



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Humedales artificiales como
sistema de tratamiento de
aguas residuales**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Emmanuel Jaciel Díaz Mendoza

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



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.

Dedicatoria

A mis padres por haberme acompañado en este viaje: a mi madre por su amor, comprensión y apoyo, y a mi padre por su esfuerzo diario.

A mis hermanos con los cuales he pasado tantas cosas, pero especialmente a mi hermanita Rubí por ser mi compañera en aventuras y por todos los momentos buenos y malos que hemos pasados juntos.

A la UNAM que me abrió las puertas para cambiarme la vida, pero especialmente a la Facultad de Ingeniería en la cual pase días y noches durante más de cuatro años; al CELE en el cual siempre podía refugiarme y abrirme a nuevas posibilidades; a todos mis profesores los cuales siempre estaban dispuestos a compartir todo su conocimiento.

Agradecimientos

Gracias a mi asesor el M.I Rodrigo Sepúlveda Hirose, a los sinodales por su tiempo invertido en mi trabajo, y a todos mis profesores los cuales siempre estaban dispuestos a compartir todo su conocimiento.

Gracias a la dirección, a la directora la Lic. Lorna Angélica López Nicolás y a los trabajadores del Bosque de San Juan de Aragón por permitirme levantar muestras en el humedal artificial ubicado en dicho bosque.

Gracias al laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y la directora la Biol. Natasha Carime Villaseñor Hernández, y demás trabajadores por prestarme el laboratorio para realizar mis pruebas.

ÍNDICE

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| Índice de Tablas..... | III |
| Índice de Figuras..... | V |
| Índice de Ecuaciones..... | VII |
| Introducción | 1 |
| Objetivo general..... | 3 |
| Objetivos particulares..... | 3 |
| Capítulo 1: Marco teórico | 4 |
| 1.1 El ciclo del agua | 4 |
| 1.1.1 El ciclo hidrológico | 4 |
| 1.1.2 El ciclo urbