua como ácidos, sales y compuestos de mercurio y plomo	En altas concentraciones envenenan al agua, dañando a las formas de vida acuática, disminuyen el rendimiento agrícola y aceleran la corrosión de los equipos que operan con agua
Materia suspendida	Disposición en los lechos de los ríos; la materia orgánica se descompone y flota mediante el empuje de los gases, cubre el fondo e interfiere con la reproducción de los peces o transforma la cadena alimenticia
Sustancias corrosivas, cianuros, metales, fenoles, etc.	Extinción de peces y vida acuática, destrucción de bacteria, interrupción de la auto purificación
Microorganismos patógenos	Provocan enfermedades gastrointestinales, son la causa principal de muertes en niños menores de 5 años en países subdesarrollados como el nuestro
Sustancias que causan turbiedad, temperatura, color y olor, etc.	Incremento en la temperatura afecta a los peces, el color olor y la turbiedad hacen estéticamente inaceptable el agua para uso público
Sustancias o factores que transforman el equilibrio biológico	Pueden causar crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas las cuales alteran el ecosistema acuático, y causan olores
Constituyentes minerales	Incrementan la dureza, limitan los usos industriales sin tratamiento especial, incrementan el contenido de sólidos disueltos a niveles perjudiciales para los peces o la vegetación, contribuye a la eutrofización del agua

2.1. NORMATIVIDAD (NORMAS OFICIALES MEXICANAS DEL SECTOR AGUA)

La Comisión Nacional del Agua a través de su Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, expide Normas Oficiales Mexicanas en la materia, mediante las cuales ejerce las atribuciones que le confiere la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, como son aprovechar adecuadamente y proteger el recurso hídrico nacional.

Dichas normas establecen las disposiciones, las especificaciones y los métodos de prueba que permiten garantizar que los productos y servicios ofertados a los organismos operadores de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, cumplan con el objetivo de aprovechar, preservar en cantidad y calidad y manejar adecuada y eficientemente el agua.

El Instituto Nacional de Ecología y la Comisión Nacional del Agua han expedido en forma coordinada tres Normas Oficiales Mexicanas para la prevención y control de la contaminación del agua. En materia de la calidad del agua residual actualizado al 20 de enero del 2004.

Tabla 2.1. Actualización de la nomenclatura de las normas.

NORMA (NOMENCLATURA ACTUAL)	REGULACIÓN	NOMENCLATURA ANTERIOR Y AÑO DE PUBLICACIÓN EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Aclaración 30-Abril-1997)	NOM-001-ECOL-1996 6-ENERO-1997
NOM-002-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal	NOM-002-ECOL-1996 3-JUNIO-1998
NOM-003-SEMARNAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público	NOM-003-ECOL-1997 21-SEPTIEMBRE-1998

Para mayor comprensión de la normatividad es necesario definir algunos términos importantes, mismos que se mencionan en el glosario al final del texto.

2.2. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996

De acuerdo con la **NOM-001-SEMARNAT-1996**, cuyo *objetivo y campo de aplicación* es: "(...) establecer los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (...), con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales, y deberá ser cumplida de acuerdo con la tabla 2.2."

Tabla 2.2. Fechas de cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas municipales.

DESCARGAS MUNICIPALES		
Fecha de cumplimiento a partir de	Rango de población (según Censo de 1990)	Número de localidades (según Censo de 1990)
1 de enero de 2000	Mayor de 50,000 habitantes	139
1 de enero de 2005	De 20,001 a 50,000 habitantes	181
1 de enero de 2010	De 2,501 a 20,000 habitantes	2,266

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

Esta norma especifica:

1. La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en las tablas 2.5. y 2.6. de esta Norma Oficial Mexicana. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.
2. Para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.
3. Para determinar la contaminación por parásitos se tomará como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido, lo cual se llevará a cabo de acuerdo a la técnica establecida en el anexo 1 de esta Norma.
4. Al responsable de la descarga de aguas residuales que antes de la entrada en vigor de esta Norma Oficial Mexicana se le hayan fijado condiciones particulares de descarga, podrá optar por cumplir los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma, previo aviso a la Comisión Nacional del Agua.
5. Los responsables de las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales deben cumplir con la presente Norma Oficial Mexicana de acuerdo con lo siguiente:
 - a. Las descargas municipales tendrán como plazo límite las fechas de cumplimiento establecidas en la tabla 2.3. El cumplimiento es gradual y progresivo, conforme a los rangos de población. El número de habitantes corresponde al determinado en el XI Censo Nacional de Población y Vivienda, correspondiente a 1990, publicado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
 - b. Las descargas no municipales tendrán como plazo límite hasta las fechas de cumplimiento establecidas en la tabla 2.4. El cumplimiento es gradual y

progresivo, dependiendo de la mayor carga contaminante, expresada como demanda bioquímica de oxígeno₅ (DBO₅) o sólidos suspendidos totales (SST), según las cargas del agua residual, manifestadas en la solicitud de permiso de descarga, presentada a la Comisión Nacional del Agua.

Tabla 2.3. Fechas límite de cumplimiento para las descargas municipales.

DESCARGAS MUNICIPALES	
Fecha de cumplimiento a partir de	Rango de población
1 de Enero de 2000	Mayor de 50,000 habitantes
1 de Enero de 2005	De 20,001 a 50,000 habitantes
1 de Enero de 2010	De 2,501 a 20,000 habitantes

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

Tabla 2.4. Fechas límite de cumplimiento para las descargas no municipales.

DESCARGAS NO MUNICIPALES		
Fecha de cumplimiento a partir de	Carga contaminante	
	DBO₅, t/d	Sólidos suspendidos totales, t/d
1 enero 2000	Mayor de 3.0	mayor de 3.0
1 enero 2005	de 1.2 a 3.0	de 1.2 a 3.0
1 enero 2010	menor de 1.2	menor de 1.2

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

t/d: toneladas / día

Tabla 2.5. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

Parámetros (mg/l, excepto cuando se especifique)	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras				Suelo					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	Ausente																			
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Instantáneo

Muestra Simple Promedio Pondera

Ausente según el Método de prueba definido en la NMX-AA-006

P.D.= Promedio Diario

P.M.= Promedio Mensual

N.A.= No es aplicable

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

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

Tabla 2.6. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

Parámetros (*)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																							
	Embalses naturales y artificiales										Aguas costeras					Suelo								
	Ríos		Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)			
Miligramos por litro	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total

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

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

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

2.3. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996

La NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado. Dentro de las especificaciones se encuentran:

1. Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la tabla 2.7. para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal, resultante de los análisis practicados a cada una de las muestras simples.

Tabla 2.7. Límites máximos permisibles de aguas residuales descargadas en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
Parámetros mg/l, (excepto cuando se especifique otra)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (ml/l)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente: www.semarnat.gob.mx (página visitada en el 2006)

2. Los límites máximos permisibles establecidos en la columna de instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.
3. El límite máximo permisible de la temperatura es de 40°C. (cuarenta grados Celsius), medida en forma instantánea a cada una de las muestras simples. Se permitirá descargar con temperaturas mayores, siempre y cuando se demuestre a la autoridad competente por medio de un estudio sustentado, que no daña al sistema del mismo.
4. El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 (diez) y 5.5 (cinco punto cinco) unidades, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible, en ninguna de las muestras simples.

2.4. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1996

La Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso. Esta norma divide y define al reuso en dos tipos:

Reuso en servicios al público con contacto directo. Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

Reuso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional. Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones. Especifica que:

1. Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la tabla 2.8. de esta Norma Oficial Mexicana.

Tabla 2.8. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES					
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

Fuente: www.semarnat.gob.mx (Página visitada en el 2006)

2. La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada, de acuerdo al método de prueba establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-006, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana.
3. El agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la tabla 2.6. de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, referida en el punto 2 de esta Norma.
4. Las entidades públicas responsables del tratamiento de las aguas residuales que reusen en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de las aguas tratadas en los términos de la presente Norma Oficial Mexicana y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente.

Los muestreos los deben de realizar:

1. Los responsables del tratamiento y reuso de las aguas residuales tratadas, tienen la obligación de realizar los muestreos como se establece en la Norma Mexicana NMX-AA-003, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana. La periodicidad y número de muestras será:
2. Para los coliformes fecales, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno₅, sólidos suspendidos totales y grasa y aceites, al menos 4 (cuatro) muestras simples tomadas en días representativos mensualmente.
3. Para los huevos de helminto, al menos 2 (dos) muestras compuestas tomadas en días representativos mensualmente.
4. Para los metales pesados y cianuros, al menos 2 (dos) muestras simples tomadas en días representativos anualmente.

Los métodos de prueba que se deben aplicar son los siguientes:

Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, se deben aplicar los métodos de prueba indicados en las normas mexicanas a que se refiere el punto 2 de esta Norma. Para coliformes fecales, el responsable del tratamiento y reuso del agua residual, podrá realizar los análisis de laboratorio de acuerdo con la NMX-AA-102-1987, siempre y cuando demuestre a la autoridad competente que los resultados de las pruebas guardan una estrecha correlación o son equivalentes a los obtenidos mediante el método de tubos múltiples que se establece en la NMX-AA-42-1987. El responsable del tratamiento y reuso del agua residual, puede solicitar a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, la aprobación de métodos de prueba alternos. En caso de aprobarse, éstos pueden ser aplicados por otros responsables en situaciones similares. Para la determinación de huevos de helminto se deben aplicar las técnicas de análisis que se señalan en el anexo 1 de esta Norma.

De acuerdo con la normatividad anterior, para este proyecto aplican las *NOM-001-SEMARNAT-1996* (ver tabla 2.6., en el parámetro de embalses naturales y artificiales, para el uso en riego agrícola del tipo B), y la *NOM-003-SEMARNAT-1996*, por el reuso al público en contacto directo. La *NOM-002-SEMARNAT-1996* no aplica debido a que esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

3.1. ANÁLISIS DE PROCESOS DE TRATAMIENTOS ACTUALES.

Un proceso de tratamiento de aguas residuales convencional consiste en varias etapas de tratamiento mediante las cuales se remueven o estabilizan los contaminantes básicos que contiene, dichos contaminantes son aquellos compuestos que se presentan en las descargas de aguas residuales. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, sólo se consideran los siguientes parámetros: *grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DBO₅, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl, de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/litro de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.*

Como ya se mencionó anteriormente existen varios tipos de tratamientos para lograr la reducción de los contaminantes básicos, en la tabla 3.1. se muestran tanto las operaciones unitarias como los procesos químicos y biológicos que intervienen en el tratamiento de aguas residuales, seguida de la tabla 3.2. donde se puede observar el tipo de contaminantes y los métodos utilizados para su remoción. Finalmente en la tabla 3.3. se muestran las etapas de tratamiento y los procesos que pueden ser utilizados.

Tabla 3.1. Clasificación de los procesos de tratamiento empleados.

Tratamientos físicos y *químicos			Tratamientos biológicos
Igualación	Procesos de membrana	*Intercambio iónico	Lodos activados
Cribado	Destilación	*Ablandamiento	Lagunas
Desarenación	Fotólisis	*Recarbonatación	Disco biológico rotatorio
Flotación	Extracción con solventes	*Control de la corrosión	Filtro percolador
Sedimentación	Evaporación	*Precipitación	Lecho fluidificado
Filtración	*Neutralización	*Oxidación química	Reactor anaeróbico de flujo ascendente
Desorción	*Desinfección	*Coagulación-floculación	Humedales
Adsorción	*Primario avanzado		Uso del suelo como método de tratamiento

Tabla 3.2. Tipos de contaminantes y métodos de purificación empleados para removerlos.

Contaminante	Proceso
Sólidos suspendidos	Sedimentación Desarenación Cribado y filtración Flotación Coagulación-floculación Disposición en terreno
Compuestos orgánicos biodegradables	Sistemas biológicos con biomasa suspendida (lodos activados) Sistemas biológicos con biomasa fija (filtro sumergido) Filtración lenta Disposición en terreno
Patógenos	Cloración Ozonación U. V. Disposición en terreno Desinfección solar Filtración lenta
Nitrógeno	Nitrificación – desnitrificación biológica Desorción Intercambio iónico Cloración Disposición en terreno
Fósforo	Precipitación Remoción biológica y precipitación química Disposición en terreno
Compuestos orgánicos refractarios	Adsorción con carbón activado Ozonación Disposición en terreno
Metales pesados	Precipitación Intercambio iónico Disposición en terreno
Sólidos disueltos	Procesos de membrana Intercambio iónico

Tabla 3.3. Niveles de tratamiento y procesos que intervienen.

Etapas	Procesos
Pretratamiento	Desarenación Cribado Flotación
Primario	Sedimentación Reoxigenación Neutralización
Secundario	Procesos biológicos Coagulación-floculación
Terciario / avanzado	Remoción de N, P y metales pesados Remoción de detergentes Filtración con C activado
Complementario	Desinfección

Al seleccionar un proceso de tratamiento se deben tomar en cuenta varios factores, por ejemplo: número y tipo de población, sistema de alcantarillado, área disponible, costo de terreno, eficiencias o porcentaje de remoción entre otros, y debe realizarse un análisis específico para cada caso, sin embargo para este trabajo se consideraron estos parámetros de manera general. En la tabla 3.4 se muestra una comparación de porcentajes de remoción donde se puede observar que el mejor proceso para la remoción de DBO y SST son las lagunas facultativas en comparación con los humedales artificiales, sin embargo para la remoción de N y P los humedales han demostrado ser el mejor proceso de tratamiento.

Tabla 3.4. Análisis de procesos con respecto a los porcentajes de remoción.

Proceso	Eficiencias de remoción %				
	DBO	DQO	SST	F	N
Lagunas facultativas o Lagunas de oxidación	90-98	-	90-98	-	-
Lagunas aeradas con clarificador secundario	85-95	-	90	-	-
Lodos activados (convencional)	80-95	80-85	80-0	10-25	15-50
Tratamiento primario (fosa séptica)	25-40	30-40	50-65	10-20	10-20
Primario avanzado	40-70	30-60	60-90	70-90	-
Biofiltración	50-85	-	90	-	-
Filtros biológicos rotatorios	80-85	80-85	80-85	10-25	15-50
Humedales artificiales*	50-90	-	40-94	20-90	30-98

*Los humedales artificiales ubicados en Tlaxcala y Michoacán han demostrado tener eficiencias del 92 al 98% en la remoción de DBO y SST.

En la tabla 3.5 se hace un análisis de costos para algunos procesos de tratamientos, donde se observa que los más económicos son las lagunas facultativas seguidas por los humedales artificiales, sin embargo cabe recordar que las lagunas tienen la desventaja de producir grandes cantidades de lodos.

Tabla 3.5. Costos de tratamiento para una población de 10,000 habitantes.

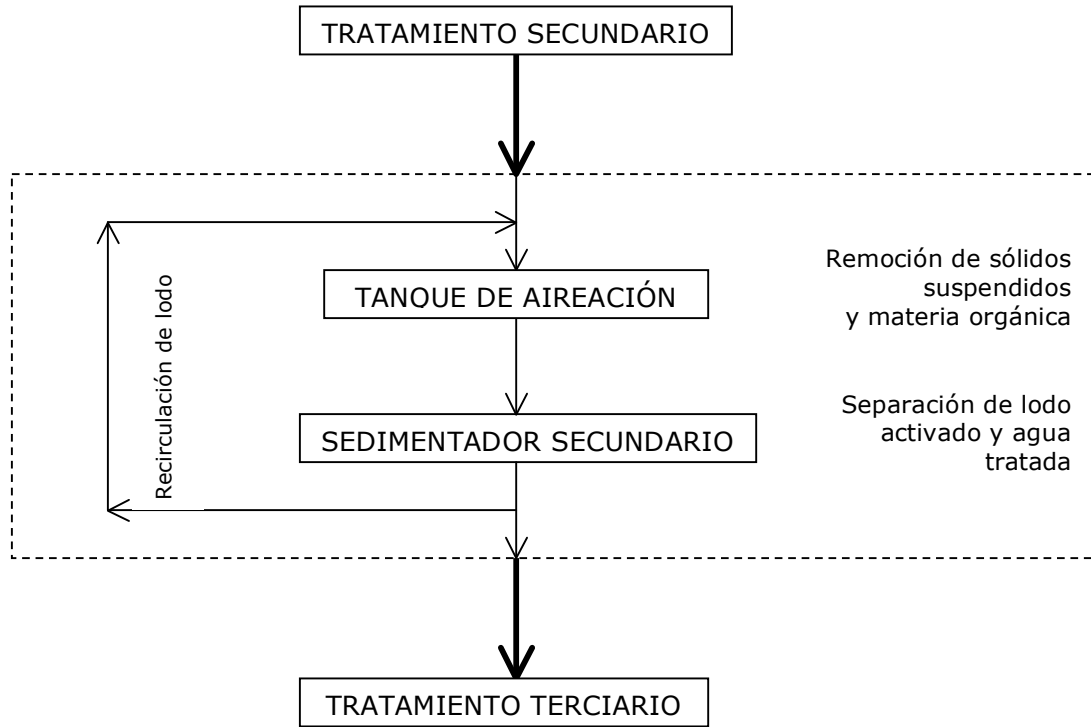
Proceso	Costos (\$ / m ³)			
	Inversión	Operación y mantenimiento	Indirectos	Total
Tratamiento avanzado, remoción de nitrógeno y fósforo	5.26	2.59	0.90	8.75
Aereación extendida	2.85	1.90	0.58	5.33
Lodos activados	2.74	1.5	0.57	4.81
Filtros biológicos	2.83	1.15	0.58	4.56
Primario con adición de cal	2.11	1.90	0.43	4.44
Primario con adición de sulfato de aluminio	2.34	1.36	0.49	4.19
Zanjas de oxidación	1.87	1.18	0.39	3.44
Tratamiento primario	1.41	0.91	0.3	2.62
Tratamiento anaerobio	1.41	0.75	0.28	2.44
Humedales artificiales	1.18	0.40	0.13	1.71
Lagunas facultativas con impermeabilización	1.23	0.30	0.12	1.65

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1999.

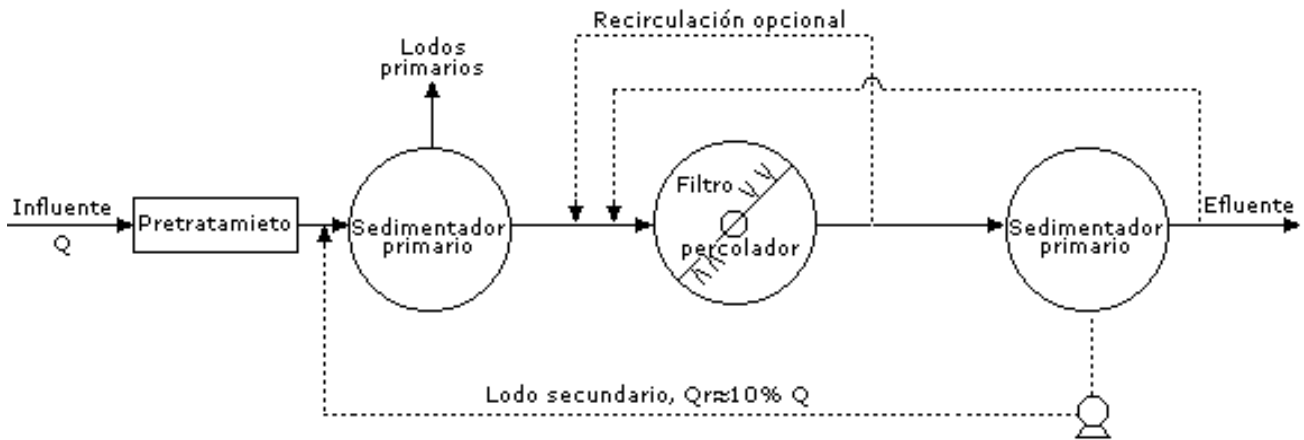
La Comisión Nacional del Agua en su inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales 2003 tiene registradas 1,360 plantas de tratamiento de aguas residuales con un gasto instalado de 89,585.28 l/s, de las cuales solo operan 1,174 con un gasto de operación total de 59,865.95 l/s. En su mayoría el tipo de tratamiento utilizado son lagunas de estabilización y lodos activados, por lo que respecta a los humedales en el año 2001 existían 21 registrados, para el 2003 se tienen 47 registrados distribuidos en 10 estados de la república, cuyo gasto de instalación total es de 138.8 lps y de operación 83.5 lps.

Los humedales o pantanos artificiales son la mejor opción para estabilizar las aguas residuales domésticas, sobre todo si se dispone de grandes extensiones de terreno y los caudales a tratar son bajos. Además son fáciles de operar, mantener y controlar, sin pasar por alto que mejoran el ambiente y sobre todo que se obtienen altas eficiencias en la remoción de contaminantes, esta tecnología esta respalda por 30 años de experiencia en Estados Unidos y Europa, y más de 10 años en México.

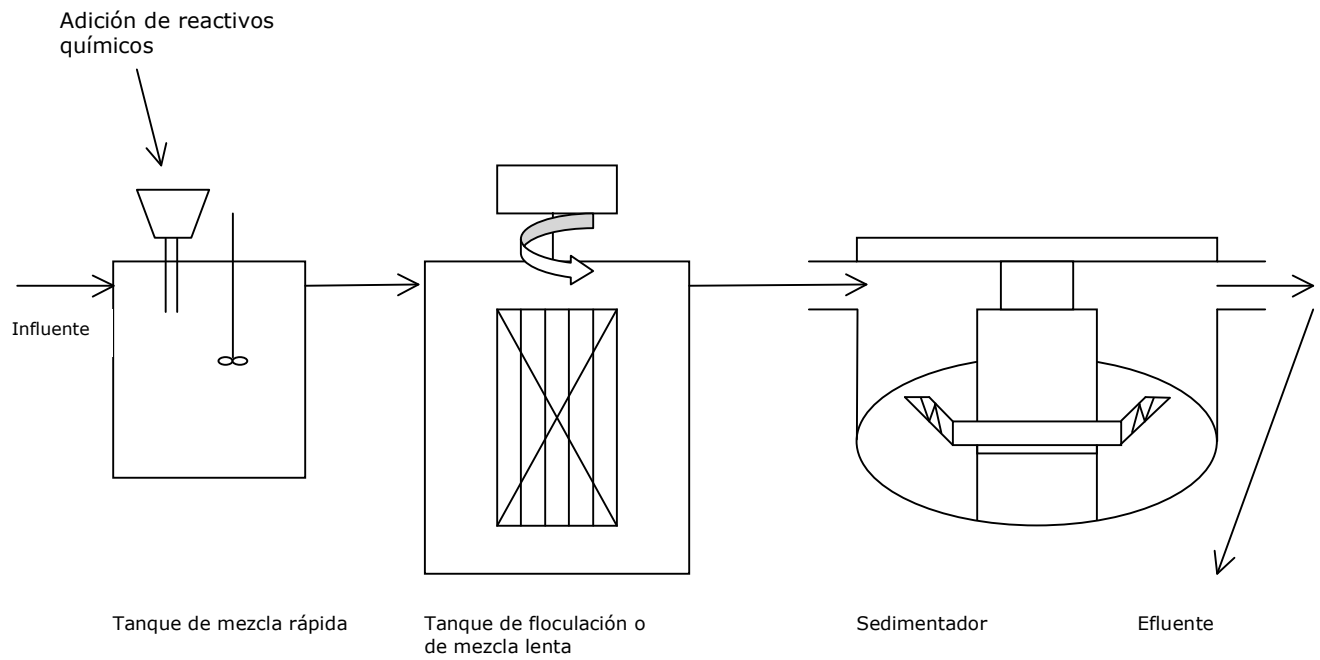
Lodos activados.



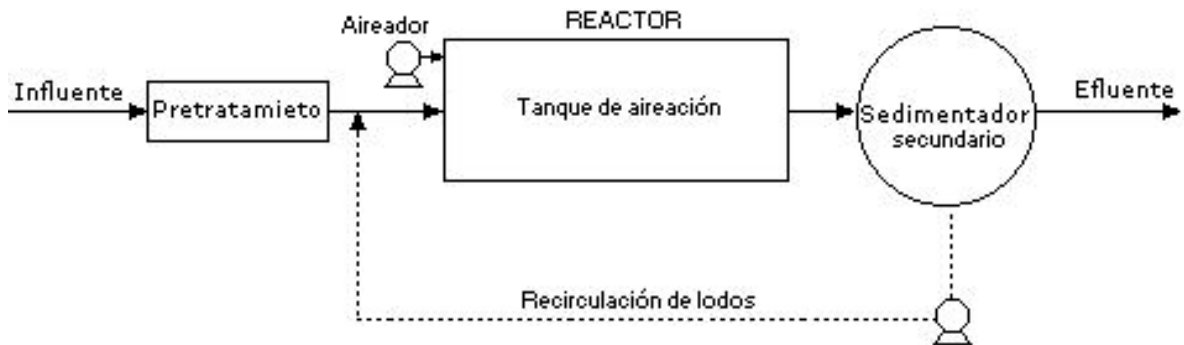
Filtros biológicos.



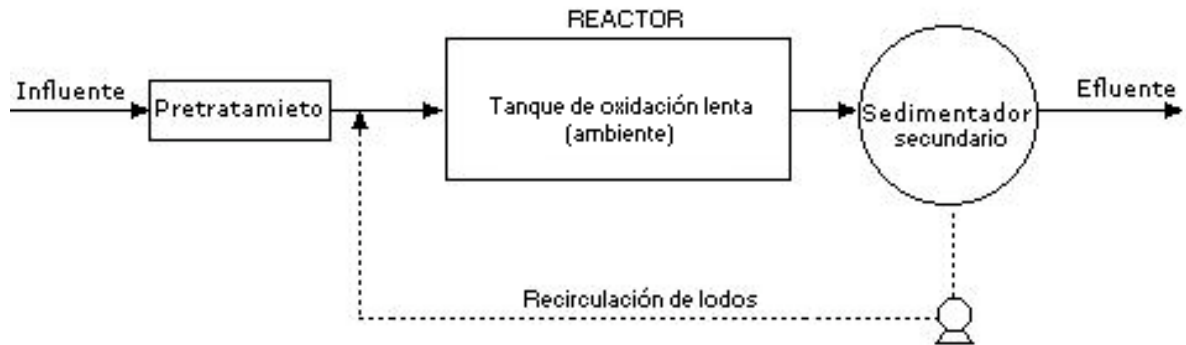
Primario con adición de reactivos químicos.



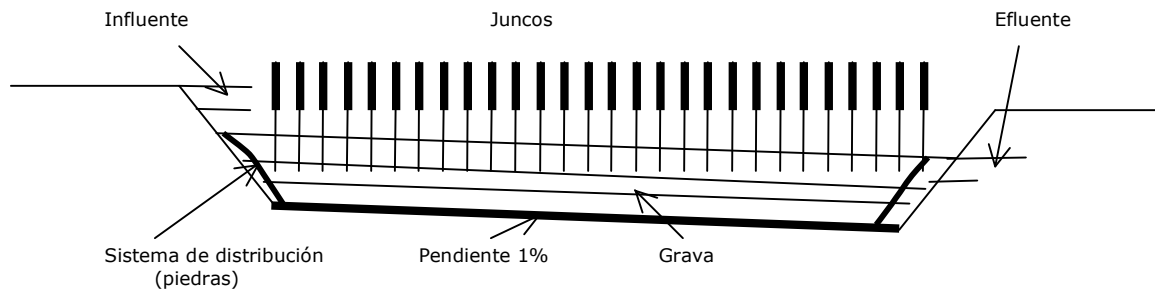
Aireación extendida.



Zanja de oxidación.



Humedales artificiales.



4.1. ASPECTOS TEÓRICOS.

Las fosas sépticas son las unidades de tratamiento que más comúnmente son instaladas para tratar las aguas residuales del tipo doméstico de pequeñas localidades o fraccionamientos (5 a 100 habitantes) donde no existe drenaje o sistema de tratamiento, estas unidades deben construirse lo más alejado posible de la zona habitada (hasta 100 m).

Las fosas sépticas se construyen comúnmente de ladrillos, mortero y cemento, su interior es aplanado, con profundidad de uno a tres metros y normalmente cuentan con trampa para separar grasas. Se pueden construir de una, dos y hasta tres cámaras. Su tiempo de retención varía de 1 a tres días, esto depende del grado de eliminación de materia orgánica que desee y del grado de estabilidad de **detritus** a obtener, el que frecuentemente es extraído por periodos que varían de cada 6 meses a cada dos años.

Con este tratamiento se obtiene una remoción del 30% Demanda Bioquímica de Oxígeno y Sólidos suspendidos si la fosa o tanque séptico es de un solo compartimiento, y del 60% si es de dos compartimientos. Es por ello que el efluente aún contiene trazas de materia orgánica y otros contaminantes, debido a esto es necesario complementar el proceso con otro tratamiento como son los filtros de grava, un campo de infiltración o una cámara de oxidación dependiendo del uso que se le quiera dar al efluente.

Las fosas sépticas se han perfeccionado ya que en el mercado es posible encontrar unidades construidas a base de materiales plásticos como el PVC o polietileno de alta densidad y existen algunas patentes con el nombre de "Fosas Sépticas Químicas" porque se adicionan productos como la cal o cloro para la estabilización de la materia orgánica a depositar o depositada. Sin embargo, en las zonas rurales también es común que las "fosas sépticas" solo cuenten con la caseta y la excavación, sin recubrimiento alguno, por lo cual a estos se les conoce como "Pozos Negros".

La forma más común para evacuar las aguas residuales de tipo doméstico es mediante su descarga a un sistema de alcantarillado sanitario. Sin embargo, esto no siempre es económicamente factible, sobre todo en sitios donde se tengan formaciones geológicas que hacen costoso este tipo de solución o cuando la población está bastante dispersa o bien, cuando no se tenga agua en disponibilidad suficiente para realizar el desalojo mediante un sistema hidráulico adecuado.

En dichos casos, es necesario instalar unidades específicas de evacuación y tratamiento para evitar la contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua potable, ya sean superficiales o subterráneas. En este sentido, el sistema de tratamiento a base de fosas sépticas que incluye el proceso séptico y el proceso de oxidación son una opción para resolver los problemas antes mencionados, que pueden utilizarse en los ámbitos urbano y rural.

La calidad del efluente que se obtiene de un tratamiento primario es muy baja, ya que aún contiene una gran cantidad de materia orgánica, de aquí la necesidad de someterlo a un tratamiento secundario como son los humedales. Las fosas sépticas darán al agua residual de tipo doméstico un tratamiento primario y los humedales un tratamiento secundario.

4.2. CLASIFICACIÓN.

Como se mencionó anteriormente, las fosas o tanques sépticos dan al agua residual un tratamiento del tipo primario, pueden construirse de una, dos o tres cámaras, y en su interior se llevan a cabo tres procesos, la sedimentación, el almacenamiento y la digestión de los lodos.

La sedimentación se lleva a cabo gracias a la diferencia de densidades de los sólidos que existen en las aguas residuales junto con la baja velocidad de flujo. La digestión de los lodos lo realizan las bacterias anaerobias, estas se encargan de realizar la actividad séptica.

4.2.1. FOSAS SÉPTICAS DE UNA CÁMARA.

Son las más sencillas y tradicionales, constan de un recipiente donde se lleva a cabo la sedimentación de sólidos en su forma más simple, los sólidos sufren una descomposición anaeróbica (digestión parcial o completa), proceso mediante el cual las bacterias transforman la materia orgánica (materia fecal, carbohidratos, proteínas y grasas) en ausencia de oxígeno a materiales poco oxidados como el gas metano, anhídrido carbónico, nitrito y nitratos. Ver Fig. 4.2.1.

4.2.2. FOSAS SÉPTICAS DE DOS CÁMARAS.

Consta de dos compartimentos, en el primero se llevan a cabo la sedimentación, digestión del fango y almacenamiento; en el segundo además de llevarse a cabo los procesos anteriores amplía la capacidad de almacenamiento. Si el diseño es para solo una residencia, el tiempo de retención es de 24 horas, en cambio si el diseño es para una institución el tiempo deberá ser más corto; esto por la cantidad de influente que entra al sistema, que es muy grande en este último caso para las dos cámaras que componen la fosa (se requerirían al menos tres cámaras para alcanzar a tratarlo). En general el fango deberá retirarse cada dos o tres años. Ver Fig. 4.2.2.

4.2.3. FOSAS SÉPTICAS DE TRES CÁMARAS.

Son recomendables para lugares públicos y donde las dimensiones del terreno no son una limitante. En este caso el agua de los inodoros es descargada al primer compartimiento mientras las aguas jabonosas se canalizan al tercero. El tiempo de retención varía de 24 a 72 horas. A partir de este punto, el efluente se somete a un tratamiento secundario (humedales en nuestro estudio), para eliminar la materia orgánica que aún se encuentra presente.

En la siguiente figura se puede apreciar la fosa séptica de una y dos cámaras, como se puede apreciar la de tres cámaras solo se le tendría que agregar una más o hacer una con tres compartimentos.

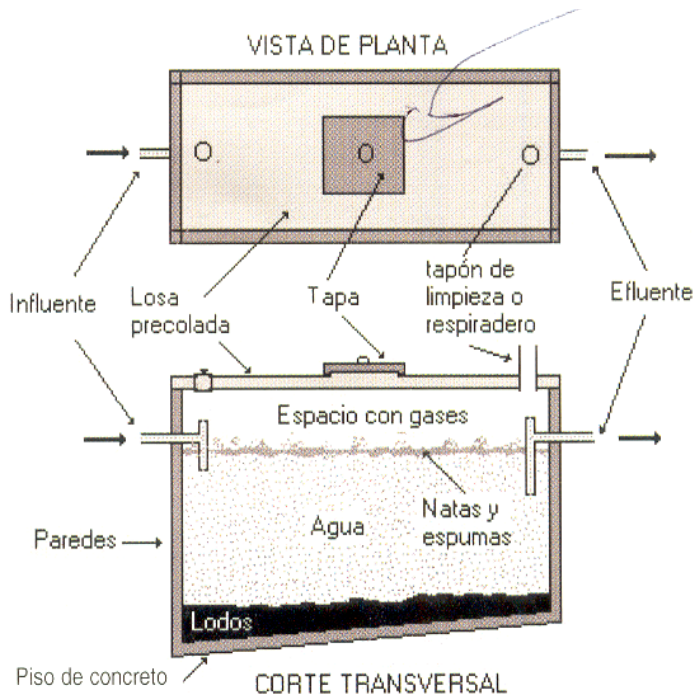


Fig. 4.2.1. Fosa Séptica de una Cámara

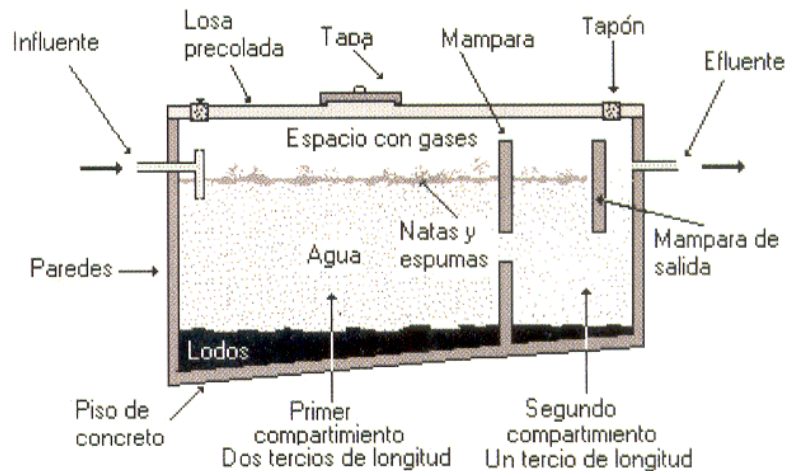


Fig. 4.2.2. Fosa séptica de dos Cámaras

4.3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

4.3.1. DIMENSIONES.

El tirante de agua debe ser como mínimo de 0.90 m y la longitud mínima de paso de agua a través de la fosa séptica debe ser de 1.20 m medida desde la entrada a la salida de la fosa séptica. El nivel máximo del líquido se debe indicar en el manual de operación.

4.3.2. CAPACIDADES.**4.3.2.1. Capacidad de trabajo.**

La capacidad de trabajo de una fosa séptica es precisamente su capacidad o volumen (m^3), ya que dicha capacidad permite tratar un volumen determinado de agua residual, de acuerdo al efluente de la misma. La capacidad de trabajo de la fosa séptica debe ser determinada en función del número de usuarios por servir y debe cumplir como mínimo con lo establecido en la tabla 4.1. La capacidad puede ser cubierta por una, o por varias unidades instaladas en paralelo.

Tabla 4.1. Capacidad de trabajo de la fosa séptica en función del número de usuarios.

Capacidad nominal (No. de usuarios)	Capacidad de trabajo (m^3)	
	Medio rural	Medio urbano
hasta 5	0.60	1.05
6 a 10	1.15	2.10
11 a 15	1.75	3.10
16 a 20	2.30	4.15
21 a 30	3.50	6.25
31 a 40	4.65	8.30
41 a 50	5.80	10.40
51 a 60	6.95	12.45
61 a 80	9.25	16.60
81 a 100	11.55	20.75

Se acepta una tolerancia del 5% respecto a los valores de capacidad establecidos.

4.3.2.2. Capacidad total.

En la capacidad total de la fosa séptica se debe considerar, además de la capacidad de trabajo, el volumen correspondiente al espacio libre por encima del tirante de agua, equivalente al 20% de la capacidad de trabajo como mínimo.

4.3.3. REGISTRO DE INSPECCIÓN.

La fosa séptica debe contar, como mínimo, con un registro para su inspección y limpieza. El registro debe localizarse en la parte superior de la fosa séptica.

La dimensión más pequeña del registro debe ser como mínimo 0.5 m. En el caso de fosas sépticas de cámaras múltiples, se debe contar con registros compartidos habilitados para la inspección de dos cámaras. La dimensión más pequeña de este registro debe ser como mínimo 0.60 m. Si las cámaras no pueden compartir un registro, se debe instalar uno por cámara.

4.3.4. ELEMENTOS DE CONTROL.

Las fosas sépticas deben tener elementos de control a la entrada y la salida, que eviten la turbulencia y el rompimiento de natas, como pueden ser rejillas o mamparas. El método de prueba será mediante verificación ocular.

4.3.4.1. Elemento de entrada hombre.

La sección terminal del elemento de entrada de agua a la fosa séptica debe estar sumergida como mínimo 0.15 m por debajo del tirante de agua y la parte inferior de la junta del elemento de entrada (tubería/pared de la fosa) debe ubicarse como mínimo 0.05 m por arriba del tirante de agua, bajo condiciones normales de funcionamiento. El diámetro mínimo interior de la tubería de entrada debe ser 0.1 m.

4.3.4.2. Elemento de salida.

El *elemento de salida* es la parte de la fosa séptica donde el efluente sale a través de tubería para su disposición final o para la siguiente etapa de tratamiento. La sección inicial del elemento de salida de agua de la fosa séptica debe estar sumergida como mínimo 0.15 m por debajo del tirante de agua.

4.3.5. ESTANQUIDAD, HERMETICIDAD Y RESISTENCIA.

La fosa séptica no debe presentar fugas después de 4 horas de haber sido llenada a su máxima capacidad.

4.3.5.1. Resistencia.

Las fosas sépticas prefabricadas deben soportar una carga vertical uniformemente distribuida. Su valor mínimo se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$P=2000*Sb$$

Donde:

2000: peso volumétrico del material en kg/m³

P: carga, en Kg

S: superficie horizontal, en m²

b: profundidad máxima de relleno medida verticalmente entre el terreno y la parte superior de la fosa según recomendación o especificación del fabricante, en m.

4.4. INSTALACIÓN DE FOSAS SÉPTICAS.**4.4.1. 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 4.2.

Tabla 4.2. Distancias mínimas recomendadas para la ubicación de una fosa séptica.

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

4.4.2. DISPOSITIVOS PREVIOS A LA FOSA SÉPTICA.

Es recomendable instalar un registro antes de la entrada a la fosa. En el caso de que el diseñador o fabricante considere necesaria la utilización de mamparas en la fosa séptica, se recomienda no exceder 3 compartimientos.

En el caso de que las aguas residuales provengan de sitios que descargan grasas en cantidad considerable, como es el caso de restaurantes, escuelas y hoteles entre otros, se recomienda instalar una trampa de grasas. En caso de que la fosa reciba sólo las aguas provenientes de inodoros, este elemento no será necesario.

Dadas las características de funcionamiento del sistema séptico, se recomienda evitar en lo posible las descargas de sustancias tóxicas o químicas que puedan afectar la actividad biológica.

4.4.3. EXCAVACIÓN.

La excavación para la instalación de la fosa séptica dependerá de las dimensiones de ésta; si el terreno es rocoso o presenta dificultad para que la fosa se apoye uniformemente, se recomienda tener una plantilla en el fondo de 0.10 m de espesor, compactada con pisón de mano o una plantilla de concreto pobre de 0.05 m de espesor.

4.4.4. TUBERÍAS.

El diámetro mínimo recomendable es de 0.10 m y la tubería que sirve de unión entre el dispositivo previo a la fosa séptica con la edificación y la salida de la fosa al último registro, deben **juntarse** adecuadamente.

4.4.5. REGISTRO DE INSPECCIÓN.

Se recomienda que el registro de inspección de la fosa séptica sea fácilmente removible sin el empleo de herramientas, así como evitar infiltraciones de agua freática y pluvial.

4.5. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.**4.5.1. INSPECCIÓN Y LIMPIEZA.**

Para garantizar el adecuado funcionamiento de la fosa séptica se recomienda realizar una inspección visual del contenido de la misma cuando menos cada seis meses, asimismo se limpie antes que se acumule demasiado material flotante que pudiera obstruir las tuberías de entrada o de salida y que los lodos acumulados en el fondo de la unidad sean retirados por lo menos cada doce meses.

4.5.2. MANTENIMIENTO.

Es muy importante darle el adecuado mantenimiento a las fosas sépticas, para mantenerlas operando a su capacidad y obtener el mejor rendimiento posible. Para ello se hacen las recomendaciones siguientes:

1. Para hacer la inspección o la limpieza, al abrir el registro se debe evitar respirar los gases del interior y esperar 30 minutos hasta tener la seguridad de que la fosa se ha ventilado adecuadamente, pues los gases que se acumulan en ella pueden causar explosiones o asfixia. Nunca se usen cerillos o antorchas para inspeccionarla.
2. La limpieza se realiza por medio de un cubo provisto de un mango largo, o por medio de un camión-tanque equipado con una bomba para extracción de lodos (en este caso se debe prever que la fosa esté ubicada en un lugar tal que se permita el acceso al camión-tanque). Es conveniente no extraer todos los lodos, sino dejar una pequeña cantidad (10% aproximadamente) que servirá de inóculo para las futuras aguas residuales.
3. No se lave ni desinfecte después de haber extraído los lodos. La adición de desinfectantes u otras sustancias químicas perjudican su funcionamiento, por lo que no se recomienda su empleo.
4. Los lodos extraídos sean rociados con cal para su manejo, transportación y ser dispuestos adecuadamente, (enterrar en zanjas de unos 0.60 m de profundidad).
5. La instalación para la disposición del efluente (zanjas de infiltración, filtros subterráneos de arena o pozos de absorción) se inspeccionen periódicamente, pues con el tiempo se irán depositando materias sólidas que tienden a obturar los huecos del material filtrante, con lo que el medio oxidante comenzará a trabajar mal y en ese caso habrá de cambiar el material filtrante o construir nuevas zanjas.
6. Las personas encargadas del mantenimiento y conservación de las fosas sépticas usen guantes, botas de hule y tapabocas.
7. Las fosas sépticas que se abandonen o clausuren, se rellenen con tierra o piedra.

4.6. OXIDACIÓN DEL AFLUENTE SÉPTICO.

La fosa séptica efectúa solamente un proceso preparatorio en la depuración de las aguas residuales domésticas, por lo tanto el efluente no posee las características físico-químicas ni microbiológicas adecuadas para ser descargado directamente a un cuerpo receptor. Por esta razón, es necesario proporcionar un tratamiento al efluente, con el propósito de disminuir los riesgos de contaminación y de perjuicio a la salud pública.

Las aguas del efluente no contienen oxígeno disuelto (condición que requiere la flora bacteriana anaeróbica para ejercer su acción desintegrante), pero si se favorece su contacto con el aire, el oxígeno se absorbe rápidamente permitiendo la oxidación de los sólidos disueltos, mejorando su calidad.

Las bacterias aerobias efectúan este nuevo proceso. La materia orgánica se mineraliza y en las aguas oxidadas es menos probable que perduren los gérmenes patógenos. Es por tanto recomendable, si se requiere aprovechar el proceso séptico, la oxidación del efluente.

5.1. DEFINICIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento y depuración de aguas residuales de tipo doméstico y de cierto tipo de agua residual industrial (agropecuaria y de alimentos). En general, su diseño se aplica al tratamiento de aguas residuales de pequeñas y medianas comunidades (no más de 5,000 habitantes), los cuales por lo general no poseen un sistema de alcantarillado.

5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES (lechos de plantas acuáticas).

En la literatura se consideran tres tipos de humedales:

1. Humedales Naturales.
2. Sistemas de Plantas Acuáticas.
3. Humedales Artificiales.

5.2.1. HUMEDALES NATURALES.

Estos humedales han existido desde la antigüedad, algunos ejemplos son las ciénegas y pantanos; se diferencian de los humedales artificiales por el tipo de vegetación que los habita (plantas emergentes, principalmente como la espadaña y los carrizos). La purificación del agua se lleva a cabo en las raíces y tallos, gracias al gran número de bacterias que ahí se desarrollan. Las condiciones de flujo casi inmóviles permiten la sedimentación de los sólidos, la adsorción / filtración de las plantas y las hojas que brindan protección contra el viento, luz solar y la temperatura. El porcentaje de remoción obtenido por estos humedales se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Porcentaje de remoción obtenido por humedales artificiales.

Contaminante	Porcentaje de remoción
DBO ₅	70-96
Sólidos suspendidos	60-90
Nitrógenos	40-90
Fósforos	Depende de la estación del año

Entre las principales desventajas de utilización de los humedales se encuentran la proliferación de mosquitos, bichos y malos olores; entre las ventajas se encuentran la preservación y el incremento de la vida en el ecosistema.

5.2.2. SISTEMAS DE PLANTAS ACUÁTICAS.

Son estanques poco profundos donde habitan plantas acuáticas sumergidas o flotantes, los más estudiados son los habitados por jacintos y lentejas de agua. Estos sistemas se basan en dos tipos de plantas dominantes, en el primero habitan las plantas flotantes que se distinguen por su habilidad de obtener el dióxido de carbono y oxígeno directamente de la atmósfera, recibiendo los nutrientes minerales del agua. El segundo tipo es constituido por plantas sumergidas que se caracterizan por obtener el oxígeno, dióxido de carbono y nutrientes minerales directamente del agua. Este tipo de plantas son fácilmente inhibidas por la turbiedad del agua ya que sus partes fotosintéticas se encuentran bajo el agua.

5.2.2.1. Sistemas de plantas flotantes

Los sistemas con plantas flotantes, principalmente jacintos de agua, se utilizan para mejorar la calidad del efluente mediante la oxidación, la característica principal de esta planta es que resulta un medio de soporte atractivo para las bacterias que se desarrollan en sus raíces, por otro lado, debido a su sensibilidad a las bajas temperaturas no sobrevive en condiciones de invierno. De aquí la necesidad de estudiar las características de la lenteja de agua que es poco sensible a la temperatura, pero con la desventaja de sus raíces, que por ser superficiales son sensibles al viento.

5.2.2.2. Sistemas de plantas sumergidas.

Estas plantas anclan sus raíces en los sedimentos del fondo, por lo que la fotosíntesis se realiza sólo dentro del agua, donde se favorecen las condiciones aerobias. La tendencia de reproducción de las plantas es escasa, y su relación con el entono es limitada, por lo que tienden a desaparecer o ser dañadas severamente en la presencia de algas.

5.2.3. HUMEDALES ARTIFICIALES.

La ventaja de un humedal artificial contra un humedal natural es que se pueden manipular, controlando algunos aspectos negativos encontrados en los humedales naturales. Entre las desventajas se encuentran las siguientes:

1. Limitaciones geográficas de las plantas, como son la introducción de nuevas especies.
2. Los humedales artificiales que descargan a la superficie requieren de 4 a 10 veces más área de terreno que un tratamiento convencional. Por otra parte, los sistemas de cero descarga (es decir, que todo el influente se trata en el sistema y/o que se distribuye, de tal forma que no existe un efluente) necesitan de 10 a 100 veces más área de terreno.
3. La cosecha de la planta es limitada por el alto contenido de humedad y la configuración del humedal.
4. Algunos tipos de humedales artificiales pueden ser fuente generadora de organismos e insectos que provocan enfermedades y malos olores si no son manejados apropiadamente.

Sin embargo como se menciona anteriormente, con ayuda de la ingeniería estos factores pueden ser controlados o eliminados sin afectar las condiciones ambientales, lo cual no puede hacerse en los humedales naturales, sin olvidar que pueden construirse en el lugar más conveniente. Además de ofrecer grandes flexibilidades para el diseño y opciones de manejo.

Para su estudio, los humedales artificiales se clasifican en dos tipos, esto dependiendo de la forma en que se distribuye el flujo.

5.2.3.1. Humedales Artificiales de Flujo Libre o Superficial (HAFL).

En estos sistemas el agua residual se encuentra sobre la grava o sobre el suelo, con una profundidad aproximada de 30 cm, se utilizan principalmente como pulimento de efluentes tratados, ya que sólo pueden soportar cantidades menores de carga orgánica en comparación con los sistemas de flujo subterráneo. Son eficientes cuando se trata de aguas residuales urbanas con pretratamiento, para aguas residuales de industrias agroalimentarias y para aguas de **escorrentía** no tóxicas y con un pH apropiado.

Cuando se emplean como tratamiento secundario o avanzado, los sistemas HAFL consisten en balsas o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera subterránea, plantas emergentes, y niveles de agua poco profundos (0.1 a 0.6 m).

En los sistemas HAFL el agua residual se alimenta de forma continua y el tratamiento se lleva a cabo durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente donde se atrapa la basura y crecen las bacterias, lo cual garantiza una velocidad de flujo baja, dando en los canales largos y estrechos un flujo del tipo pistón.

Los sistemas de flujo libre también se pueden diseñar con el objetivo de crear nuevos habitats para la fauna y flora o para mejorar las condiciones de humedales naturales cercanos. Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar habitats de cría para aves acuáticas.

5.2.3.2. Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo (HAFS).

Los sistemas de flujo subterráneo se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas, que se rellenan con material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava (figura 5.1.), con una pendiente del 1 al 3 % de la entrada con respecto a la salida. Éste método es útil, con ciertas mejoras, para aguas residuales urbanas. Las especies vegetales utilizadas son las mismas que en los de HAFL.

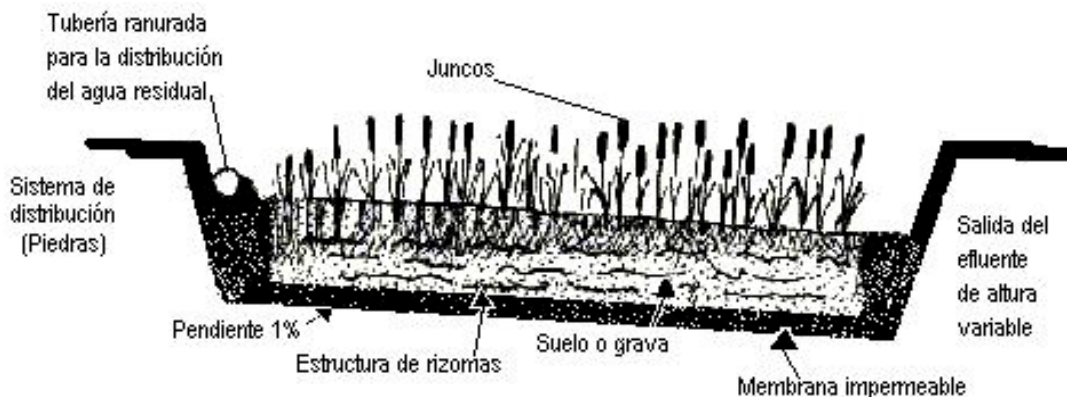


Figura 5.1. Sección transversal de un sistema de flujo subterráneo.

El tratamiento se lleva a cabo cuando el agua fluye a través de la grava sin rebasar la superficie, por los canales sobre un suelo relativamente impermeable cuya profundidad aproximada es de 60 cm, la porosidad del medio es un punto crítico para su diseño, ya que de esta dependerá el área, y por tanto el costo.

El concepto de HAFS tiene varias ventajas. Se cree que las reacciones biológicas en ambos tipos de humedales se deben al crecimiento de organismos, por tanto el lecho de grava tendrá mayores tasas de reacción y menor área requerida. Además como el nivel del agua se encuentra por debajo de la superficie del material granular se evita la exposición del agua residual, eliminando así posibles problemas de mosquitos que pueden llegar a presentarse en los sistemas de flujo libre en algunos lugares dependiendo de las condiciones climáticas, también se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica.

Es poco probable que un sistema HAFS sea competitivo desde el punto de vista económico, frente a uno HAFL para pequeñas comunidades y caudales, aunque el área sea menor pero esto siempre dependerá de los costos de la tierra, el tipo de impermeabilización que se requiera y el tipo y disponibilidad del material granular empleado.

Los humedales artificiales han sido utilizados para tratar aguas industriales, escorrentía de aguas agrícolas, de lluvias, lixiviados de vertederos, rebose de alcantarillados combinados, drenaje de minas y aguas residuales domésticas provenientes de tanques sépticos convencionales. A continuación se muestran una tabla comparativa sobre las características de los humedales de flujo libre y de flujo subterráneo.

Tabla 5.2. Comparación de las características entre los humedales de flujo libre y los humedales de flujo subterráneo.

Humedales Artificiales de Flujo Libre HAFL	Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo HAFS
Flujo libre del agua	Flujo subterráneo (oculto)
Flujo laminar libre sobre un lecho donde las plantas se sostienen con sus raíces	Flujo sumergido a través de un medio granular como soporte
Bajo costo de instalación	Más caros que los HAFL
Hidráulica sencilla	Hidráulica más complicada (flujo horizontal o vertical)
Tienen gran parecido a los humedales naturales	Necesitan poco espacio
No soportan las bajas temperaturas	Sin olores ni problemas de salud
Flujo pistón	Soportan bien las bajas temperaturas
	Flujo continuo

De lo anterior se deduce que los humedales de tipo HAFS (*flujo subterráneo*) son los más convenientes, es por esto que el presente trabajo se enfoca a ellos.

Los humedales de flujo subterráneo se dividen en sistemas de *flujo horizontal* y sistemas de *flujo vertical*. En lo sucesivo, se hará referencia a los Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo Horizontal con la abreviatura HAFH, y los Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo Vertical con la abreviatura HAFV.

5.2.3.2.1 Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo Horizontal (HAFH).

Se utilizan para el tratamiento de aguas residuales urbanas y de industrias agroalimentarias. **Este tipo de humedales es el centro del presente trabajo.**

5.2.3.2.2 Humedales Artificiales de flujo Subterráneo Vertical (HAFV).

Se utilizan para el tratamiento de aguas residuales urbanas, de industrias agroalimentarias y de explotaciones ganaderas. Si se eleva el pH del humedal, también puede ayudar al tratamiento de aguas residuales industriales.

5.2.4 Principales mecanismos depurativos en un humedal artificial.

En un humedal artificial la depuración del agua residual se lleva a cabo mediante varios mecanismos que dependen del tipo de contaminante a remover. En la tabla 5.3 se muestran los mecanismos necesarios para la remoción de los contaminantes y, para su mejor comprensión, se muestra esquemáticamente dichos mecanismos en la figura 5.2.

Tabla 5.3. Principales mecanismos depurativos en un humedal artificial (Hiley, 1995).

Contaminante	Mecanismo depurativo
Sólidos en suspensión	Sedimentación Filtración
Materia orgánica	Degradación microbiana aerobia (el oxígeno lo suministran las plantas) Degradación microbiana anaerobia
Compuestos nitrogenados	Amonificación, nitrificación y desnitrificación microbiana aerobia Fijación de las plantas Adsorción del lecho Volatilización del nitrógeno amoniacal
Compuestos fosfatados	Adsorción del lecho Fijación de las plantas
Metales pesados	Adsorción del lecho e intercambio catiónico Formación de compuestos quelados Precipitación Fijación de las plantas Óxido-reducción microbológica
Microorganismos no deseables	Sedimentación Filtración Muerte natural Depredación Irradiación por rayos UV Excreción de antibióticos por parte de las raíces

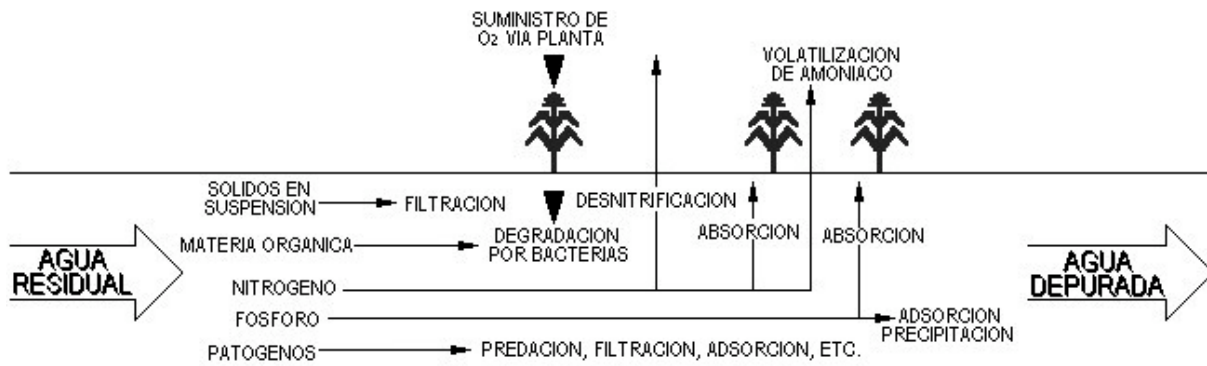


Figura 5.2. Mecanismos de depuración del agua residual en un humedal artificial.

5.3. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES.**5.3.1. AGUA**

Los humedales son básicamente una capa delgada de agua acumulada sobre una superficie de terreno con características permeables que evitan la filtración del agua al subsuelo. El agua es un factor muy importante en la construcción de los humedales, ya que es el medio donde se desarrollan todas las actividades necesarias para llevar a cabo la purificación de la misma. Su función principal dentro del sistema es ser portador de los nutrientes para las plantas. Cabe mencionar que una pequeña variación de este factor podría afectar seriamente las condiciones del humedal, a continuación se mencionan algunos de estos cambios:

- Un incremento en el flujo afecta la remoción de los contaminantes debido a que se tendría un mayor contenido de materia orgánica la cual demandaría una mayor cantidad de oxígeno.
- Por otro lado, una disminución del flujo disminuiría la cantidad de material orgánico, que es el alimento de las plantas, y por lo tanto estas morirían.
- El nivel del agua debe mantenerse constante para subsanar las pérdidas que ocasiona la *evapotranspiración* (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas).
- La temperatura de las aguas residuales es mayor comparada con la temperatura del agua de suministro, debido a la adición de calor que ejercen los usos de las labores domésticas. La temperatura tiene una gran importancia, ya que favorece la biodegradación de compuestos o materia orgánica contenida en el agua residual, influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes y el desarrollo de la vida. La temperatura no tiene efectos directos sobre la salud. No obstante cuando se encuentra alrededor de 40°C favorece el desarrollo de microorganismos e incrementa los problemas de sabor, olor, color y corrosión. Las reacciones biológicas que se presentan en el agua son favorecidas por la temperatura, actuando como un factor de control. Tomando en cuenta que el oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en la fría, es por ello que una temperatura elevada acaba con la vida aerobia.

5.3.2. ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA.

Al igual que en cualquier sistema, el diseño de las estructuras tanto de entrada como de salida es de gran importancia, debido a que una buena distribución del flujo en la entrada nos permitirá obtener un mejor tratamiento, por lo general las estructuras de entrada son simples tubos con orificios o "T's" a lo largo de ellos. Por otro lado la importancia en las estructuras de salida radica en el control del nivel de flujo, en la mayoría de los casos sólo consiste en colocar un codo a la salida del sistema.

5.3.3. SUBSTRATO

El sustrato se compone de suelo, arena, grava y roca que sirven como medio de soporte y superficie para que los microorganismos puedan reducir anaeróticamente (o **anóxicamente** si hay nitrato presente) los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono, metano y nuevos microorganismos. Otra de sus funciones es ser un filtro donde son retenidos los sólidos suspendidos y generador de sólidos microbianos, que son degradados y estabilizados en el fondo del humedal después de un periodo de tiempo (Wood, 1995). La acumulación de restos de vegetación incrementa la materia orgánica (la principal fuente de carbono). Cuando la concentración de los restos vegetales, sólidos suspendidos y microbianos aumenta, se dice que el sustrato está *saturado*.

Cuando un sustrato es saturado, es decir tiene exceso de carga orgánica el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

Al elegir el material que servirá como sustrato es importante considerar lo siguiente:

- *Capacidad de intercambio iónico* del sustrato, es una forma de medir la capacidad del sustrato a sostener positivamente los iones ganados, el valor recomendado debe ser mayor a 15 meq/100g de tierra.
- *pH* del sustrato, afecta la disponibilidad y retención de metales pesados y nutrientes, el valor debe encontrarse entre 6.5 y 8.5
- *Conductividad eléctrica* del sustrato, afecta la habilidad de las plantas y microbios para procesar la materia orgánica, el valor debe ser de un orden de 4 mohm/cm.
- *Porosidad* del sustrato, ya que gran parte del funcionamiento del tratamiento se basa en la digestión de la materia orgánica por las plantas y microorganismos, la porosidad del sustrato debe ser tal que permita la retención de los contaminantes y ser buen soporte de las raíces de las plantas.
- *Concentración del material orgánico* del efluente a tratar.

Tabla 5.4. Tipos de materiales más usuales en el sustrato de los humedales artificiales, su permeabilidad y su conductividad.

Tipo de material	Permeabilidad	Conductividad hidráulica (m³/m²s)
Caliza	Pobre	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²
Arena granular fina	Pobre	10 ⁻⁷ - 10 ⁻²
Arcilla	Regular	10 ⁻¹² - 10 ⁻⁹
Esquisto	Regular	10 ⁻¹³ - 10 ⁻⁹
Arenilla	Buena	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁴
Limo	Buena	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁵
Gravilla granular fina	Alta	10 ⁻³ - 1.0

Considerando los aspectos anteriores la literatura recomienda utilizar arena y grava con diámetros menores de 0.5 mm en la construcción de humedal, en caso del tratamiento de aguas residuales del tipo doméstico o agrícola, debido a que su textura permite colocar las plantas manualmente, proporcionan un buen soporte a las raíces y rizomas. Sin embargo, como el paso del efluente es rápido el soporte se seca también rápidamente, por lo que es necesaria una irrigación constante al inicio de la operación, hasta lograr un equilibrio y el soporte no se seque.

Cuando son requeridas las condiciones anóxicas para la eliminación de nitratos y amoniacos, se puede acondicionar el sistema agregando abono, aserrín, heno, desechos de pollo (excremento de pollo), etc. que favorecen al crecimiento de los microbios.

5.3.4. VEGETACIÓN

La vegetación es otro factor importante en la construcción de los humedales, este tipo de plantas están morfológica y anatómicamente adaptadas para crecer en *condiciones saturadas* (altas concentraciones de restos vegetales, sólidos suspendidos y microbianos). Las partes sumergidas de las plantas (raíces y rizomas) desprenden oxígeno creando pequeñas zonas oxigenadas favorables para la reproducción de los microorganismos aerobios, existen también las zonas anóxicas donde se desarrollan los microorganismos anaerobios, sin olvidar a los microorganismos facultativos que se desarrollan tanto en condiciones aerobias como anóxicas.

La selección del adecuado tipo de vegetación a implantar en un humedal artificial es fundamental para obtener rendimientos óptimos en el proceso de depuración, ya que este tratamiento se basa en gran parte en las funciones de las plantas dentro del humedal. Se deben considerar, entre otros, los siguientes factores condicionantes:

1. Tipo de humedal.
2. Temperatura.
3. Superficie del humedal (o humedales, si son varios).
4. Profundidad de la instalación.
5. Composición de los vertidos al humedal.
6. Evolución de los rizomas.
7. Necesidad o no de recolección periódica de la vegetación.
8. Tipo de sustrato.

Las funciones principales de las plantas dentro del humedal son:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Trasportar el oxígeno a las raíces. 2. Servir de soporte o medio para el desarrollo de los microorganismos. 3. Transferir gases entre la atmósfera y los sedimentos. 4. Absorber directamente algunos contaminantes como el carbono, nitrógeno, y potasio. 5. Permitir que se lleve a cabo la sedimentación de materiales suspendidos, provocando velocidades bajas. 6. Estabilizar la conductividad hidráulica del suelo donde son depositados metales pesados y fósforo principalmente. 7. Aumentar la biomasa al morir y se deteriore dando lugar a restos de vegetación. Mismos que se descomponen rápidamente en elementos minerales solubles o gaseosos (CO₂, NH₃), y posteriormente pasan por un proceso de <i>mineralización</i> o de <i>humificación</i>, obteniendo nutrientes que se consumen en horas o en días.

Hacer una clasificación por grupos es muy difícil, ya que hay muchas definiciones ambiguas y complejas al respecto. Por ello existen varios términos que se refirieren a las plantas que se desarrollan en el hábitat acuático-terrestre: hidrófitas, macrófitas acuáticas, hidrófitas vasculares, plantas acuáticas y plantas acuáticas vasculares.

La literatura clasifica a las plantas dependiendo del lugar donde se desarrolla dentro del humedal, bajo este criterio se clasifican en *flotantes*, *sumergidas* y *emergentes*. En la figura 5.3. se pueden apreciar algunas de estas especies y en la tabla 5.5. se observan los tipos de plantas empleadas y cultivadas en México.

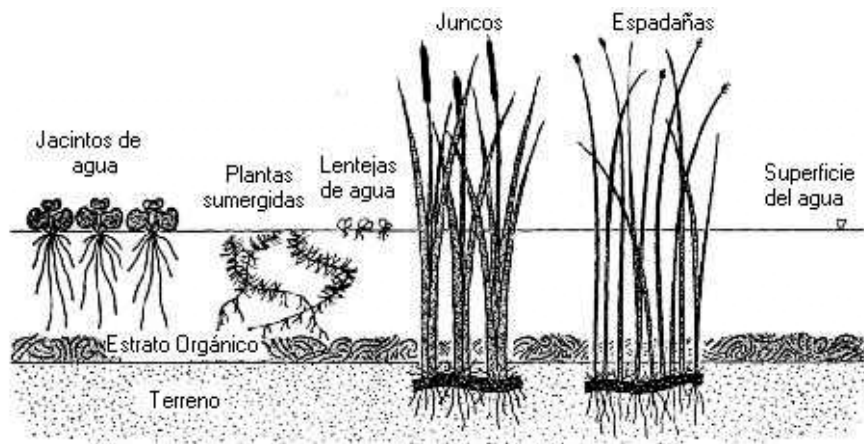


Figura 5.3. Clasificación de las plantas acuáticas.

Tabla 5.5. Especies empleadas en la construcción de humedales existentes en la flora de México.

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN EN MÉXICO	PRESENTE EN LA FLORA DE MÉXICO
Plantas flotantes		
Erchornia crassipes	Lirio o jacinto de agua	Sí
Spirkde, wolffia	Lenteja o lentejuela	Sí
Pistia, striatiotes	Lechuga, lechuguilla de agua o repollito de agua	Sí
Hidrocotyle ranunculoides	Piragüita de agua	Sí
Plantas emergentes		
Phragmites communis	Carrizo o carricillo	Sí
Typha	Tule, cola de gato	Sí
Juncos effuses	Junco	Sí
Scirpus lacustris	Junco enea.	Sí
Plantas sumergidas		
Hydrilla verticillata	Hidrilla	No
Najas flexis	Ninfa de los ríos	Sí
Ceratophyllum desersux	Cola de zorro	Sí

- *Plantas flotantes*. Toman el O₂ y CO₂ directamente de la atmósfera, viven sobre la superficie del agua como el lirio acuático (*eichornia crassipes*), lechuga de agua (*psitia stratiotes*) y chilicastle (*lemna*), sustraen los nutrientes directamente del agua, la profundidad varía de 0.5 a 1.8 m, utilizando este tipo de tratamiento se obtienen efluentes de mayor calidad comparados con los tratamientos realizados en lagunas de estabilización, en ocasiones es necesario dar aireación suplementaria.

Las plantas flotantes, a su vez se pueden clasificar en dos tipos de plantas:

1. *Plantas flotantes emergentes*. En este tipo de plantas sus raíces no están afianzadas al fondo, sino que permanecen flotantes bajo la superficie del agua.

2. *Plantas flotantes sumergidas*. Son plantas con hojas en rosetas, que se mantienen entre dos aguas, con órganos muy especializados que les permiten ejercer sus funciones totalmente ubicadas en el medio acuático.
- *Plantas emergentes*. Este tipo de planta tiene sus raíces afianzadas en la tierra y crecen por encima del nivel de la superficie del agua, y sus hojas, tallos (elementos que efectúan la fotosíntesis), y órganos reproductivos son aéreos. La mayoría de las plantas son herbáceas, pero también se incluyen dentro de esta clasificación las especies madereras. Cuando las semillas saturadas están presentes en agua estancada, todas las partes de la planta son aéreas. De entre todas las especies de humedal, las *emergentes* son quizá las más parecidas a las especies terrestres. Las plantas herbáceas *emergentes* habitan frecuentemente en aguas poco profundas como pantanos, a la orilla de los lagos o en la ribera de los arroyos, y dada su habilidad de interceptar la luz solar antes que las especies *flotantes* y *sumergidas* por su proximidad a la superficie del agua, son frecuentemente las especies dominantes.

Las *plantas emergentes* más frecuentes en los humedales son las espadañas, carrizos, juncos, y juncos de laguna, sus características les permiten ser tolerantes a grandes cargas de nutrientes, son fácilmente adaptables sin llegar a ser invasores. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos. También existen algunos sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales europeos. Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un incremento en los valores del hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, usualmente incluyen una gran variedad de plantas, especialmente para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuática.

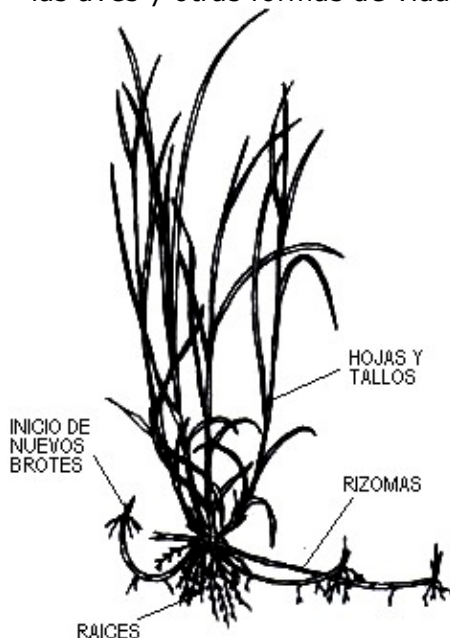


Figura 5.4. Esquema típico de una planta emergente.

No todas las especies emergentes son apropiadas para el tratamiento de aguas residuales, para serlo deben tener la capacidad de tolerar la exposición e inundación continua de aguas con concentraciones frecuentemente variables de contaminantes; por ejemplo, se usa frecuentemente la caña común por sus altas tolerancias para muchos tipos de contaminantes, aunque presenta algunas desventajas: la caña común es una especie altamente agresiva, que pueden eliminar otras especies una vez que se introduce, esto llega a ser un serio problema en el Noreste de México, y de hecho no se usa sin la aprobación de la agencia reguladora. La información sobre algunos de los requisitos ambientales de algunas de estas plantas se mencionan en la tabla 5.5.

- *Plantas sumergidas.* Con la posible excepción de las plantas con flores, las plantas sumergidas pasan su ciclo de vida entero bajo la superficie del agua y se distribuyen en costas, estuarios y depósitos de agua dulce. En las especies *sumergidas*, los tejidos están normalmente bajo el agua. El tronco tiende a tener tejidos suaves, al igual que sus hojas, que son alargadas o altamente divididas, lo que las hace lo suficientemente flexibles para resistir los movimientos propios del agua. Por lo general, la parte terminal de la planta no rebasa la superficie del agua, aunque las plantas pueden tenderse en posición horizontal por debajo de ésta. Estas plantas capturan el O₂ y CO₂ disuelto en el agua, e incluso muchas son capaces de usar el bicarbonato (HCO₃⁻) disuelto en la fotosíntesis. En su mayoría, sus raíces se encuentran en el *sustrato* (que es de donde obtienen sus principales nutrientes), aunque hay varias clases de raíces flotantes libres en la superficie de agua.

Tabla 5.6. Especies emergentes más comúnmente usadas en los humedales artificiales.

Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales						
Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	Carex sp. Eleocharis sp. Scirpus lacustris L.*	- - Junco de laguna	14-32 18-27		20	5-7.5 4-9
Gramíneas	Glyceria fluitans (L.) R. Br. Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel*	Hierba del maná Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	Iris pseudacorus L.	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	Juncus sp.	Juncos	16-26		20	5-7.5
Tifáceas	Thypha sp*	Eneas, aneas, espadañas	10-30	12-24	30	4-10

*Especies más utilizadas entre todas.

- *Plantas acuáticas.* Este tipo de plantas han sido consideradas por varios autores como una plaga, esto por su rápido crecimiento ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas y generan varios problemas. Sin embargo, si se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, su capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de otros compuestos del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales.

- *Plantas macrófitas acuáticas.* Las macrófitas usadas para el tratamiento de las aguas residuales deben contar con las siguientes características:
 - Fácil adaptación al medio y clima.
 - Tolerancia y capacidad de asimilación a las concentraciones de nutrientes.
 - Alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes.
 - Alta predominancia bajo condiciones naturales adversas.
 - Resistencia a los fumigantes y enfermedades.
 - Buena capacidad de oxigenación.
 - Raíces con penetración menor a 1 m de profundidad dentro del lecho soporte.
 - Fácil cosecha.

La función principal de las plantas es proporcionar oxígeno al sustrato, las plantas más frecuentes en la construcción de humedal de flujo subterráneo son plantas emergentes como las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna.

- Espadañas (*Typha*), es una planta robusta, capaz de crecer bajo condiciones severas, se propaga fácilmente, produce una gran biomasa anual y tiene un pequeño potencial en la remoción del fósforo si se cosecha adecuadamente, si se plantan a 1 m de intervalos de distancia se puede obtener una sobrepoblación en 3 meses. Sus dos principales desventajas son que se densa fácilmente y sus tubérculos son la comida favorita de los ratones.
- Juncos de laguna (*Scirpus*), es una planta perenne que crece en las costas y en pantanos salobres. Se desarrollan bien a profundidades de 5cm a 3m de profundidad, la temperatura ideal para su desarrollo es de 16 a 27 ° C y un pH de 4 – 9.
- Carrizos (*Phragmites*), planta perenne, de su especie la más alargada, son los más eficientes en la transferencia de oxígeno (mas que las espadañas) debido a la penetración de su raíz, y es ideal para la construcción de humedal.

Tabla 5.7. Capacidad de fijación de nitrógeno y fósforo en 3 de las especies más comunes de los humedales artificiales (kg/ha).

Especie	N	P
<i>Typha latifolia</i>	1,164	179
<i>Scirpus papyrus</i>	1,220	80
<i>Phragmites australis</i>	2,313	162

(Drizo y Frost, 1996).

5.3.5. MICROORGANISMOS

Los microorganismos juegan un papel muy importante en este tipo de sistemas, debido a que su metabolismo provoca la remoción del material orgánico transformándolo en compuestos nitrogenados, fósforo, metales pesados, metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno entre otros. El proceso que se lleva a cabo dentro de un humedal esta representado por la figura 5.5.

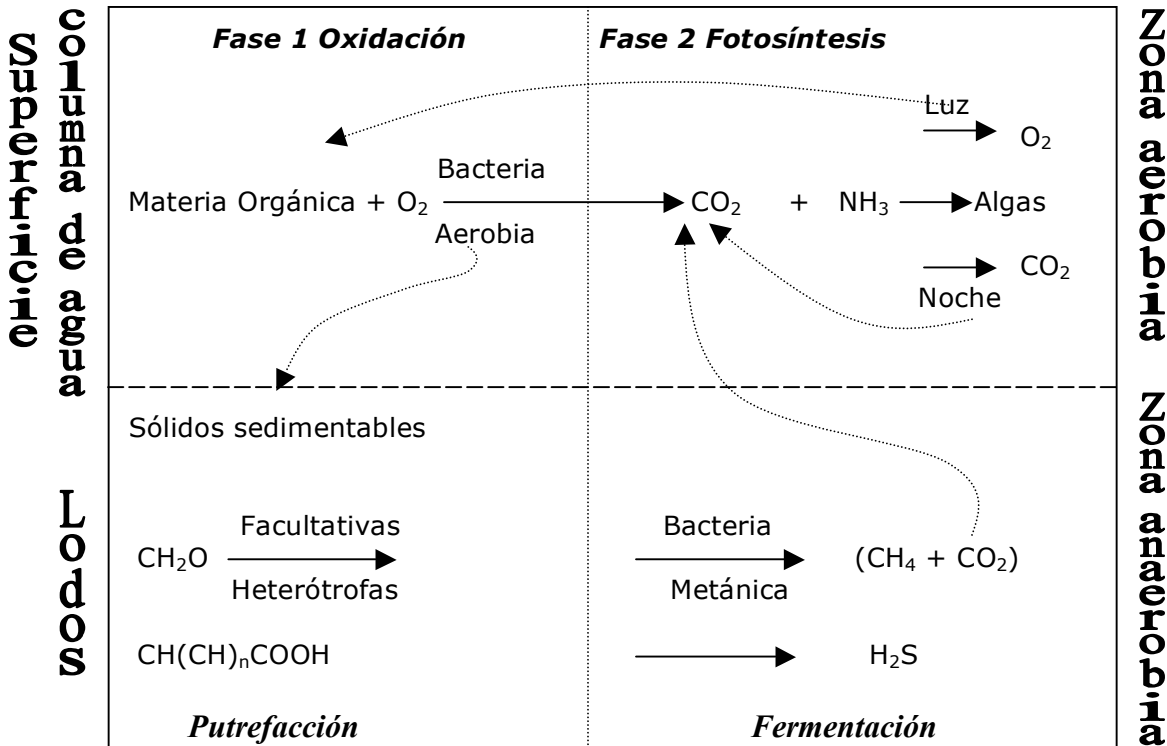


Figura 5.5. Proceso bioquímico llevado a cabo por los microorganismos en un humedal.

Las funciones principales de la biomasa microbiana dentro del humedal son:

1. Transformar sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias insolubles o inocuas.
2. Alterar las condiciones de oxido-reducción afectando la capacidad de tratamiento, lo cual involucra el reciclado de nutrientes. En la tabla 5.8 se hace mención de la clasificación de los microorganismos.

Tabla 5.8. Clasificación de los microorganismos por la fuente de energía y carbono en los humedales artificiales (Amstrong y Amstrong, 1990).

Clasificación		Fuente de energía	Fuente de carbono
Autótrofos	Fotoautótrofos	Luz solar	CO_2
	Quimioautótrofos	Reacciones orgánicas de óxido-reducción	CO_2
Heterótrofos	Fotoheterótrofos	Luz solar	Carbono orgánico
	Quimioheterótrofos	Reacciones inorgánicas de óxido-reducción	Carbono orgánico

5.3.6. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

Los principales contaminantes que son considerados en los tratamientos de agua residuales para su remoción son: *el nitrógeno, fósforo, organismos patógenos (bacterias, virus, protozoarios y helmintos), metales pesados (cadmio, cobre, cromo, mercurio, selenio y zinc) y trazas orgánicas (compuestos sintéticos altamente estables como los hidrocarburos clorados)*. En la tabla 5.9. se muestran resumidos los porcentajes de remoción obtenidos en los humedales.

Tabla 5.9. Porcentajes de remoción obtenidos en los humedales.

Contaminante	Daños	Proceso de remoción.	Porcentaje de remoción
Nitrógeno	Eutrofización	Nitrificación/desnitrificación	25 al 85
Fósforo	-	Adsorción, precipitación	28 al 57
Organismos patógenos	Enfermedades gastrointestinales	Sedimentación, muerte, excreción de antibióticos de las raíces	Coliformes fecales, 90 Coliformes totales del 93-99 durante el invierno y 66-98 durante el verano
Trazas orgánicas	-	Biológico, químico, fotoquímico, absorción, sedimentación, evaporación	No se han cuantificado
Metales pesados	-	Precipitación adsorción, fijación de las plantas (jacinto de agua)	97-99

5.4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL.

No existe un modelo específico que cumpla con las características necesarias para un determinado tratamiento de aguas, ya que son varios los factores a considerar, como carga orgánica del influente, tipo de agua a tratar, tipo de tratamiento, inclinación del terreno, corrientes aéreas, clima, temperatura, estación del año, calidad del efluente, y el destino que se le dará.

En general los humedales tratan de ser lo más naturales posibles con la finalidad de reducir al máximo las necesidades de mantenimiento. El diseño se realiza bajo condiciones extremas como tormentas, diluvios, sequías, evitando la sobre ingeniería para que sean lo más adaptables posibles al ambiente. La planificación se basa en la calidad y cantidad de agua residual a tratar considerando *el sitio de localización, la impermeabilización, vegetación y estructuras de entrada y salida*.

5.4.1. SITIO DE LOCALIZACIÓN.

El humedal debe diseñarse para aprovechar los recursos naturales de manera que se reduzcan los costos, la forma del humedal es determinada por la topografía, geología y disponibilidad de terreno, el número de células a construirse depende de la topografía, hidrología y calidad del influente, al seleccionar el lugar de ubicación se debe considerar el acceso, la disponibilidad, topografía, recursos ambientales y posibles daños que hay sus alrededores.

Un sitio para la construcción del humedal debe de cumplir con las siguientes características:

- Debe estar lo más cerca posible a la fuente de alimentación.
- Ser de fácil acceso.
- Estar ligeramente inclinado para que el agua fluya por gravedad.
- Ser un terreno bastante grande, previendo ampliaciones futuras.
- Ser fácilmente compactable para evitar infiltraciones (impermeabilización).
- Ser poco susceptibles a inundaciones.
- Estar lo más alejado posible a las comunidades.
- No contener especies en peligro de extinción.
- No contener recursos antropológicos o históricos.

5.4.2. IMPERMEABILIZACIÓN.

Una vez elegido el terreno se debe compactar hasta lograr que sea casi impermeable para colocar una capa de arcilla o grava (más de 40 mm de diámetro) o bien una combinación de ambas para evitar la contaminación de aguas subterráneas.

5.4.3. ZONA DE ENTRADA DEL INFLUENTE

Los humedales deben construirse utilizando técnicas e ingeniería que proporcionen confianza y seguridad, Los humedales se pueden construir excavando balsas o diques o bien una combinación de ambos, los diques deben ser estables e impenetrables, lo suficientemente profundos para evitar posibles derrames, con una inclinación que va desde 1 al 5 % de la entrada con respecto a la salida y contar con una salida de emergencia. Si se construyen varias celdas de tratamiento se debe asegurar que el flujo se distribuya de manera equivalente en todas las celdas, para ello se utilizan los controladores de flujo, los cuales deben ser fácilmente ajustables, simples y asegurar que sea flujo pistón. Las tuberías de PVC son muy recomendadas para la construcción.

Si la relación largo-ancho es pequeña (menos de 3:1), las entradas son estructuras en forma de "T" situadas a 33 cm o 66 cm sobre el substrato, si se utiliza piedra tosca (grandes y ásperas) se deberá situar a 8 – 16 cm, si se trata de varias células la tubería deberá contar con varios orificios paralelos o tubos "T", no se recomienda la utilización de válvulas porque son imprácticas.

Existen tres formas para distribuir el flujo de manera superficial:

- El primer diseño permite ajustar la distribución del flujo, quien facilita el mantenimiento, evita el taponamiento y problemas de presión además de oxigenar el agua. La distancia depende del índice de acumulación de lodos (2-3 cm/año) y del área disponible, se sugiere de 30 a 60 cm, las desventajas son los malos olores si el agua proviene de un tanque séptico y su sensibilidad o los climas fríos(Hammer 1980). Ver figura 5.6 (A).
- El segundo diseño consiste en almacenar el agua residual en un canal y dejar que fluya a través de una barrera formada por grava de mayor diámetro, lo cual permite la acumulación de lodos donde pueden ser fácilmente retirados sus desventajas son los malos olores, sensibilidad el frío y producción de los mosquitos (Hammer 1980). Ver figura 5.6. (B).
- El tercer diseño elimina problemas de olor y mosquitos, pero existe la posibilidad del taponamiento, que se pueden evitar con un desagüe que remueva los lodos depositados en la grava enviándolos a la salida. Ver figura 5.6. (C).

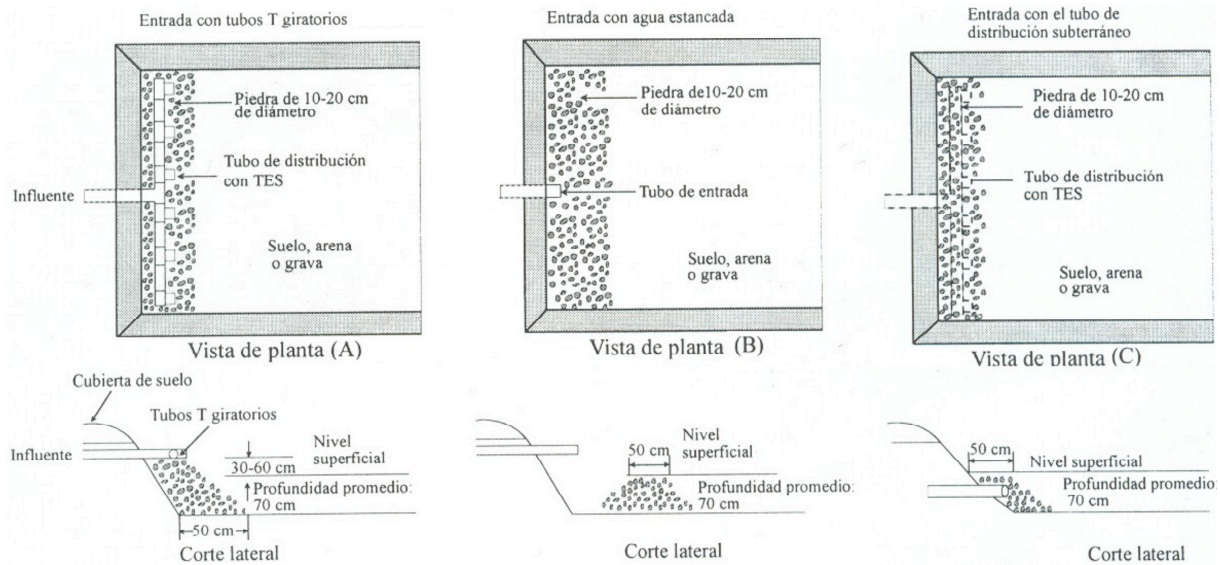


Figura 5.6. Diseño de entrada para la distribución uniforme del agua residual en el humedal de flujo subterráneo (Cooper 1987).

5.4.4. ZONA DE CAPTACIÓN DEL EFLUENTE.

Los sistemas de recolección del efluente se diseñan con tuberías perforadas colocadas dentro de gaviones, estas tuberías se conectan a registros donde se coloca un sistema para controlar el nivel del agua dentro de la celda, este puede ser un codo giratorio, una tubería conectada verticalmente, a una manguera flexible o algún otro dispositivo de control. Sin embargo colocarle una tubería giratoria a un sistema pequeño elevaría el costo de construcción, para este tipo de sistemas es más recomendable utilizar una tubería de PVC flexible, sujetándola con una cuerda o cadena para mantenerla en una posición adecuada, manteniendo así el nivel del agua por debajo de 5 cm de la superficie del lecho, para tener la posibilidad de subir el nivel del agua hasta 20 cm por encima de la superficie, o bajarlo hasta el fondo.

El nivel del agua se puede controlar de tres formas:

1. Un método muy simple es el empleo de un codo de 90° al final de la tubería, esto nos permite que esta parte sea levantada o bajada dependiendo de las necesidades del sistema, es decir se puede colocar en forma vertical u horizontal.
2. La tubería vertical puede diseñarse de varios tramos removibles.
3. Se puede colocar una pieza de tubería flexible sujeta al marco del a tapa del registro.

A continuación se pueden observar detalladamente los tres diferentes diseños para la zona de captación.

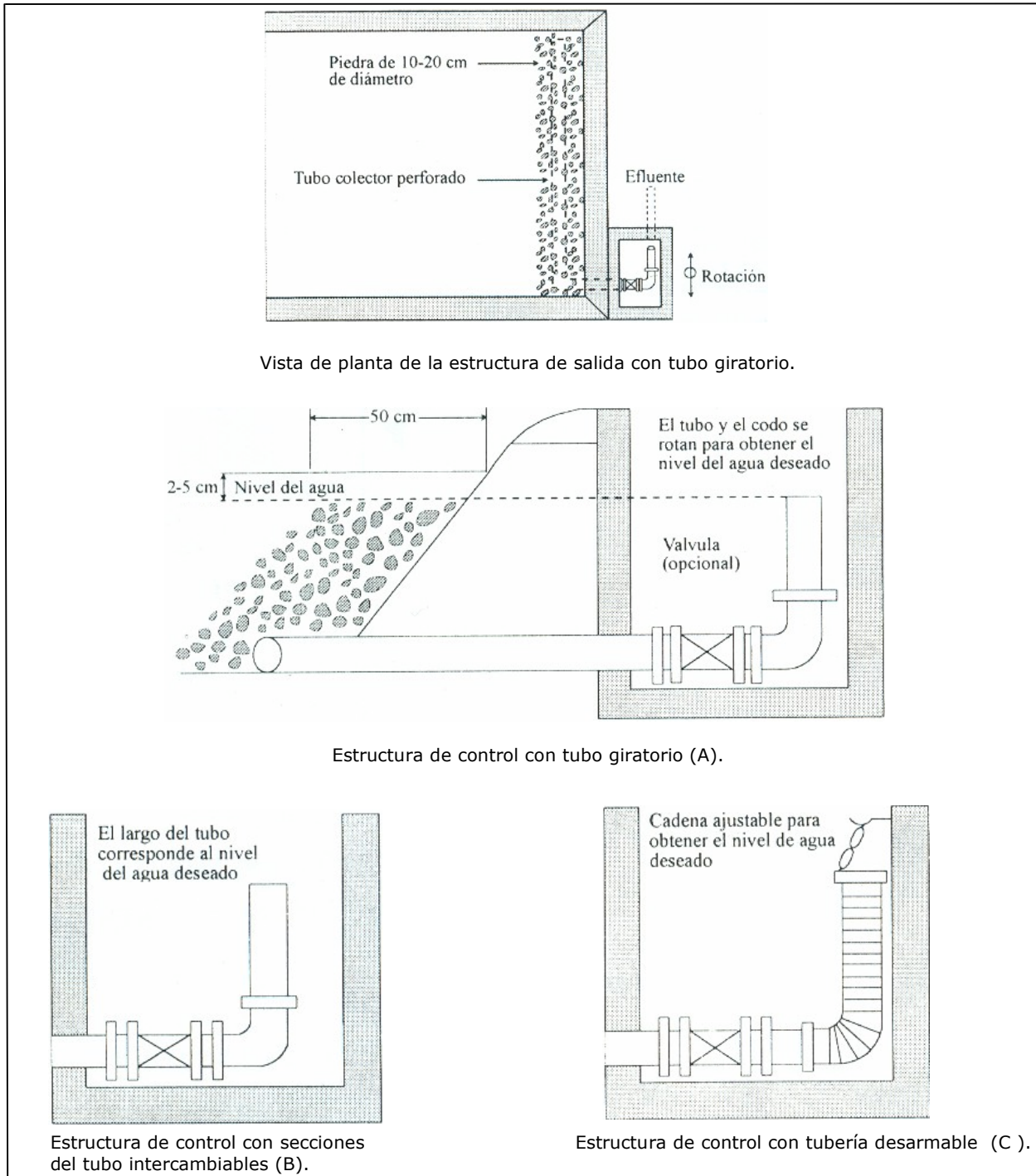


Figura 5.7. Diseños de las estructuras de salida o captación para controlar el nivel del agua en un humedal de flujo subterráneo.

5.4.5. OPERACIÓN, CONTROL Y MANTENIMIENTO.

Al establecer un plan de mantenimiento se deben de tomar en cuenta las siguientes características:

1. Proporcionar la mayor área de contacto entre la comunidad microbiana, y los sedimentos.
2. Asegurar que el flujo se distribuya a todas las partes del humedal.
3. Mantener las condiciones saludables del ambiente para propiciar el desarrollo de los microorganismos y la vegetación.

Los humedales son muy flexibles en cuanto a su operación, las actividades típicas de operación control y mantenimiento son las siguientes (Moshiri, 1993):

5.4.5.1. SEMBRADO.

Estos sistemas dependen de la conductividad hidráulica del sustrato y necesitan un manejo especial que evite la compactación cuando se realiza la plantación, si se utiliza grava o arena como medio debe de lavarse antes de colocarla, debe de llenarse el lecho con agua limpia antes de colocar las plantas, es necesario mantener una capa de 10 cm de abono en la superficie por lo menos al inicio del sistema, posteriormente las plantas obtienen los nutrientes necesarios del agua residual (Moshiri, 1993). Es recomendable utilizar semillas debido a que se distribuyen de manera uniforme y rápida, pero requieren mayores cuidados para su desarrollo, se debe plantar cuatro semillas por m² (Moshiri, 1993), Además se recomienda tener sembradíos mixtos para evitar la densidad y con ello las enfermedades, las comunidades mixtas ofrecen mas capacidad de filtración y mayor estabilidad. Se recomienda sembrar dos plantas en un ángulo de 45° a intervalos de 0.3 a 1m, la mejor estación para sembrar es el otoño, cuando las plantas logran una altura de 10 a 12 cm ya se puede inundar el humedal.

5.4.5.2. LIMPIEZA EXTERNA DEL SISTEMA.

Se debe realizar una remoción periódica de los sedimentos además de agregar grava nueva y biomasa (Moshiri, 1993), el índice de acumulación es de 1.5 – 2.5 cm por año, este sedimento disminuye la capacidad del sistema al inhibir el crecimiento de las plantas, para mejorar la eficiencia del sistema se puede recultivar el lecho o hacer fluir el agua limpia para remover contaminantes (Mc Eledowey, 1993).

También se pueden agregar algunas hierbas* que retardan el crecimiento de las plantas. La mejor solución es inundar el sistema, por lo que se recomienda situar la estructura de salida a una altura que permita elevar el nivel del agua a 20 cm por arriba de la superficie y se baje hasta el fondo del lecho (Hammer, 1989).

5.4.5.3. MANEJO DEL NIVEL DEL AGUA.

Se debe contar con un adecuado control para nivelar el agua, comúnmente se comete el error de creer que la planta que se desarrolla en ambientes húmedos soportará la inundación, un exceso de agua evita la oxigenación adecuada a las plantas en su primera estación de vida. Las plantas emergentes deben plantarse en un sustrato húmedo pero no inundado.

* Se entiende por *hierbas* como plantas pequeñas con tallo tierno de vida corta, no confundir con las plantas seleccionadas para el humedal

Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (grava) se recomienda que el nivel normal del agua se mantenga de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho.

5.4.5.4. CONTROL DE MOSQUITOS.

El problema de la generación de mosquitos se debe a la gran cantidad de carga orgánica y poca vegetación, este problema se presenta durante los dos primeros años y es posible controlarlo mediante los siguientes mecanismos:

- Control ecológico con la introducción de peces anfibios.
- Aireación del humedal.
- Cosecha programada.

La cosecha es la extracción de las plantas, las hidrófitas flotantes crecen de manera proporcional a la temperatura, por lo que se pueden cosechar cada 6 o 12 días, las plantas emergentes crecen más lentamente.

5.4.5.5. CONTROL DE OLORES.

El problema del mal olor es difícil controlarlo, sin embargo cabe recordar que en los humedales de flujo subterráneo el olor es menor, esta es una ventaja de estos sistemas en comparación con otros sistemas convencionales.

5.4.6. CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD.

La situación actual del mundo es la siguiente; por un lado las áreas de terreno donde puede crecer la flora disminuye cada vez más afectando al ambiente y por otro lado la cantidad de aguas residuales aumenta de acuerdo al crecimiento poblacional, que como es sabido crece constantemente. De ahí la necesidad de utilizar a los humedales para el tratamiento de aguas residuales, cuyos objetivos principales son:

- Mejorar la salud pública disminuyendo las fuentes de contaminación, y
- Proteger el ambiente.

Objetivos que son cumplidos, por lo que se vio anteriormente.

5.4.7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Las principales ventajas y desventajas del uso de humedales artificiales como proceso de purificación de aguas residuales, se presentan en la siguiente tabla 5.10.

Tabla 5.10. Ventajas y desventajas de los humedales para el tratamiento de aguas residuales.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.	Requiere de grandes extensiones de terreno
Bajo requerimiento de energía	Baja eficiencia durante el invierno
No requiere personal altamente capacitado para su operación, control y mantenimiento	Se requieren de 2-3 periodos de crecimiento de las plantas antes de obtener resultados
Se obtiene buena calidad del efluente	Acumulación de sedimentos en la entrada si no son operados correctamente
Ayuda al ambiente	Requieren ser cosechados frecuentemente
No generan lodos, que se mineralizan totalmente	Proliferación de mosquitos, bichos y malos olores
Son flexibles, se adaptan a los cambios en caudales y carga del influente	Pérdidas de caudal por evapotranspiración, elevando la salinidad del efluente

6.1. MODELOS DE DISEÑO.

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 se pueden considerar 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. Reed, "Natural Systems for Waste Management and Treatment".

Citando la ecuación básica para los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad \text{Ecuación 1.}$$

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 reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d-1

t: Tiempo de retención hidráulica, d

El tiempo de retención hidráulica dentro del humedal puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad \text{Ecuación 2.}$$

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.

n: Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La vegetación y los residuos ocupan algún espacio en los humedales tipo *flujo libre superficial* (FWS), y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los del tipo *flujo subterráneo horizontal* (SFS). La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: Caudal medio a través del humedal, m³/d

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \quad \text{Ecuación 3.}$$

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. Y partiendo de este supuesto es posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = LW = \frac{Q \cdot \ln(Co / Ce)}{K_T \cdot yn} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, m²

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, el contaminante que requiera mayor área será el factor limitante y por tanto controlara la estructura de los humedales.

Una vez conocida el área utilizando las ecuaciones térmicas se calcula la temperatura teórica del humedal, en este paso si la temperatura no coincide con la temperatura propuesta inicialmente se deberán hacer las iteraciones necesarias hasta que las dos converjan.

Como último paso se hacen los cálculos hidráulicos correspondientes para determinar la forma final (relación largo-ancho), además de la velocidad de flujo, de igual forma si estos valores no coinciden deberán realizarse las iteraciones necesarias.

6.1.1. DISEÑO HIDRÁULICO.

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento, es decir condiciones ideales. El flujo en los humedales debe superar la resistencia que imponen la vegetación, el medio de soporte, las raíces y las capas de los sedimentos, la mejor forma de solucionarlo es dando una inclinación adecuada y asegurando una salida de altura variable.

Las relaciones largo-ancho 10:1 o mayores aseguran un flujo pistón, pero se desbordan en la parte alta debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas flujo libre superficial. Por tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de celdas, y con la intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

La ley de Darcy describe un régimen de flujo pistón en un medio poroso que es o generalmente aceptado para el diseño de humedales tipo flujo subterráneo horizontal, usando suelo y arena como medio del lecho, supone condiciones laminares, constantes y uniformes. Ideal si el sistema esta diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y si las pérdidas y ganancias del sistema están adecuadamente reconocidas, esta ecuación puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal de flujo subterráneo horizontal.

$v = k_s \cdot s$, y dado que $v = \frac{Q}{Wy}$, entonces:

$$Q = k_s A_c s \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

Q: Caudal promedio a través del humedal, m³/d [(Qo+Qe)/2]

k_s: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/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

v: Velocidad de "Darcy", la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable el ancho máximo de una celda de humedal de flujo subterráneo horizontal que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{(m)(y)}{L} \quad L = \frac{A_s}{W} \quad A_c = (W)(y)$$

Donde:

W: Ancho de una celda del humedal, m

A_s: Área superficial del humedal, m²

L: Longitud de la celda de humedal, m

m: Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

y: Profundidad del agua en el humedal, m

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 6.}$$

La ecuación (6) permite calcular directamente el ancho máximo absoluto aceptable de una celda de humedal, compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Otras combinaciones de ancho-gradiente hidráulico pueden ser posibles a fin de ajustar el diseño a las condiciones topográficas existentes en el sitio propuesto. El valor de m en la ecuación (6) se encuentra entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial. No se recomienda seleccionar la pérdida máxima de carga disponible. Es recomendable tomar un valor de la conductividad hidráulica efectiva $k_s \leq 1/3$ y que m no sea mayor del 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento del diseño.

También existe otra alternativa para el cálculo propuesta por Cooper (1990), la cual se basa en la ecuación de Darcy. El área se determina con la pendiente del fondo de la celda por medio de la expresión:

$$A_c = \frac{Q}{(m)(k_s)} \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde:

A_c: Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m²

Q: Caudal medio a través del humedal, m³/d

m: Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

k_s: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d.

De donde:

$$A_C = (W)(y) \quad W = \frac{Q}{(m)(k_s)(y)} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Las ecuaciones (5) y (6) son válidas cuando el número de Reynolds obtenido es menor a 10. El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación (9). En muchos casos N_R será *mucho menor* de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{(v)(D)}{\tau} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

N_R : Numero de Reynolds, adimensional

v: Velocidad de Darcy (de la ecuación (5)), m/s

D: Diámetro de los vacíos del medio, tomarlo igual al tamaño promedio del medio, m

τ : Viscosidad cinemática del agua, m^2/s (ver tabla 6.1.)

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (5) y (6) varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{k_{ST}}{k_{d20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

k_s : Conductividad hidráulica a una temperatura T y 20°C.

μ : Viscosidad del agua a 20°C y a una temperatura T (ver tabla 6.1.)

Los efectos de la viscosidad pueden ser significativos en climas fríos, con humedales de flujo subterráneo horizontal operando durante los meses de invierno. Por ejemplo, la conductividad hidráulica del agua a una temperatura de 5°C podría ser el 66% de una que se encuentra a 20°C. Este efecto ya esta considerado en la recomendación previa del factor de seguridad (diseñar con $k_{s \leq 1/3}$ del k_s efectivo).

Tabla 6.1. Propiedades físicas del agua.

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica X10³ (N*s/m²)	Viscosidad cinemática X10⁶ (m²/s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) también varía con el número y tamaño de espacios vacíos en el medio usado para el humedal. La tabla 6.2. presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal de flujo subterráneo horizontal. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en laboratorio antes del diseño final.

Tabla 6.2. Características típicas de los medios para humedales de flujo subterráneo horizontal.

Tipo de material	Tamaño efectivo D₁₀ (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s (m³/m²/d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1,000
Arena gravosa	8	30-35	500-5,000
Grava fina	16	35-38	1,000-10,000
Grava media	32	36-40	10,000-50,000
Roca gruesa	128	38-45	50,000-250,000

Es aconsejable que la porosidad (n) del medio también se mida en el laboratorio antes de hacer el diseño final. Esta puede ser medida usando el procedimiento estándar de la ASTM. Valores de porosidad para estos tipos de suelo y grava están publicados en muchas referencias, pero pueden ser mucho menores que los de la tabla 6.2. ya que pueden estar dados para depósitos naturales de suelo y grava que han pasado por un proceso de consolidación natural y, por tanto, esos valores no son los apropiados para el diseño de un humedal tipo flujo subterráneo horizontal. Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun, para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas:

$$k_s = n^{3.7}$$

Esta ecuación, así como los valores de la tabla 6.2. son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal de flujo subterráneo horizontal debe basarse en mediciones reales de los parámetros, *conductividad hidráulica y porosidad*.

La recomendación de limitar el gradiente hidráulico a menos del 20% de la pérdida de carga disponible es el efecto parcial de limitar la relación de forma del sistema a valores relativamente bajos ($\leq 3:1$ para lechos de 0.6 m de profundidad, $\leq 0.75:1$ para lechos de 0.3 m de profundidad). En Europa, se han construido sistemas SFS usando suelo en lugar de grava, con pendientes del 8% para asegurar un adecuado gradiente hidráulico y continúan experimentando flujo superficial causado por un inadecuado factor de seguridad en el diseño.

6.1.2. ASPECTOS TÉRMICOS.

La temperatura es un factor importante ya que afectan las actividades que se llevan a cabo dentro del humedal, las bajas temperaturas pueden provocar la falla del sistema reduciendo la eficiencia de remoción de DBO, nitrificación, desnitrificación; la causa se debe a la combinación de temperaturas en las reacciones biológicas y la falta de oxígeno cuando hay formación de hielo. A continuación se presentan las técnicas para calcular la temperatura de los humedales tipo flujo subterráneo horizontal, es un modelo simplificado que solo considera las pérdidas por conducción a la atmósfera (modelo conservador).

La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal viene dada por:

$$q_G = (c_p)(\delta)(A_s)(y)(n) \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

q_G : Energía ganada por el agua, J/°C

c_p : Capacidad de calor específico del agua, J/kg*°C

δ : Densidad del agua, kg/m³

A_s : Área superficial del humedal, m²

y : Profundidad del agua en el humedal, m

n : Porosidad del humedal (espacio disponible para el flujo del agua, el resto está ocupado por el medio, en la tabla 6.2. se muestran los valores típicos).

El calor perdido por el humedal de flujo subterráneo horizontal entero puede ser definido por la ecuación (12):

$$q_L = (T_0 - T_a)(U)(\sigma)(A_S)(t) \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde:

- q_L: Energía perdida vía conducción a la atmósfera, J
- T₀: Temperatura del agua que entra al humedal, °C
- T_a: Temperatura promedio del aire durante el periodo considerado
- U: Coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m²
- σ: Factor de conversión, 86400 s/d
- A_S: Área superficial del humedal, m²
- t: Tiempo de residencia hidráulica en el humedal, d

El valor de T_a de la ecuación (12) se obtendrá en los registros locales de meteorología, o de la estación meteorológica más cercana al sitio propuesto. El año con un invierno mas frío durante los pasados 20 o 30 años de medición será el seleccionado como "año de diseño" para efectos de cálculo. Es aconsejable usar una temperatura del aire promedio, para un periodo de tiempo igual al tiempo de retención hidráulica del humedal.

El cálculo del valor del coeficiente de transferencia de calor (U) para la ecuación (12) viene dado por:

$$U = \frac{1}{\left[\frac{y_1}{k_1} \right] + \left[\frac{y_2}{k_2} \right] + \left[\frac{y_3}{k_3} \right] + \left[\frac{y_4}{k_4} \right]} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde:

- k_(1-n): Conductividad de las capas 1 a n, W/m* °C
- Y_(1-n): Espesor de las capas 1 a n, m

La tabla 6.3. presenta los valores de conductividad para materiales que están presentes típicamente en un humedal de flujo subterráneo horizontal.

Tabla 6.3. Conductividad térmica de los componentes de un humedal de flujo subterráneo horizontal.

Material	K (W/m°C)
Aire (sin convección)	0.024
Nieve (nueva o suelta)	0.08
Nieve (de largo tiempo)	0.23
Hielo (a 0 °C)	2.21
Agua (a 0 °C)	0.58
Capa de residuos del humedal	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.5
Grava saturada	2.0
Suelo seco	0.8

Los valores de conductividad de todos los materiales, excepto el de la capa con restos de vegetación del humedal, han sido bien establecidos y pueden encontrarse en la literatura. El valor para esta capa de restos de vegetación se cree conservador, pero es menor que el que se estableció y debe ser usado con cautela hasta que esté disponible una futura verificación.

El cambio de temperatura T_c proveniente de las pérdidas y ganancias definidas por las ecuaciones (9) y (10) puede ser encontrando combinándolas:

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde:

T_c : Cambio de temperatura en el humedal, °C. Entonces la temperatura del efluente será:

$$T_e = T_0 - T_c \quad \text{Ecuación 15.}$$

La temperatura promedio del agua T_w en el humedal de flujo subterráneo horizontal será:

$$T_w = \frac{T_0 + T_e}{2} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Esta temperatura se compara con el valor asumido, cuando el tamaño y el tiempo de retención hidráulica del humedal se calcularon para cualquiera de los modelos de remoción, ya sea DBO o nitrógeno. Si estas dos temperaturas no están cercanas, se realizan nuevas iteraciones en los cálculos hasta que converjan.

6.1.3. MODELOS PARA LA REMOCIÓN DE LA DBO.

Considerando al humedal como un reactor biológico se tiene la siguiente ecuación para calcular la DBO:

$$\frac{C_e}{C_o} = A \cdot \exp \left[- \frac{0.7(K_T)(A_v)^{1.75}(L)(W)(y)(n)}{Q} \right]^2 \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde:

C_e : Concentración de DBO en el efluente, mg/l

C_o : Concentración de DBO en el influente, mg/l

A : Fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema, es una variable que depende de la calidad del agua (es una fracción decimal)

K_T : Constante de primer orden dependiente de la temperatura, d-1

A_v : Área superficial disponible para la actividad microbiana, m²/m³

L : Longitud del sistema (paralelo al flujo), m

W : Ancho del sistema, m

y : Profundidad promedio del sistema, m

n : Porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

Q : Caudal promedio en el sistema, m³/d

Dadas las dificultades para estimar A y Av se ha hecho otra aproximación:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad \text{Ecuación 18.}$$

$$K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 19.}$$

$$K_{20}: 1.104 \text{ d}^{-1} \text{ (USEPA, 1993)} \quad \text{Ecuación 20.}$$

Las ecuaciones presentadas para el cálculo de humedales de flujo horizontal, para la eliminación de la DBO₅, también tienen validez para el flujo superficial, pero se debe hacer un ajuste en la constante cinética, que será de K₂₀ = 0.678 d⁻¹ para ese tipo de humedales.

El área superficial del humedal se determinaría por la ecuación (21):

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T(y)(n)} \quad \text{Ecuación 21.}$$

Donde:

K_T: Constante de temperatura proveniente de las ecuaciones (17) y (18), d⁻¹

y: Profundidad de diseño del sistema, m

n: "Porosidad" del humedal, 0.65 a 0.75

Las ecuaciones 16 y 19 no pueden ser utilizadas cuando se requiere que la DBO del efluente sea menor a 5 mg/l.

Para humedales del tipo flujo subterráneo horizontal, la porosidad varía con el tipo de relleno usado, de acuerdo con la tabla 6.2. y puede ser medida con los procedimientos ya estipulados. La profundidad típica es de 0.6 m del medio seleccionado, algunas veces, se le coloca encima una capa de grava fina de 76 a 150 mm de espesor, que sirve para el enraizamiento inicial de la vegetación y se mantiene seca en condiciones normales de operación. Si se selecciona una grava relativamente pequeña, <20mm para la capa principal donde se realizara el tratamiento, la capa fina superior probablemente no será necesaria, pero entonces, la profundidad total deberá incrementarse ligeramente para asegurar que se tenga una zona seca en la parte superior del lecho. La contribución al tratamiento de la presencia de las raíces y rizomas en el lecho del humedal se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.4. Comparación del rendimiento de los humedales de Santee (California, EE.UU.) con y sin vegetación.

Condiciones del lecho*	Penetración de las raíces (cm)	Calidad del efluente (mg/l)		
		DBO	SST	NH ₃
Scirpus	76	5.3	3.7	1.5
Phragmites	>60	22.3	7.9	5.4
Typha	30	30.4	5.5	17.7
Sin vegetación	0	36.4	5.6	22.1

*Q = 3.04 m³/d, TRH = 6 d, dimensiones del lecho, L = 18.5 m, W = 3.5 m, y = 0.76 m, el agua es agua residual primaria, DBO = 118 mg/l, SST = 57 mg/l, NH₃=25 mg/l

Esta tabla demuestra que el rendimiento en la remoción de DBO y nitrógeno amoniacal está directamente relacionado con la profundidad de penetración de las raíces. Esta profundidad de penetración se considera el límite potencial de máximo crecimiento, por lo que la profundidad es un poco más que la capacidad máxima del crecimiento de las raíces dependiendo de la vegetación.

6.1.4. MODELOS PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.

La remoción de sólidos suspendidos totales (SST) se debe a procesos físicos y que dependen de la temperatura a través de la viscosidad del agua. Dado que la distancia de sedimentación para la materia particulada es relativamente pequeña y que el tiempo de residencia del agua en el humedal es muy largo, estos efectos de la viscosidad pueden omitirse. La remoción de SST en este tipo de sistemas no es un parámetro limitante en el diseño y dimensionamiento del humedal, ya que la remoción de SST es muy rápida en comparación con la de DBO o nitrógeno.

Muchos de los sólidos en aguas residuales domésticas municipales, e incluso muchas industriales, son de naturaleza orgánica y pueden ser descompuestos en un periodo de tiempo muy largo, dejando un mínimo de residuos. Un tratamiento primario similar al requerido para la DBO, dará un nivel aceptable para este tipo de aguas residuales. La consecuente descomposición de los sólidos que quedan y que, por tanto, pasan al humedal, puede dejar un mínimo de residuos que resultará en un atascamiento muy pequeño.

Al igual que la DBO, la remoción de SST esta influida por la producción de materiales orgánicos residuales que pueden aparecer en el efluente final como SST, por tanto, no se debe esperar encontrar menos de 5 mg/l a la salida.

Una regresión lineal de datos obtenidos en humedales de Estados Unidos, proporciona unas ecuaciones que pueden servir para estimar la concentración de SST a la salida del humedal. Estas ecuaciones sirven solamente para realizar la estimación del orden de magnitud de la descarga, pero no como parámetro de diseño, ya que hemos visto que los SST no son un factor limitante en éste.

También debe tenerse en cuenta que estas ecuaciones son aplicables en las condiciones que se obtuvieron, es decir, son válidas para cargas hidráulicas de entre 0.4 y 0.75 cm, ya que valores por encima o por debajo pueden dar resultados incorrectos.

Para humedales de flujo subterráneo horizontal:

$$C_e = C_0(0.1058 + 0.0014(CH)) \quad \text{Ecuación 22.}$$

Donde:

C_e : SST en el efluente, mg/l
 C_0 : SST en el influente, mg/l
CH: Carga hidráulica, cm/d

6.1.5. MODELOS PARA LA REMOCIÓN DEL NITRÓGENO.

El diseño para remoción de nitrógeno, es un procedimiento complicado, porque el nitrógeno puede estar presente en una variedad de formas y requiere una serie de condiciones químicas y ambientales para su remoción. El *nitrógeno amoniacal* es la forma del nitrógeno mas frecuentemente regulada en efluente, ya que el amoniaco no ionizado puede ser tóxico para los peces en pequeñas concentraciones y la oxidación del amoniaco en el cauce receptor puede reducir el nivel de oxígeno disuelto.

La remoción de nitrógeno es usualmente el parámetro de diseño limitante cuando se tienen límites estrictos de vertido, tanto de nitrógeno amoniacal como del nitrógeno total. Cuando el diseño del sistema requiere la remoción de nitrógeno, es aconsejable asumir que todo el nitrógeno Kjeldahl (NTK) que entra al sistema se convierte en amoniaco. Una pequeña fracción del nitrógeno orgánico entrante queda permanentemente fijado al bentos, pero éste podría ser omitido para un diseño más conservador. Durante el primer o segundo año de operación la remoción de nitrógeno puede exceder las expectativas. Esto se debe a que la adsorción del suelo y la asimilación por parte de las plantas genera un rápido crecimiento de la cubierta vegetal. Cerca del final del segundo periodo de crecimiento el ecosistema puede estar aproximándose al equilibrio y la remoción de amoniaco se estabilizará. El reactor tienen las condiciones para realizar la nitrificación y la desnitrificación. Cuyas reacciones dependen de la temperatura, y la velocidad de transferencia de oxígeno a las raíces de las plantas que puede variar con la estación.

La mayor fuente de carbono para posibilitar la desnitrificación es la muerte y descomposición de las raíces y rizomas, los demás detritus orgánicos y la DBO del agua residual. Por lo que en los humedales de flujo subterráneo horizontal tardarán varios años para obtener una buena desnitrificación. Por lo que los procedimientos de diseño de esta sección están pensados para los rendimientos esperados a largo plazo.

En la tabla 6.5. se ilustra que la remoción de amoniaco puede estar relacionada directamente con la profundidad de penetración de las raíces. El lecho que contiene *Typha* (penetración de las raíces de alrededor de 40% de la profundidad del lecho) obtiene solo un 32% de remoción de amoniaco en comparación con los lechos que tienen *Scirpus*, que alcanzan 94% de remoción cuando tienen una penetración completa de las raíces.

6.1.5.1. Nitrificación.

No existe una cuantificación de la disponibilidad de oxígeno en las raíces. Se han publicado aproximaciones de este 5 a 45 g de O₂/m²d de área superficial del humedal. Observando la tabla 6.5. se aprecia que el oxígeno disponible es suficiente para una buena nitrificación, dado que se requieren 5 g de oxígeno para nitrificar 1 g de amoniaco. El resultado de estos cálculos se muestra en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Oxígeno disponible por vegetación emergente de un humedal.

Tipo de planta	Penetración de las raíces (cm)	Oxígeno disponible	
		(g/m ³ *d) [†]	(g/m ² *d) [‡]
Scirpus	76	7.5	5.7
Phragmites	60	8.0	4.8
Typha	30	7.0	2.1
<i>Promedio</i>	<i>55.3</i>	<i>7.5</i>	<i>4.2</i>

* Profundidad total del lecho de grava 0.76 m

† Oxígeno disponible por unidad de volumen contado en la zona de las raíces.

‡ Oxígeno disponible por unidad de área superficial de lecho de 0.76 m de profundidad.

El oxígeno disponible para la nitrificación por unidad de área superficial va de 2.1 a 5.7 g/m²*d porque la profundidad de penetración de las raíces varía en cada una de las plantas. Este valor de oxígeno está cerca del valor más bajo de las publicaciones que citábamos antes (5-45 g O₂/m²*d). Sin embargo, el oxígeno disponible cuando se expresa en función del volumen en la zona de las raíces, es casi el mismo para las diversas plantas (7.5 g O₂/m³*d en promedio). Esto sugiere que al menos para estas tres especies, el oxígeno disponible para nitrificación será aproximadamente el mismo, así que la nitrificación depende de la profundidad de penetración de las raíces presentes en el lecho del humedal de flujo subterráneo horizontal. La ecuación (23) define esta relación:

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(rz)^{2.6077} \quad \text{Ecuación 23.}$$

Donde:

K_{NH}: Constante de nitrificación a 20°C, d-1

rz: Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal de flujo subterráneo horizontal ocupado por la zona de las raíces, como fracción decimal (0 a 1).

Una vez definida la constante básica K_{NH} es posible determinar la remoción de amoniaco, vía nitrificación, en un humedal de flujo subterráneo horizontal usando las ecuaciones (24) y (25)

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad \text{Ecuación 24.}$$

$$A_S = \frac{Q \ln(C_0 / C_e)}{K_T y n} \quad \text{Ecuación 25.}$$

Donde:

A_S: Área superficial del humedal, m²

C_e: Concentración de amoniaco en el efluente, mg/l

C₀: Concentración de amoniaco en el influente, mg/l

K_T: Constante dependiente de la temperatura, d-1

n: Porosidad del humedal, (ver tabla 6.2.)

t: Tiempo de residencia hidráulico, d

y: Profundidad del agua en el humedal, m

Q: Caudal promedio del humedal, m³/d

La constante dependiente de la temperatura K_T es como sigue:

$$K_0 = 0 \text{ d}^{-1}, \text{ a } 0^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 26.}$$

$$K_T = K_{10}(1.15)^{(T-10)} \text{ d}^{-1}, \text{ de } 1\text{-}10^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 27.}$$

$$K_T = K_{NH}(1.048)^{(T-20)} \text{ d}^{-1}, \text{ más de } 10^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 28.}$$

Para las temperaturas por debajo de 10°C es necesario resolver las ecuaciones (23) y (28) para determinar el valor de K_{10} . Para obtener los valores para temperaturas entre 0 y 1°C se usará interpolación.

No es aceptable asumir que la zona de raíces ocupará automáticamente la totalidad del lecho, excepto si este es muy poco profundo ($\leq 0.3\text{m}$), o si usa grava muy pequeña ($\leq 20 \text{ mm}$).

Profundidades del lecho de $\approx 0.6\text{m}$ requieren las medidas especiales tratadas anteriormente para inducir y mantener una penetración total. Si estas medidas no van a ser utilizadas es conservador asumir que la zona de las raíces no ocupará más del 50% de la profundidad del lecho, a menos que las mediciones indiquen otra cosa. Esta recomendación está basada en la experiencia con numerosos sistemas en operación.

La ecuación (25) requerirá normalmente un TRH de entre 6 y 8 días para alcanzar límites exigentes en la remoción de amoníaco en condiciones de verano, con una zona de raíces completamente desarrollada e incluso un largo periodo de bajas temperaturas en invierno.

6.1.5.2. Desnitrificación.

Cuando el proyecto requiere eliminación de nitrógeno, se hace necesario considerar los requerimientos para la desnitrificación y dimensionar el humedal teniéndolos en cuenta. En general, mucha de la producción de nitrato del humedal de flujo subterráneo horizontal puede desnitrificarse y ser removida dentro del área prevista para la nitrificación y sin necesidad de proporcionar ninguna fuente de carbono adicional. Puede que los humedales flujo libre superficial sean más efectivos en la remoción de nitratos que los de flujo subterráneo horizontal, ya que tienen una mayor disponibilidad de carbono de los detritus de las plantas, por lo menos en los primeros años de operación. Aunque los humedales de flujo subterráneo horizontal tienen más área superficial para la actividad biológica, es posible que la limitación en la disponibilidad de carbono afecte la desnitrificación y, por tanto, la comparación de los rendimientos. El modelo de diseño recomendado para estimar la remoción de nitratos vía desnitrificación corresponde a las ecuaciones (29) y (30):

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad \text{Ecuación 29.}$$

$$A_S = \frac{Q \ln(C_0 / C_e)}{K_T y n} \quad \text{Ecuación 30.}$$

Donde:

A_S : Área superficial del humedal, m^2
 C_e : Concentración de nitratos en el efluente, mg/l
 C_0 : Concentración de nitratos en el influente, mg/l
 K_T : Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}
 K_T : $0 d^{-1}$ ($0^\circ C$); $1.15^{(T-20)} d^{-1}$ (+ de $1^\circ C$)
 n : Porosidad del humedal, (ver tabla 6.2.)
 t : Tiempo de residencia hidráulico, d
 y : Profundidad del agua en el humedal, m
 Q : Caudal promedio del humedal, m^3/d

La concentración de nitratos en el influente (C_0) usada en las ecuaciones (29) y (30) es la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida determinadas con la ecuación (24). Como esta ecuación determina el amoníaco que queda en el sistema después de la nitrificación en el humedal, se puede considerar que la diferencia ($C_0 - C_e$) está disponible como nitrato. La constante de desnitrificación entre $0^\circ C$ y $1^\circ C$ puede determinarse mediante interpolación ($K_T = 0.023$ a $1^\circ C$). Para efectos prácticos la desnitrificación es insignificante a estas temperaturas. Hay que recordar que las ecuaciones (29) y (30) solo son aplicables para el nitrato que está presente en el humedal.

6.1.5.3. Nitrógeno total.

Cuando se requiere la desnitrificación, es generalmente porque se tiene un límite de descarga para el nitrógeno total (NT). El nitrógeno total en el efluente del sistema es la suma de los resultados de las ecuaciones (24) y (29). La determinación del área requerida para alcanzar el nivel específico de NT en el efluente es un procedimiento iterativo usando las ecuaciones (25) y (29):

1. Se asume un valor para el amoníaco residual (C_e) y se resuelve la ecuación (25) para obtener el área requerida para nitrificar. Determinando así el TRH para el sistema.
2. Tomar ($C_0 - C_e$) como el nitrato producido por la nitrificación y usar este valor como el del influente en la ecuación (29). Determinar la concentración de nitratos en el efluente con la ecuación (29).
3. La concentración de NT en el efluente es la suma de los valores de C_e obtenidos en las ecuaciones (24) y (29). Si no se alcanzó la exigencia de NT se necesita otra iteración de los cálculos.

6.1.6. MODELOS PARA LA REMOCIÓN DEL FÓSFORO.

La remoción de fósforo ocurre solo a través de la acumulación de sedimentos a largo plazo, como precipitados de hierro, aluminio o calcio. Normalmente el fósforo está presente en las aguas residuales en concentraciones de entre 4 y 15 mg/l , dependiendo del caudal y de la carga hidráulica asociada, es posible remover entre un 30 y un 60% del fósforo presente en el influente.

Como la deposición de sedimentos es la principal vía de eliminación del fósforo, la masa removida es función del área superficial del humedal y de la concentración de fósforo en el agua residual. Numerosos investigadores están de acuerdo en que un modelo basado en una forma general de primer orden representa el sistema, sin embargo, no existe consenso acerca de la constante que va asociada al modelo. Un humedal de 16,000 ha. se propuso, basándose en este modelo, para la remoción de fósforo de la totalidad del agua de drenaje de los Everglades en Florida, Estados Unidos.

Basándose en el análisis de los datos de la North American Data Base, Kadlec ha propuesto una constante de primer orden igual a 10 m/año para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales. Los 10 m /año son equivalentes a un promedio diario de 2.74 cm /d que es lo que se usa en la ecuación (31).

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp\left[\frac{-K_p}{CH}\right] \quad \text{Ecuación 31.}$$

Donde:

C_e : Concentración de fósforo en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración de fósforo en el influente, mg/l

K_p : 2.74 cm/d

CH: Carga hidráulica promedio anual, cm/d

$$A_s = \frac{(b)(Q)\ln(C_0 / C_e)}{K_p} \quad \text{Ecuación 32.}$$

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m²

b: Factor de conversión, 100 cm/m

Q: Caudal promedio del humedal, de la ecuación (30), m³/d

¹ Los modelos de diseño presentados en este capítulo son los sugeridos por Sherwood C. Reed, *Natural Systems for Waste Management and Treatment*.

7.1. ALGORITMO DEL PROGRAMA PROPUESTO.

El objetivo del presente trabajo es la elaboración de un programa que calcule las dimensiones necesarias de un humedal artificial de flujo horizontal. Se eligió hacerlo en lenguaje Fortran (de uso cotidiano en Ingeniería Química). Dada la secuencia necesaria (indicada en el Capítulo 6) para calcular los *aspectos de diseño hidráulicos* (tiempo de residencia hidráulica, ancho máximo absoluto de celda del humedal; área, largo y ancho del humedal), *aspectos de diseño térmicos* (temperatura en el efluente, temperatura promedio en el humedal), y los *aspectos de diseño para la remoción de contaminantes* (área requerida para eliminar nitrógeno, área requerida para la remoción de DBO), se debe tener como información mínima:

- Concentración máxima permitida por la norma de N₂ total.
- Concentración máxima permitida por la norma de DBO.
- Caudal promedio del humedal, en m³/d
- Concentración de N₂ total en el influente, en mg/l
- Concentración de la DBO en el influente, en mg/l
- Conocer cual es el material granular usado en el humedal, puede ser:
 - Arena gruesa
 - Arena gravosa
 - Arena media
 - Arena de cuarzo
 - Grava fina
 - Grava media
 - Roca gruesa

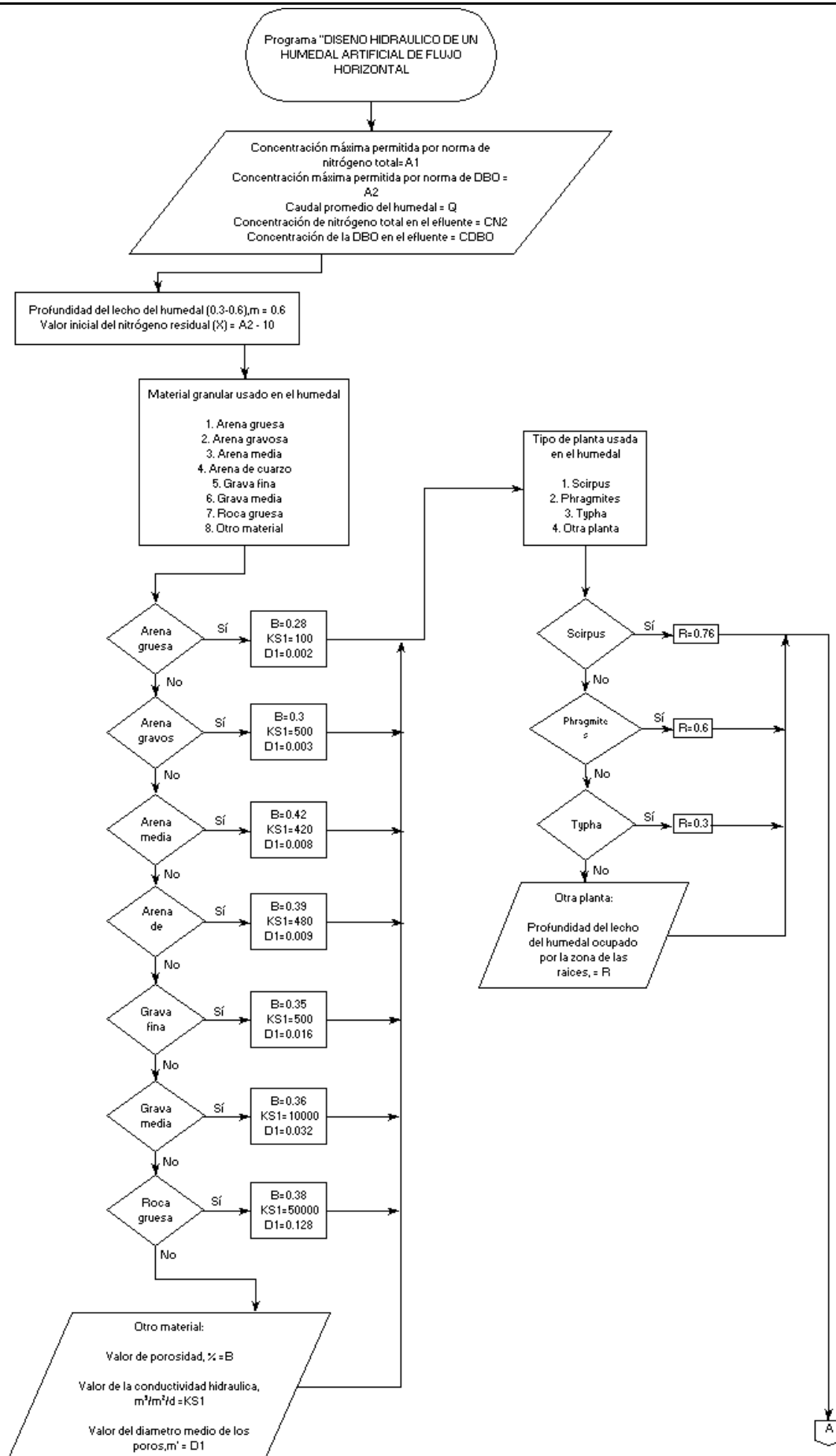
En caso que no se trate de ninguno de los materiales anteriores, se debe conocer previamente *antes* de correr el programa, la porosidad del material (%), su conductividad hidráulica (m³/m²/d) y el valor del diámetro medio de los poros (m)

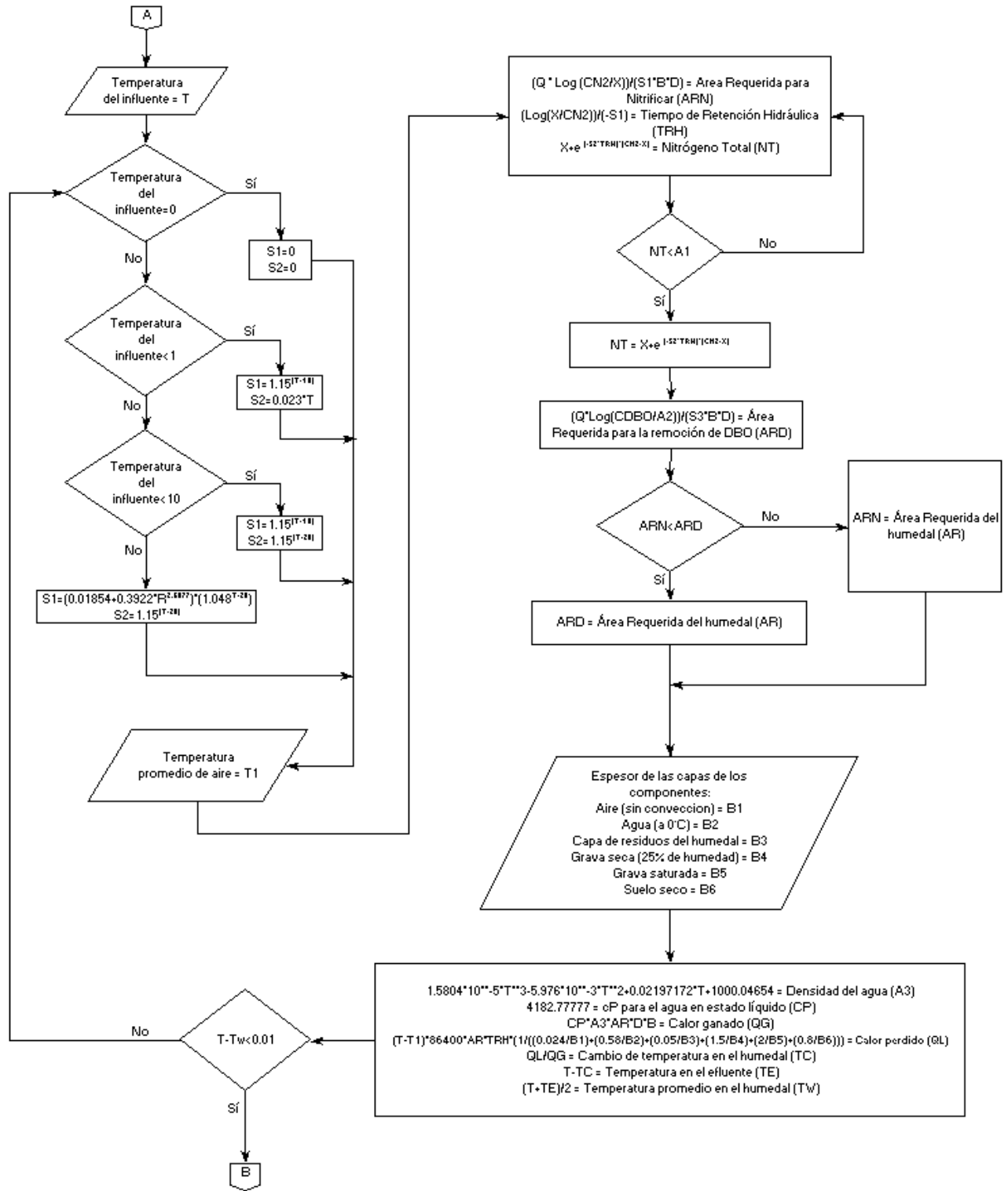
- Conocer o proponer la profundidad del humedal, que por tratarse de uno que aún no está operando, se considera de 0.6 m
- Conocer el tipo de planta usada en el humedal, la cual puede ser:
 - Scirpus
 - Phragmites
 - Typha

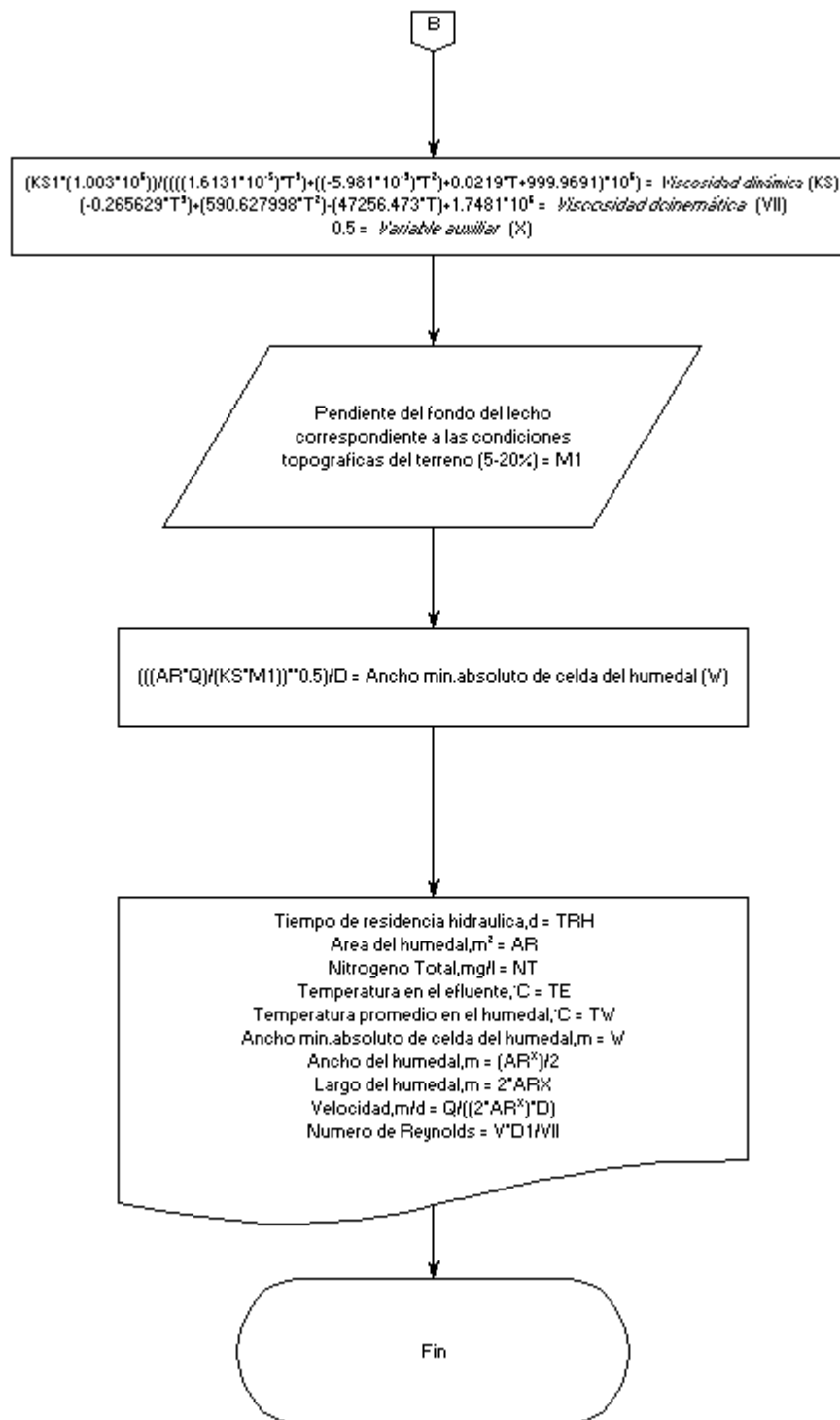
En caso que no se trate de ninguno de las plantas anteriores, se debe conocer previamente *antes* de correr el programa, el valor de la penetración de la zona de raíces de la planta a usar (%)

- Conocer la temperatura del influente, en °C
- Conocer la temperatura promedio del aire, en °C
- Conocer o proponer el espesor de las capas de los componentes, en m. Dentro de dichos componentes se consideran:
 - Aire (sin convención)
 - Agua (a 0°C)
 - Capa de residuos del humedal
 - Grava seca (25% de humedad)
 - Grava saturada
 - Suelo seco

A continuación se presenta el algoritmo del mismo:







7.2. PROGRAMA.

El programa que a continuación se muestra fue creado en lenguaje Fortran, y permite calcular los *aspectos de diseño hidráulicos*, *aspectos de diseño térmicos* y los *aspectos de diseño para la remoción de contaminantes* de un humedal artificial de flujo horizontal. Es indispensable la consistencia dimensional de todos los datos requeridos para la corrida del programa, de otro modo, aunque corra y haga las operaciones adecuadamente, el resultado que arroje estará muy alejado de la realidad.

```

C  DESCRIPCION DE VARIABLES:
C  A1      : VALOR MAXIMO (PERMITIDO POR LA NORMA) DE NITROGENO TOTAL RESIDUAL,mg/l
C  A2      : VALOR MAXIMO (PERMITIDO POR LA NORMA) DE DBO RESIDUAL,mg/l
C  A3      : DENSIDAD DEL AGUA,kg*m^2
C  ARN     : AREA REQUERIDA PARA NITRIFICAR,m^2
C  ARD     : AREA REQUERIDA PARA LA REMOCION DE DBO,m^2
C  AR      : AREA REQUERIDA DEL HUMEDAL
C  B       : POROSIDAD DEL MATERIAL,%
C  CN2     : CONCENTRACION DE NITROGENO EN EL INFLUENTE,mg/l
C  CDDBO   : CONCENTRACION DE DBO EN EL INFLUENTE,mg/l
C  CP      : CP PARA EL AGUA EN ESTADO LIQUIDO,J/kg*°C
C  D       : PROFUNDIDAD DEL LECHO DEL HUMEDAL,m
C  D1      : DIAMETRO MEDIO DE LOS POROS,m
C  KS1     : CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DEL MATERIAL,m^3/m^2/d
C  Q       : CAUDAL PROMEDIO DEL HUMEDAL,m^3/d
C  R       : PORCENTAJE DEL LECHO DEL HUMEDAL OCUPADO POR LAS RAICES,%
C  S1      : CONSTANTE PARA NITRIFICACION DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA
C  S2      : CONSTANTE PARA DESNITRIFICACION DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA
C  S3      : CONSTANTE PARA ELIMINACION DE LA DBO DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA
C  T       : TEMPERATURA DEL INFLUENTE,grado C
C  T1      : TEMPERATURA PROMEDIO DEL AIRE,grado C
C  TRH     : TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRAULICA,dias
C  W       : ANCHO DE UNA CELDA DEL HUMEDAL,m
C  X       : VALOR INICIAL DEL AMONICO RESIDUAL,mg/l

```

```

Program DISENO_HIDRAULICO

```

```

Real A,A1,A2,A3,AR,ARD,ARN,B,B1,B2,B3,B4,B5,B6,C,CP,D,E,KS,KS1
Real M1,NT,NT1,Q,QG,QL,R1,T,T1,TC,TE,TRH,TW,VI,W,S1,S2

```

```

Write(*,*)" UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
Write(*,*)"          FES ZARAGOZA CAMPUS II"
Write(*,*)" "
Write(*,*)"DISENO HIDRAULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL"
Write(*,*)" DE FLUJO HORIZONTAL O SUBTERRANEO"
Write(*,*)" "
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Concentracion maxima permitida por'
Write(*,*)" la norma de nitrogeno total,mg/l = '
Read(*,*)A1
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Concentracion maxima permitida por'
Write(*,*)" la norma de DBO,mg/l = '
Read(*,*)A2
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Caudal promedio del humedal,m^3/d = '
Read(*,*)Q
X=A1-10
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Concentracion de nitrogeno total'
Write(*,*)" en el influente,mg/l = '
Read(*,*)CN2
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Concentracion de la DBO en el influente,mg/l = '
Read(*,*)CDDBO
Write(*,*)" "
Write(*,*)" Profundidad del lecho del humedal (0.3-0.6),m = 0.6'

```

```

D=0.6

Write(*,*)" "
Write(*,*)' Material granular usado en el humedal'
Write(*,*)" "
Write(*,*)"1. Arena gruesa"
Write(*,*)"2. Arena gravosa"
Write(*,*)"3. Arena media"
Write(*,*)"4. Arena de cuarzo"
Write(*,*)"5. Grava fina"
Write(*,*)"6. Grava media"
Write(*,*)"7. Roca gruesa"
Write(*,*)"8. Otro material....."
Read(*,*)Respuesta
If (Respuesta .EQ. 1) Then
  B=0.28
  KSl=100
  D1=0.002
Endif
If (Respuesta .EQ. 2) Then
  B=0.3
  KSl=500
  D1=0.003
Endif
  If (Respuesta .EQ. 3) Then
    B=0.42
    KSl=420
    D1=0.008
  Endif
If (Respuesta .EQ. 4) Then
  B=0.39
  KSl=480
  D1=0.009
Endif
If (Respuesta .EQ. 5) Then
  B=0.35
  KSl=500
  D1=0.016
Endif
If (Respuesta .EQ. 6) Then
  B=0.36
  KSl=10000
  D1=0.032
Endif
If (Respuesta .EQ. 7) Then
  B=0.38
  KSl=50000
  D1=0.128
Endif
  If (Respuesta .EQ. 8) Then
    Write(*,*)" "
    Write(*,*)' Escriba el valor de porosidad del material,% = '
    Read(*,*)B
    B=B/100
    Write(*,*)" "
    Write(*,*)' Escriba el valor de conductividad'
    Write(*,*)' hidraulica del material,m^3/m^2/d = '
    Read(*,*)KSl
    Write(*,*)" "
    Write(*,*)' Escriba el valor del diametro medio de los poros,m'
    Read(*,*)D1
    End if

Write(*,*)" "
Write(*,*)' Tipo de planta usada en el humedal '
Write(*,*)" "
Write(*,*)"1. Scirpus"

```



```

Write(*,*)"2. Phragmites"
Write(*,*)"3. Typha"
Write(*,*)"4. Otra planta....."
Read(*,*)Respuesta
If (Respuesta .EQ. 1) Then
  R=0.76
  Endif
If (Respuesta .EQ. 2) Then
  R=0.6
  Endif
If (Respuesta .EQ. 3) Then
  R=0.3
  Endif
  If (Respuesta .EQ. 4) Then
    Write(*,*)" "
Write(*,*)' Escriba el valor de la penetracion'
  Write(*,*)' ocupado por la zona de las raices,m'
Read(*,*)R
  Endif

  Write(*,*)" "
  Write(*,*)"      Espesor de las capas de los componentes,m"
Write(*,*)"Aire (sin conveccion) = "
Read(*,*)B1
Write(*,*)"Agua (a 0 grados C) = "
Read(*,*)B2
Write(*,*)"Capa de residuos del humedal = "
Read(*,*)B3
Write(*,*)"Grava seca (25% de humedad) = "
Read(*,*)B4
Write(*,*)"Grava saturada = "
Read(*,*)B5
Write(*,*)"Suelo seco = "
Read(*,*)B6

Write(*,*)" "
Write(*,*)' Temperatura promedio del aire,grado C = '
Read(*,*)T1
Write(*,*)" "
Write(*,*)' Temperatura del influente,grado C = '
Read(*,*)T
1 S3=1.104*1.06**(T-20)
  If (T .EQ. 0) Then
    S1=0.
    S2=0.
    Endif
  If (T .LT. 1) Then
    S1=1.15**(T-10)
    S2=0.023*T
    Endif
  If (T .LT. 10) Then
    S1=1.15**(T-10)
    S2=1.15**(T-20)
  Else
    S1=(0.01854+0.3922*R**2.6077)*(1.048**(T-20))
    S2=1.15**(T-20)
  Endif

Do While (NT .LT. A1)
ARN1=ARN
TRH1=TRH
ARN=(Q*Log(CN2/X))/(S1*B*D)
TRH=(Log(X/CN2))/(-S1)
E=EXP(-S2*TRH)*(CN2-X)
NT1=NT
NT=X+E
X=NT

```

```

End Do
NT=NT1
ARN=ARN1
TRH=TRH1

ARD=(Q*Log(CDBO/A2))/(S3*B*D)

If (ARN .LT. ARD) Then
AR=ARD
TRH=(AR*B*D)/Q
Else
AR=ARN
Endif

A3=1.5804*10**5*T**3-5.976*10**3*T**2+0.02197172*T+1000.04654
CP=4182.77777
QG=CP*A3*AR*D*B
R1=1/((0.024/B1)+(0.58/B2)+(0.05/B3)+(1.5/B4)+(2/B5)+(0.8/B6))
QL=(T-T1)*86400*AR*TRH*R1
TC=QL/QG
TE=T-TC
TW1=(T+TE)/2

TW2=TW1-T
If (TW2 .LT. 0) Then
TW2=-1*TW2
Else
TW2=TW2
Endif

If (TW2 .LT. 0.01) Then
TW=TW1
Else
T=TW1
X=A1-10
Goto 1
Endif

VI=(-0.0025062*T**3)+(0.56524*T**2)-(46.652227*T)+1749.76349
KS=KS1*1102/VI

VII=(-0.265629*T**3)+(590.627998*T**2)-(47256.473*T)+1.7481*10**6

Write(*,*)" "
Write(*,*)" Pendiente del fondo del lecho correspondiente a las "
Write(*,*)" condiciones topograficas del terreno (5-20%)"
Read(*,*)M1
M1=M1/100

X=0.5
W=Q/(KS*M1*D)
DBO=CDBO/EXP(AR*S3*B*D/Q)
V=Q/((2*AR*X)*D)

Write(*,*)" "
Write(*,*)'Tiempo de residencia hidraulica,d',TRH1
Write(*,*)'Area del humedal,m^2',AR
Write(*,*)'Nitrogeno Total en el efluente,mg/l',NT1
Write(*,*)'DBO en el efluente,mg/l',DBO
Write(*,*)'Temperatura en el efluente,grados C',TE
Write(*,*)'Temperatura promedio en el humedal,grado C',TW
Write(*,*)'Ancho maximo absoluto de celda,m',W
Write(*,*)'Ancho del humedal,m',(AR*X)/2
Write(*,*)'Largo del humedal,m',2*AR*X
Write(*,*)'Velocidad,m/d',V
Write(*,*)'Numero de Reynolds',V*D1/VII
End

```

7.3. CORRIDA DEL PROGRAMA.

El siguiente ejemplo es un caso general, para un caso particular se deben considerar circunstancias locales y normas aplicables, las cuales pueden variar dependiendo la localidad, tipo de agua residual y uso que se le pretende dar a la misma.

El diseño preliminar será más preciso si se tienen datos básicos, y de ser posible, se realizará la determinación del gasto y las cargas contaminantes del influente que será tratado en el humedal. Si estos datos no son posibles de obtener, se trabajará con valores supuestos a partir de la población diseño, dotaciones, aportaciones, carga unitaria, etc. Si el alcantarillado es antiguo, se considerará la infiltración al mismo.

Datos:

Penetración de las raíces de la planta seleccionada (diferente a las propuestas)	0.50 m
Aportación por persona	150 l/hab/d
Carga unitaria de DBO ₅	5 g/hab/d
Nitrógeno total	8 g/hab/d
Población de proyecto	1,000 hab
Porosidad del material en el humedal	35%
Diámetro medio de los poros del material	0.0015 m
Conductividad hidráulica del material	500 m ³ /m ² /d
Temperatura del influente	15°C
Temperatura promedio del aire	11°C
Espesor de las capas de los componentes	(Todas se plantearan con el valor de 0.1 m)
Pendiente del fondo del lecho correspondiente a las condiciones topográficas del terreno (5-20%)	20%

Primeramente, se realizan las conversiones necesarias para tener la consistencia dimensional:

$$150l/hab/d * 1,000hab = 150,000l/d ; \frac{150,000l/d}{0.001l/m^3} = 150m^3/d$$

Caudal promedio del humedal

$$\frac{5g/hab/d}{150l/hab/d} = 0.0333g/l ; \frac{0.0333g/l}{1g/1000mg} = 33.3mg/l \text{ DBO}_5 \text{ en el influente}$$

$$\frac{8g/hab/d}{150l/hab/d} = 0.0533g/l ; \frac{0.0533g/l}{1g/1000mg} = 53.3mg/l \text{ Nitrógeno en el influente}$$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FES ZARAGOZA CAMPUS II

DISEÑO HIDRAULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL
DE FLUJO HORIZONTAL O SUBTERRANEO

Concentracion maxima permitida por
la norma de nitrogeno total,mg/l =
40

Concentracion maxima permitida por
la norma de DBO,mg/l =
75

Caudal promedio del humedal,m³/d =
150

Concentracion de nitrogeno total
en el influente,mg/l =
53.3

Concentracion de la DBO en el influente,mg/l =
33.3

Profundidad del lecho del humedal (0.3-0.6),m = 0.6

Material granular usado en el humedal

1. Arena gruesa
 2. Arena gravosa
 3. Arena media
 4. Arena de cuarzo
 5. Grava fina
 6. Grava media
 7. Roca gruesa
 8. Otro material.....
- 8

Escriba el valor de porosidad del material,% =
35

Escriba el valor de conductividad
hidraulica del material,m³/m²/d =
500

Escriba el valor del diametro medio de los poros,m
0.0015

Tipo de planta usada en el humedal

1. Scirpus
 2. Phragmites
 3. Typha
 4. Otra planta.....
- 4

Escriba el valor de la penetracion
ocupado por la zona de las raices,m
0.5

Espesor de las capas de los componentes,m
Aire (sin conveccion) =
0.1
Agua (a 0 grados C) =
0.1
Capa de residuos del humedal =

```

0.1
  Grava seca (25% de humedad) =
0.1
  Grava saturada =
0.1
  Suelo seco =
0.1

  Temperatura promedio del aire,grado C =
11

  Temperatura del influente,grado C =
15

  Pendiente del fondo del lecho correspondiente a las
  condiciones topograficas del terreno (5-20%)
20

Tiempo de residencia hidraulica,d           6.041305
Area del humedal,m^2                       4315.218
Nitrogeno Total en el efluente,mg/l        39.20652
DBO en el efluente,mg/l                    0.4309310
Temperatura en el efluente,grados C        12.63506
Temperatura promedio en el humedal,grado C 12.64499
Ancho maximo absoluto de celda,m           2.824015
Ancho del humedal,m                        32.84516
Largo del humedal,m                        131.3806
Velocidad,m/d                              1.902868
Numero de Reynolds                          2.2942290E-09
Press any key to continue
    
```

7.4. MEMORIA DE CÁLCULO.

Se toman los mismos datos usados para la corrida del programa:

DATOS

Q = 150	Caudal, m ³ / d
y = 0.6	Profundidad del lecho del humedal, m
n = 0.35	Porosidad del material
r = 0.5	Profundidad del lecho ocupado por la zona de raíces %
To = 15	Temperatura del influente, °C
T ₁ = 11	Temperatura promedios del are, °C
cP = 4182.7777	cP del agua en estado liquido, J/kg*°C
	<i>Espesores de las capas de los componentes del humedal</i>
0.1 m	Aire (sin confección)
0.1 m	Agua (a 0 °C)
0.1 m	Capa de residuos
0.1 m	Grava seca (25% H)
0.1 m	Grava saturada
0.1 m	Suelo seco

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 702.9933 < As_{N_2} = 3,548.601$$

Hecho lo anterior, se procede al cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$	999.085
Factor de conversión s	86400

$$U = \frac{1}{\left[\frac{0.1}{0.024}\right] + \left[\frac{0.1}{0.08}\right] + \left[\frac{0.1}{0.23}\right] + \left[\frac{0.1}{2.21}\right] + \left[\frac{0.1}{0.58}\right] + \left[\frac{0.1}{0.05}\right] + \left[\frac{0.1}{1.5}\right] + \left[\frac{0.1}{2.0}\right] + \left[\frac{0.1}{0.8}\right]} = 0.02018$$

Calor ganado qG = cP*d*As*y*n = 3114179567

Calor perdido qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 122987265.7

qG / qL = Tc = 0.03949

To-Tc = Te = 14.9605

(Te+To)/2 = Tw = 14.9802

T-Tw = 0.019746 > 0.01

Tw = T, y se recalcula el área para la eliminación del N² total (utilizando la temperatura aquí obtenida, ya que la constante está en función de la temperatura).

SERIE DE CÁLCULOS No. 2

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

K_t = 0.06550

K₂ NITRIFICACIÓN $f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(14.9802-20)})$

K_t = 0.49581

K₂ DESNITRIFICACIÓN = 1.15^(14.9802-20)

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	As= $\frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y n}$	TRH= $\frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co'=Co-Ce	Ce'=exp(-K _t t)Co	NT=Ce+Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,267.258	8.774	23.300	0.3006	30.301
30.301	6,158.523	8.622	22.999	0.3200	30.621
30.621	6,043.955	8.462	22.679	0.3417	30.962
30.962	5,922.946	8.292	22.338	0.3660	31.328
31.328	5,794.788	8.113	21.972	0.3935	31.722
31.722	5,658.662	7.922	21.578	0.4248	32.147
32.147	5,513.609	7.719	21.153	0.4605	32.607
32.607	5,358.498	7.502	20.693	0.5017	33.109

33.109	5,191.989	7.269	20.191	0.5495	33.659
33.659	5,012.482	7.017	19.641	0.6055	34.264
34.264	4,818.053	6.745	19.036	0.6716	34.936
34.936	4,606.369	6.449	18.364	0.7505	35.686
35.686	4,374.593	6.124	17.614	0.8455	36.532
36.532	4,119.255	5.767	16.768	0.9610	37.493
37.493	3,836.115	5.371	15.807	1.1026	38.595
38.595	3,520.042	4.928	14.705	1.2774	39.873
39.873	3,164.984	4.431	13.427	1.4924	41.365

El área para eliminar el N₂ total es 3,520 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co =33.3 Concentración inicial
 Ce =75 Concentración máxima de norma
 K_t =0.8240 K_{DBO} = 1.104*1.06^(14.9802-20)
 As =703.8026 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_{yn}}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 703.8026 < As_{N_2} = 3,520.042$$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.088
 Calor ganado qG = cP*d*As*y*n = 3089125347
 Calor perdido qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 120418205.4
 qG / qL = Tc = 0.0390
 To-Tc = Te = 14.9413
 (Te+To)/2 = Tw = 14.9608
 T-Tw = 0.019491 > 0.01

Tw = T, y se recalcula el área para la eliminación del N² total con la temperatura obtenida.

-
-
-

SERIE DE CÁLCULOS No. 25

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

$K_t = 0.06405$

$K_2 \text{ NITRIFICACIÓN } f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(14.5-20)})$

$K_t = 0.46362$

$K_2 \text{ DESNITRIFICACIÓN } = 1.15^{(14.5-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co' = Co - Ce	Ce' = exp(-K _t t)Co	NT = Ce + Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,409.972	8.974	23.300	0.3635	30.363
30.363	6,275.659	8.786	22.937	0.3904	30.754
30.754	6,133.177	8.586	22.546	0.4209	31.175
31.175	5,981.561	8.374	22.125	0.4558	31.631
31.631	5,819.682	8.148	21.669	0.4959	32.126
32.126	5,646.200	7.905	21.174	0.5423	32.669
32.669	5,459.524	7.643	20.631	0.5964	33.265
33.265	5,257.743	7.361	20.035	0.6602	33.925
33.925	5,038.553	7.054	19.375	0.7361	34.661
34.661	4,799.152	6.719	18.639	0.8272	35.489
35.489	4,536.124	6.351	17.811	0.9376	36.426
36.426	4,245.289	5.943	16.874	1.0728	37.499
37.499	3,921.565	5.490	15.801	1.2395	38.739
38.739	3,558.879	4.982	14.561	1.4455	40.184

El área para eliminar el N₂ total es 3,921 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3

Concentración inicial

Ce = 75

Concentración máxima de norma

$K_t = 0.8013$

$K_{DBO} = 1.104 * 1.06^{(14.5-20)}$

As = 723.7759

Área para remover DBO

$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$As_{DBO} = 723.7759 < As_{N_2} = 3,921.565$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.157
 Calor ganado $qG = cP*d*As*y*n = 3441733416$
 Calor perdido $qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 131423418.4$

$qG / qL = Tc = 0.0382$
 $To - Tc = Te = 14.4618$
 $(Te + To) / 2 = Tw = 14.4809$
 $T - Tw = 0.019093 > 0.01$

$Tw = T$, y se recalcula el área para la eliminación del N_2 total con la temperatura obtenida.

•
•
•

SERIE DE CÁLCULOS No. 48

Calculo del área para la eliminación del N_2 total:

N_2 Total

$K_t = 0.06286$ K_2 NITRIFICACIÓN $f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(14.1-20)})$

$K_t = 0.43841$ K_2 DESNITRIFICACIÓN = $1.15^{(14.1-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N_2 son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	$Co' = Co - Ce$	$Ce' = \exp(-K_t t) Co$	$NT = Ce + Ce'$
Concentración de N_2 amoniacal	Área para remover N_2	TRH para remoción de N_2	N_2 para nitrificar	N_2 para desnitrificar	N_2 Total
30.000	6,531.315	9.144	23.300	0.4230	30.423
30.423	6,372.192	8.921	22.877	0.4580	30.881
30.881	6,202.405	8.683	22.419	0.4981	31.379
31.379	6,020.576	8.429	21.921	0.5445	31.924
31.924	5,825.069	8.155	21.376	0.5987	32.522
32.522	5,613.924	7.859	20.778	0.6624	33.185
33.185	5,384.777	7.539	20.115	0.7382	33.923
33.923	5,134.763	7.189	19.377	0.8290	34.752
34.752	4,860.385	6.805	18.548	0.9391	35.691
35.691	4,557.371	6.380	17.609	1.0738	36.765
36.765	4,220.519	5.909	16.535	1.2399	38.005
38.005	3,843.588	5.381	15.295	1.4455	39.450
39.450	3,419.387	4.787	13.850	1.6981	41.148

El área para eliminar el N_2 total es 3,843 m^2 .

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

$$\begin{aligned}
 &Co = 33.3 \quad \text{Concentración inicial} \\
 &Ce = 75 \quad \text{Concentración máxima de norma} \\
 &K_t = 0.7828 \quad K_{DBO} = 1.104 * 1.06^{(14.1-20)} \\
 &As = 740.8435 \quad \text{Área para remover DBO} \quad As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}
 \end{aligned}$$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 740.8435 < As_{N_2} = 3,843.588$$

Cálculo de la parte térmica:

$$\begin{aligned}
 &\text{Densidad } f(T) \quad 999.213 \\
 &\text{Calor ganado } qG = cP * d * As * y * n = 3373484945 \\
 &\text{Calor perdido } qL = (T - T_1) * U * s * As * TRH = 111820411.5 \\
 &qG / qL = T_c = 0.0331 \\
 &T_o - T_c = T_e = 14.0669 \\
 &(T_e + T_o) / 2 = T_w = 14.0834 \\
 &T - T_w = 0.016573 > 0.01 \\
 &T_w = T, \text{ y se recalcula el área para la eliminación del } N_2 \text{ total con la} \\
 &\text{temperatura obtenida.}
 \end{aligned}$$

-
-
-

SERIE DE CÁLCULOS No. 66

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

$$\begin{aligned}
 K_t = 0.06198 \quad &K_2 \text{ NITRIFICACIÓN } f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(13.8-20)}) \\
 K_t = 0.42041 \quad &K_2 \text{ DESNITRIFICACIÓN } = 1.15^{(13.8-20)}
 \end{aligned}$$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	$Co' = Co - Ce$	$Ce' = \exp(-K_t t) Co$	$NT = Ce + Ce'$
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,623.828	9.273	23.300	0.4723	30.472
30.472	6,443.804	9.021	22.828	0.5144	30.987
30.987	6,250.863	8.751	22.313	0.5633	31.550
31.550	6,043.231	8.461	21.750	0.6205	32.171
32.171	5,818.779	8.146	21.129	0.6879	32.858
32.858	5,574.941	7.805	20.442	0.7682	33.627
33.627	5,308.597	7.432	19.673	0.8648	34.491
34.491	5,015.944	7.022	18.809	0.9822	35.474
35.474	4,692.333	6.569	17.826	1.1262	36.600
36.600	4,332.119	6.065	16.700	1.3043	37.904
37.904	3,928.567	5.500	15.396	1.5248	39.429
39.429	3,474.036	4.864	13.871	1.7951	41.224

El área para eliminar el N₂ total es 3,928 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3 Concentración inicial
 Ce = 75 Concentración máxima de norma
 K_t = 0.7963 K_{DBO} = 1.104 * 1.06^(13.8-20)
 As = 753.9078 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 753.9078 < As_{N_2} = 3,928.567$$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.523
 Calor ganado qG = cP*d*As*y*n = 3448210741
 Calor perdido qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 105514495.8
 $qG / qL = Tc = 0.0306$
 $To - Tc = Te = 13.7694$
 $(Te + To) / 2 = Tw = 13.7847$
 $T - Tw = 0.015300 > 0.01$

Tw = T, y se recalcula el área para la eliminación del N² total con la temperatura obtenida.

-
-
-

SERIE DE CÁLCULOS No. 87

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

$K_t = 0.06111$

$K_2 \text{ NITRIFICACIÓN } f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(13.5-20)})$

$K_t = 0.40315$

$K_2 \text{ DESNITRIFICACIÓN } = 1.15^{(13.5-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t \cdot y_n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co' = Co - Ce	Ce' = exp(-K _t t)Co	NT = Ce + Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,717.651	9.405	23.300	0.5257	30.526
30.526	6,514.610	9.120	22.774	0.5762	31.102
31.102	6,296.032	8.814	22.198	0.6354	31.737
31.737	6,059.658	8.484	21.563	0.7053	32.443
32.443	5,802.758	8.124	20.857	0.7887	33.231
33.231	5,522.021	7.731	20.069	0.8891	34.120
34.120	5,213.401	7.299	19.180	1.0114	35.132
35.132	4,871.964	6.821	18.168	1.1617	36.294
36.294	4,491.719	6.288	17.006	1.3477	37.641
37.641	4,065.547	5.692	15.659	1.5784	39.220
39.220	3,585.431	5.020	14.080	1.8610	41.081

El área para eliminar el N₂ total es 4,065 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3 Concentración inicial

Ce = 75 Concentración máxima de norma

$K_t = 0.7559$ $K_{DBO} = 1.104 * 1.06^{(13.5-20)}$

As = 767.2025 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t \cdot y_n}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$As_{DBO} = 767.2025 < As_{N_2} = 4,065.547$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.293
 Calor ganado $qG = cP*d*As*y*n = 3568583534$
 Calor perdido $qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 100893625.9$

$$qG / qL = Tc = 0.0283$$

$$To - Tc = Te = 13.4717$$

$$(Te + To) / 2 = Tw = 13.4859$$

$$T - Tw = 0.014136 > 0.01$$

$Tw = T$, y se recalcula el área para la eliminación del N_2 total con la temperatura obtenida.

▪
▪
▪

SERIE DE CÁLCULOS No. 117

Calculo del área para la eliminación del N_2 total:

N_2 Total

$K_t = 0.05998$ K_2 NITRIFICACIÓN $f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(13.1-20)})$
 $K_t = 0.38123$ K_2 DESNITRIFICACIÓN = $1.15^{(13.1-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N_2 son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	$Co' = Co - Ce$	$Ce' = \exp(-K_t t) Co$	$NT = Ce + Ce'$
Concentración de N_2 amoniacal	Área para remover N_2	TRH para remoción de N_2	N_2 para nitrificar	N_2 para desnitrificar	N_2 Total
30.000	6,844.819	9.583	23.300	0.6037	30.604
30.604	6,607.559	9.251	22.696	0.6674	31.271
31.271	6,350.635	8.891	22.029	0.7430	32.014
32.014	6,070.987	8.499	21.286	0.8335	32.847
32.847	5,764.896	8.071	20.453	0.9430	33.790
33.790	5,427.824	7.599	19.510	1.0768	34.867
34.867	5,054.237	7.076	18.433	1.2418	36.109
36.109	4,637.449	6.492	17.191	1.4467	37.556
37.556	4,169.611	5.837	15.744	1.7008	39.257
39.257	3,642.133	5.099	14.043	2.0103	41.267

El área para eliminar el N_2 total es 4,169 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

$Co = 33.3$ Concentración inicial
 $Ce = 75$ Concentración máxima de norma
 $K_t = 0.7385$ $K_{DBO} = 1.104 * 1.06^{(13.1-20)}$
 $As = 785.2941$ Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$As_{DBO} = 785.2941 < As_{N_2} = 4,169.611$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.344
 Calor ganado $qG = cP * d * As * y * n = 3660115097$
 Calor perdido $qL = (T - T_1) * U * s * As * TRH = 89144808.17$
 $qG / qL = T_c = 0.0244$
 $To - T_c = T_e = 13.0756$
 $(T_e + To) / 2 = T_w = 13.0878$
 $T - T_w = 0.012178 > 0.01$

$T_w = T$, y se recalcula el área para la eliminación del N² total con la temperatura obtenida.

-
-
-

SERIE DE CÁLCULOS No. 134

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

$K_t = 0.05942$ K_2 NITRIFICACIÓN $f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(12.9-20)})$
 $K_t = 0.37072$ K_2 DESNITRIFICACIÓN = $1.15^{(12.9-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t y_n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co' = Co - Ce	Ce' = exp(-K _t t)Co	NT = Ce + Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,909.302	9.673	23.300	0.6456	30.646
30.646	6,653.328	9.315	22.654	0.7169	31.363
31.363	6,375.330	8.925	21.937	0.8020	32.165

32.165	6,071.779	8.500	21.135	0.9045	33.069
33.069	5,738.375	8.034	20.231	1.0294	34.098
34.098	5,369.871	7.518	19.202	1.1829	35.281
35.281	4,959.895	6.944	18.019	1.3733	36.655
36.655	4,500.854	6.301	16.645	1.6099	38.265
38.265	3,984.130	5.578	15.035	1.9015	40.166

El área para eliminar el N₂ total es 4,500 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3 Concentración inicial
 Ce = 75 Concentración máxima de norma
 K_t = 0.7300 K_{DBO} = 1.104 * 1.06^(12.9-20)
 As = 794.4993 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_{lyn}}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 794.4993 < As_{N_2} = 4,500.854$$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad f(T) 999.369
 Calor ganado qG = cP*d*As*y*n = 3497386333
 Calor perdido qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 73638731.09
 qG / qL = Tc = 0.0211
 To-Tc = Te = 12.8789
 (Te+To)/2 = Tw = 12.8895
 T-Tw = 0.010528 > 0.01

Tw = T, y se recalcula el área para la eliminación del N² total con la temperatura obtenida.

-
-
-

SERIE DE CÁLCULOS No. 156

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

K_t = 0.05876 K₂ NITRIFICACIÓN $f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(12.66350-20)})$
 K_t = 0.35867 K₂ DESNITRIFICACIÓN = 1.15^(12.66350-20)

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_{lyn}}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co' = Co - Ce	Ce' = exp(-K _t t)Co	NT = Ce + Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,986.339	9.781	23.300	0.6979	30.698
30.698	6,706.778	9.389	22.602	0.7791	31.477
31.477	6,402.133	8.963	21.823	0.8766	32.354
32.354	6,068.256	8.496	20.946	0.9949	33.348
33.348	5,700.086	7.980	19.952	1.1401	34.489
34.489	5,291.464	7.408	18.811	1.3198	35.808
35.808	4,834.988	6.769	17.492	1.5433	37.352
37.352	4,322.069	6.051	15.948	1.8205	39.172
39.172	3,743.596	5.241	14.128	2.1562	41.328

El área para eliminar el N₂ total es 4,322 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3 Concentración inicial
 Ce = 75 Concentración máxima de norma
 K_t = 0.7200 K_{DBO} = 1.104 * 1.06^(12.66350-20)
 As = 805.5237 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_{lyn}}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$$As_{DBO} = 805.5237 < As_{N_2} = 4,322.069$$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad f(T) 999.399
 Calor ganado qG = cP*d*As*y*n = 3794149835
 Calor perdido qL = (T-T1)*U*s*As*TRH = 75873819.32
 qG / qL = Tc = 0.0200
 To - Tc = Te = 12.6435
 (Te + To) / 2 = Tw = 12.6535
 T - Tw = 0.009999 < 0.01

Por lo tanto, el valor de temperatura obtenido en esta última serie de cálculos se considera como el recomendado para calcular el área del humedal, por lo que se realiza una última serie de cálculos usando la temperatura obtenida:

SERIE DE CÁLCULOS No. 157

Calculo del área para la eliminación del N₂ total:

N₂ Total

$K_t = 0.05873$ $K_2 \text{ NITRIFICACIÓN } f(t) = (0.01854 + 0.3922 * 0.5^{2.6077}) * (1.048^{(12.6535-20)})$

$K_t = 0.35817$ $K_2 \text{ DESNITRIFICACIÓN } = 1.15^{(12.6535-20)}$

Los valores obtenidos para las iteraciones del cálculo del área para la remoción de N₂ son:

Ce	$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t \cdot y_n}$	$TRH = \frac{\ln(Ce/Co)}{-K_t}$	Co' = Co - Ce	Ce' = exp(-K _t t)Co	NT = Ce + Ce'
Concentración de N ₂ amoniacal	Área para remover N ₂	TRH para remoción de N ₂	N ₂ para nitrificar	N ₂ para desnitrificar	N ₂ Total
30.000	6,989.615	9.785	23.300	0.7002	30.700
30.700	6,709.021	9.393	22.600	0.7818	31.482
31.482	6,403.207	8.964	21.818	0.8798	32.362
32.362	6,067.997	8.495	20.938	0.9989	33.361
33.361	5,698.297	7.978	19.939	1.1450	34.506
34.506	5,287.907	7.403	18.794	1.3258	35.832
35.832	4,829.382	6.761	17.468	1.5508	37.382
37.382	4,314.093	6.040	15.918	1.8298	39.212
39.212	3,732.926	5.226	14.088	2.1674	41.380

El área para eliminar el N₂ total es 4,314 m².

Calculo del área para la eliminación del DBO:

DBO

Co = 33.3 Concentración inicial

Ce = 75 Concentración máxima de norma

$K_t = 0.7195$ $K_{DBO} = 1.104 * 1.06^{(12.6535-20)}$

As = 805.9932 Área para remover DBO $As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_t \cdot y_n}$

Comparando los valores obtenidos del área para la eliminación de N₂ y DBO, se tomará el más grande (que corresponde al área necesaria para la remoción de N₂).

$As_{DBO} = 805.9932 < As_{N_2} = 4,314.093$

Cálculo de la parte térmica:

Densidad $f(T)$ 999.400

Calor ganado $qG = cP * d * As * y * n = 3787153153$

Calor perdido $qL = (T - T1) * U * s * As * TRH = 75139686.97$

$qG / qL = Tc = 0.0198$

$$T_o - T_c = T_e = 12.6337$$

$$(T_e + T_o) / 2 = T_w = 12.6436$$

$$T - T_w = 0.009920 < 0.01$$

A continuación se compara el resultado contra el obtenido con el programa:

Tabla 7.1. Comparación de los resultados del cálculo de un humedal utilizando el programa vs. el cálculo convencional.

Propiedad	Resultado	
	Programa	Convencional
Área para la remoción de N ₂	4,315.218	4,314.093
Tiempo de Residencia Hidráulica	6.041	6.040
N ₂ total en el efluente	39.206	39.212
Temperatura del efluente	12.635	12.6337
Temperatura promedio del humedal	12.644	12.6436

También se puede utilizar no sólo para determinar el área del humedal y el Tiempo de Residencia Hidráulica con los datos de un material granular y una planta determinada, sino que se puede determinar la combinación de material granular y tipo de planta más óptimos para eliminar la mayor cantidad de contaminantes posibles con la menor área. A continuación se muestran los resultados obtenidos de dicho análisis, se consideran las mismas temperaturas, concentraciones de Nitrógeno y DBO y los espesores de las capas de los componentes del humedal del caso anterior:

- | Material granular | Tipo de planta |
|--------------------|----------------|
| 1. Arena gruesa | 1. Scirpus |
| 2. Arena gravosa | 2. Phragmites |
| 3. Arena media | 3. Typha |
| 4. Arena de cuarzo | |
| 5. Grava fina | |
| 6. Grava media | |
| 7. Roca gruesa | |

	Material 1		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	3.7719	4.9370	12.3084
Área del humedal, m ²	3367.7590	4408.0640	10989.6400
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	35.4983	37.9777	39.9589
DBO en el efluente, mg/l	2.0443	0.9601	0.0079
Temperatura en el efluente, °C	13.1102	12.6036	11.6259
Temperatura promedio en el humedal, °C	13.1202	12.6136	11.6358
Ancho máximo absoluto de celda, m	13.9404	14.1320	14.5096
Ancho del humedal, m	29.0162	33.1966	52.4157
Largo del humedal, m	116.0648	132.7865	209.6630
Velocidad, m/d	2.1540	1.8827	1.1924
Numero de Reynolds	3.5057E-09	3.02411E-09	1.86683E-09

	Material 2		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	3.7418	4.9512	12.3003
Área del humedal, m ²	3118.1440	4125.9970	10250.2700
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	35.3727	37.7756	39.9324
DBO en el efluente, mg/l	2.0332	0.9288	0.0077
Temperatura en el efluente, °C	13.2812	12.7145	11.6758
Temperatura promedio en el humedal, °C	13.2911	12.7245	11.6857
Ancho máximo absoluto de celda, m	2.7753	2.8180	2.8980
Ancho del humedal, m	27.9202	32.1170	50.6218
Largo del humedal, m	111.6807	128.4678	202.4873
Velocidad, m/d	2.2385	1.9460	1.2346
Numero de Reynolds	5.48925E-09	4.70222E-09	2.90329E-09

	Material 3		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6709	4.3088	12.1095
Área del humedal, m ²	1589.8220	2564.7400	7208.0180
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.2481	38.8070	39.9285
DBO en el efluente, mg/l	3.6771	1.2113	0.0076
Temperatura en el efluente, °C	14.9823	13.7764	11.9668
Temperatura promedio en el humedal, °C	14.9912	13.7863	11.9767
Ancho máximo absoluto de celda, m	3.1563	3.2601	3.4231
Ancho del humedal, m	19.9363	25.3216	42.4500
Largo del humedal, m	79.7452	101.2865	169.8001
Velocidad, m/d	3.1350	2.4682	1.4723
Numero de Reynolds	2.1413E-08	1.63479E-08	9.30331E-09

	Material 4		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6709	4.2603	12.0875
Área del humedal, m ²	1712.1160	2730.9840	7748.4020
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.2481	39.2129	39.9984
DBO en el efluente, mg/l	3.6771	1.2985	0.0080
Temperatura en el efluente, °C	14.9810	13.6066	11.8978
Temperatura promedio en el humedal, °C	14.9905	13.6166	11.9077
Ancho máximo absoluto de celda, m	2.7618	2.8657	3.0007
Ancho del humedal, m	20.6889	26.1294	44.0125
Largo del humedal, m	82.7555	104.5176	176.0500
Velocidad, m/d	3.0209	2.3919	1.4201
Numero de Reynolds	2.32133E-08	1.7745E-08	1.00764E-08

	Material 5		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6725	4.1916	12.3136
Área del humedal, m ²	1908.9080	2993.9890	8795.4200
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.5834	39.7692	39.8366
DBO en el efluente, mg/l	3.7851	1.4269	0.0072
Temperatura en el efluente, °C	14.7431	13.3795	11.7944
Temperatura promedio en el humedal, °C	14.7531	13.3895	11.8044
Ancho máximo absoluto de celda, m	2.6682	2.7679	2.8888
Ancho del humedal, m	21.8455	27.3587	46.8920
Largo del humedal, m	87.3821	109.4347	187.5678
Velocidad, m/d	2.8610	2.2845	1.3329
Numero de Reynolds	3.88485E-08	2.9953E-08	1.67681E-08

	Material 6		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6718	4.2084	12.2846
Área del humedal, m ²	1855.4060	2922.4870	8530.9450
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.4205	39.6353	39.8463
DBO en el efluente, mg/l	3.7323	1.3950	0.0073
Temperatura en el efluente, °C	14.8580	13.4337	11.8235
Temperatura promedio en el humedal, °C	14.8680	13.4436	11.8335
Ancho máximo absoluto de celda, m	0.1330	0.1382	0.1443
Ancho del humedal, m	21.5372	27.0300	46.1816
Largo del humedal, m	86.1488	108.1201	184.7262
Velocidad, m/d	2.9020	2.3122	1.3534
Numero de Reynolds	7.90399E-08	6.07194E-08	3.40782E-08

	Material 7		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6709	4.2428	12.1417
Área del humedal, m ²	1757.1720	2791.2950	7987.9580
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.2481	39.3572	39.9609
DBO en el efluente, mg/l	3.6771	1.3308	0.0078
Temperatura en el efluente, °C	14.9805	13.5472	11.8709
Temperatura promedio en el humedal, °C	14.9902	13.5572	11.8808
Ancho máximo absoluto de celda, m	0.0265	0.0276	0.0288
Ancho del humedal, m	20.9593	26.4164	44.6877
Largo del humedal, m	83.8373	105.6654	178.7508
Velocidad, m/d	2.9820	2.3660	1.3986
Numero de Reynolds	3.25885E-07	2.4925E-07	1.41044E-07

De los resultados anteriores, se determina que la combinación que ofrece una remoción más alta de contaminantes y utilizando el área más pequeña, es la combinación de Material 3 (*arena media*) y Planta 1 (*Scirpus*).

Tiempo de residencia hidráulica, d	2.6709
Área del humedal, m ²	1589.8220
Nitrógeno Total en el efluente, mg/l	39.2481
DBO en el efluente, mg/l	3.6771
Ancho máximo absoluto de celda, m	3.1563
Ancho del humedal, m	19.9363
Largo del humedal, m	79.7452
Velocidad, m/d	3.1350
Numero de Reynolds	2.1413E-08

7.4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

De acuerdo a los resultados obtenidos del programa, se puede observar que:

1. El tiempo de residencia hidráulica tiene un valor muy cercano al que indica la literatura.
2. La concentración del N₂ total y DBO en el efluente son menores a lo que indica la norma como límite máximo permisible para su descarga, por lo que el humedal propuesto proporcionará un efluente cuya calidad cumpla con la normatividad mexicana.
3. La diferencia de temperaturas del efluente y promedio del humedal es muy pequeña, como indica la literatura que debe cumplirse.
4. Se respeta la proporción de 3:1 ~ 4:1 de Largo : ancho del humedal, como lo pide el diseño hidráulico.
5. El Número de Reynolds mucho menor que 1, confirmándose así que el flujo del humedal es laminar y que la ley de Darcy (que se utilizó para el diseño) es válida.
6. Se puede utilizar para determinar la combinación de materiales más óptima para la remoción de contaminantes con un área mínima.

Si se compara el resultado de esta serie de cálculos contra los obtenidos mediante el programa, se observa que no son muy diferentes, por lo que el resultado que se obtiene a través del programa es válido.

Obviamente, no se presentan todas las operaciones realizadas, ya que si bien se estiman 157 series de cálculos para llegar al resultado, hay que considerar que cada una de esta serie de cálculos implica de 9 hasta 12 iteraciones para el cálculo del área para remoción de N₂ total, sin mencionar los cálculos de las variables dependientes de la temperatura, así como el cálculo de la densidad, la viscosidad dinámica y la viscosidad cinemática, que también varían con la temperatura, por lo que (para este ejemplo) se realizaron alrededor de 2,198 cálculos individuales. Las ventajas de utilizar el programa propuesto resultan evidentes.

De acuerdo con el desarrollo y los resultados obtenidos en este trabajo, se llega a las siguientes conclusiones:

1. **Una de las principales desventajas de este tratamiento es el de requerir grandes extensiones de terreno** para que se puedan remover los contaminantes hasta los límites deseados. Es por eso que el programa ofrece la ventaja de elegir aquella área que es la mínima y permite una remoción máxima de contaminantes.
2. **El programa aquí elaborado es muy útil** para el cálculo dimensional de los humedales artificiales de flujo horizontal, **al realizar los cálculos con mucha mayor rapidez**, ya que literalmente es capaz de efectuar miles de cálculos, de manera precisa, en pocos segundos.
3. **La eficiencia del programa es buena**, dado que:
 1. El resultado que se obtiene a través de él es algebraicamente lógico, y no varía en absoluto al que se obtiene cuando se hacen los cálculos de manera individual.
 2. El humedal obtenido cumple con las *características de diseño* que garantizan que operará con éxito.
4. **Los datos requeridos para correr el programa son mínimos**, muchos de ellos son de simple *selección* de los materiales usados comúnmente para la construcción de humedales, o de condiciones de operación de las que se conocen los rangos que dan resultados óptimos.
5. **Los cálculos de diseño de humedales obtenidos al usar el programa son un buen estimado** para que éstos operen con éxito, **y puede mejorar su efectividad si se utilizan valores experimentales obtenidos en el laboratorio** (porosidad y conductividad hidráulica del material granular) **para correrlo**.

Aerobio. Se dice del organismo vivo que necesita oxígeno libre (elemental) para su supervivencia.

Anaerobio. Organismo vivo que no necesita oxígeno libre (elemental) para su desarrollo, lo obtienen al descomponer sustancias complejas.

Agua freática. Se conoce como el agua que se encuentra en el subsuelo, su profundidad depende de las condiciones geológicas, topográficas y climatológicas de la región. La superficie del agua se designa como nivel del agua freática.

Aguas costeras. Son las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fija el derecho internacional; así como las aguas marinas interiores, las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar.

Aguas crudas. Son las aguas residuales sin tratamiento.

Aguas nacionales. Las aguas propiedad de la Nación, en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Aguas pluviales. Aquéllas que provienen de lluvias, se incluyen las que provienen de nieve y granizo.

Aguas residuales tratadas. Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reuso en servicios al público.

Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Anóxico. Sin oxígeno libre en presencia de nitratos.

Bienes nacionales. Son los bienes cuya administración está a cargo de la Comisión Nacional del Agua en términos del artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales.

Capacidad nominal. Es la capacidad con que la fosa se conoce comercialmente, asentada en la información del fabricante y referida al número de usuarios.

Carga contaminante. Cantidad de un contaminante expresada en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales.

Coliformes fecales. Grupo de bacterias y bacilos (aerobios y anaerobios facultativos Gram negativos), que habitan en el intestino humano y de los animales de sangre caliente, no esporulan y fermentan la lactosa entre los 44-44.5°C. Son utilizadas como indicadores de la contaminación fecal del agua.

Coliformes totales. Grupo de bacterias y bacilos (aerobios y anaerobios facultativos Gram negativos), que habitan en el intestino humano, en los animales de sangre caliente y en los vegetales, no esporulan y fermentan la lactosa entre los 35-37°C.

Condiciones particulares de descarga. El conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual,

determinados por la Comisión Nacional del Agua para el responsable o grupo de responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.

Contaminantes básicos. Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno⁵, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl de nitritos y de nitratos, expresadas como mg / l de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Contaminantes patógenos y parasitarios. Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

Cuerpo receptor. Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos.

Descarga. Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.

Detritus. Residuos que resultan de la descomposición de tallos y hojas de las plantas de los humedales.

Digestión anaerobia. Es el proceso de metabolismo bacteriano que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno libre, y es capaz de transformar la materia orgánica presente en las aguas residuales principalmente en lodos y biogas.

Digestión fuerte. En química, se dice de una reacción con un *ácido fuerte* o una *base fuerte*, dando como producto sales.

Efluente. Son las descargas de las aguas residuales procedentes de la fosa séptica.

Embalse artificial. Vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina y que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial.

Embalse natural. Vaso de formación natural que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial.

Escorrentía. Corriente de agua que forma la lluvia sobre un terreno. Erosión producida por el agua a lo largo de una pendiente pronunciada.

Estanquidad de la fosa séptica prefabricada. Característica de la estructura que no permite el paso de agua a través de esta.

Estuario. Es el tramo del curso de agua bajo la influencia de las mareas que se extiende desde la línea de costa hasta el punto donde la concentración de cloruros en el agua es de 250 mg/l.

Eutrofización. Es el excesivo enriquecimiento de los ecosistemas acuáticos que tiende a incrementar el desarrollo de los seres vivos y algas nocivas, provocando alteraciones en las cadenas tróficas y una caída del oxígeno disuelto, ya que éstos organismos consumen O₂. Es un fenómeno muy extendido en las aguas costeras de las naciones desarrolladas.

Fosa séptica prefabricada. Elemento de tratamiento, diseñado y construido para recibir las descargas de aguas residuales domiciliarias que, al proporcionar un tiempo de retención adecuado, es capaz de separar parcialmente los sólidos suspendidos, digerir una fracción de la materia orgánica presente y retener temporalmente los lodos, natas y espumas que se generan.

Gram negativos. Se dice de las bacterias que pierden calor durante la prueba de identificación donde se le agrega la *solución G*.

Grieta. Abertura producida en una fosa séptica producto de la carga exterior que tiene como mínimo un ancho de 0.25 mm y una longitud de 300 mm.

Herbáceo. Se aplica a las plantas pequeñas de tallo tierno, duran generalmente sólo un año.

Humedales naturales. Las 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, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos, originadas por la descarga natural de acuíferos.

Humificación. Proceso de formación del humus (conjunto de materias orgánicas descompuestas o en proceso de transformación que constituyen la capa más externa de un suelo; la cantidad de humus determina la riqueza agrícola de cada suelo), mediante la alteración y descomposición de sustancias orgánicas depositadas sobre el suelo, como hojas y ramas, por la acción de los ácidos, bacterias, microorganismos, etc.

Infiltración. Paso de agua a través de una superficie permeable.

Influyente. Son las aguas residuales domésticas que entran al tanque séptico.

Juntear. Acoplamiento o unión de varios elementos mecánicos o piezas que forman una estructura. Espacio estrecho que queda entre piedras o ladrillos de una pared, entre tejas, entre maderas en un mueble, etc.

Límite máximo permisible. Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

Metales pesados y cianuros. Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o

fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros.

Mineralización. Transformar una sustancia en mineral, generalmente por la intervención de agentes externos. Fosilización.

Muestra compuesta. La que resulta de mezclar el número de muestras simples. 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.

Muestra simple. La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo.

Nitrógeno total de Kjeldahl. Es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal, en forma conjunta.

Parámetro. Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua.

Promedio diario (P. D.). Es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro grasas y aceites, es el promedio ponderado en función del caudal, y la media geométrica para los coliformes fecales, de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

Promedio mensual (P. M.). Es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (Promedio diario).

Registro de inspección. Acceso que permite la inspección y limpieza de la fosa séptica; este registro, en ciertos casos, puede corresponder a la misma tapa de la fosa séptica.

Reuso en servicios al público con contacto directo. Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

Reuso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional. Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Riego no restringido. 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.

Riego restringido. 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.

Río. Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar.

Sólidos suspendidos (SS). Sólidos insolubles que flotan en la superficie o están en suspensión en aguas residuales u otros líquidos.

Sistema de alcantarillado urbano o municipal. Es el conjunto de obras y acciones que permiten la prestación de un servicio público de alcantarillado, incluyendo el saneamiento, entendiéndose como tal la conducción, tratamiento, alejamiento y descarga de las aguas residuales.

Substrato. Es el medio que sirve como soporte y superficie para que los microorganismos puedan reducir los contaminantes orgánicos en CO₂, metano y nuevos microorganismos, se compone de suelo, arena, grava y roca.

Suelo. Cuerpo receptor de descargas de aguas residuales que se utiliza para actividades agrícolas.

Taninos. Sustancia presente en la corteza de algunos árboles, como los robles y castaños, de gran poder astringente, que se usa para curtir pieles y en farmacia.

Tasa de infiltración. Volumen de agua capaz de infiltrarse de forma natural por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo.

Tratamiento convencional. Son los procesos de tratamiento mediante los cuales se remueven o estabilizan los contaminantes básicos presentes en las aguas residuales.

Uso en riego agrícola. La utilización del agua destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.

Uso público urbano. La utilización de agua nacional para centros de población o asentamientos humanos, destinada para el uso y consumo humano, previa potabilización.

CNA. Comisión Nacional del Agua.

DBO. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DQO. Demanda Química de Oxígeno.

ECOL. Ecológico.

EPA. Environment Protection Agency.

IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

INE. Instituto Nacional de Ecología.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

NOM. Norma Oficial Mexicana.

NMX. Norma Mexicana.

SEMARNAT. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SS. Sólidos Suspendidos.

SST. Sólidos Suspendidos Totales.

- 1) ARMANDO RIVAS HERNÁNDEZ, ANTONIO RAMÍREZ GONZÁLEZ, DISEÑO Y DIAGNOSTICO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LECHOS DE PLANTAS ACUÁTICAS (WETLANDS), 1999.
- 2) LARA B. JAIME ANDRÉS, DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES, INSTITUTO CATALÁN DE TECNOLOGÍA, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, MASTER EN INGENIERIA Y GESTIÓN AMBIENTAL, BARCELONA, MAYO DE 1999.
- 3) DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK, MANUEL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS, LIMUSA NORIEGA EDITORES, 1996.
- 4) ESCALANTE ESTRADA V., SÁNCHEZ GUERRERO M., POZO ROMÁN F., RIVAS HERNÁNDEZ A., IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROCESOS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO, PRIMERA EDICIÓN. SEPTIEMBRE, (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, 2000.
- 5) HAMMER DONALD A., DESIGNING CONSTRUCTED WETLANDS FOR NITROGEN REMOVAL. WATER SCIENCE TECHNOLOGY, 1994.
- 6) HAMMER DONALD A., CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT, MUNICIPAL, INDUSTRIALLY AGRICULTURAL, LEWIS PUBLISHERS, 1989.
- 7) HERNÁNDEZ MUÑOZ AURELIO, SANEAMIENTO Y ALCANTARILLADO, COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, COLECCIÓN SEINOR, ESPAÑA, 1992.
- 8) ISIDRO TAVIRA MARTÍNEZ, ANNE M. HANSEN HANSEN, SANEAMIENTO RURAL, LIBRO II, 3º SECCIÓN, TEMA 3, MANUAL DE DISEÑO DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, 1994.
- 9) JIMÉNEZ CISNEROS BLANCA ELENA,(2001) LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN MÉXICO CAUSAS, EFECTOS Y TECNOLOGÍA APROPIADA LIMUSA NORIEGA EDITORES, 2001, PÁG. 29-315.
- 10) JOSÉ COLLI MISSET, PAQUETES TECNOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE EXCRETAS Y AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES LIBRO II, 3ª. EDICIÓN TEMA 3.3, (SEMARNAP, CNA, IMTA)., 1997.
- 11) JULIE K. CRONK, SIOBHAN FENNESSY, WETLAND PLANTS BIOLOGY AND ECOLOGY. LEWIS PUBLISHER, 2001.
- 12) METCALF, HEDÍ, WASTEWATER ENGINEERING TREATMENT DISPOSAL REUSE, MAC GRAW HILL INTERNATIONAL, THIRD EDITION, CIVIL ENGINEERING.
- 13) METCALF, HEDÍ, TRATAMIENTO Y DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES, EDITORIAL LABOR, 1997.
- 14) RIGOLA LAPEÑA MIGUEL, TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES, AGUAS DE PROCESO Y RESIDUALES. ALFAOMEGA 1ª EDICIÓN, BARCELONA ESPAÑA, 1999, . PÁG. 137-155.
- 15) ROMERO ROJAS JAIRO A., TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN. ALFAOMEGA 2ª EDICIÓN, COLOMBIA, 1999, PÁG. 191-217.
- 16) ROMERO ROJAS JAIRO A., TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN. ALFAOMEGA 3ª EDICIÓN, COLOMBIA, 1999, PÁG. 28-29.

- 17) SANS FONFRIA R. RIBAS JOAN DE PABLO, INGENIERÍA AMBIENTAL CONTAMINACIÓN Y TRATAMIENTO, ALFAOMEGA, EDITORES BOIXAREU, 1999.
- 18) U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT, DESIGN MANUAL CONSTRUCTED WETLANDS AND AQUATIC PLANT SYSTEMS FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT, 1988.
- 19) U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT A TECHNOLOGY ASSESSMENT, 1993.
- 20) U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY REGION III, LUISE DAVIS, PENNSYLVANIA, A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS, A GUIDE TO CREATING WETLANDS FOR: AGRICULTURAL WASTEWATER, DOMESTIC WASTEWATER. COAL MINE DRAINAGE STORMWATER.

DIRECCIONES DE INTERNET.

www.cna.gob.mx, 2007

www.cna.gob.mx/ecna/espaniol/publicaciones/subsector, 2006

www.economia.gob.mx, 2003

www.inegi.gob.mx, 2007

www.salud.gob.mx/apps/htdocs/estadísticas/mortolidad/, 2001

www.semarnat.com.mx, 2007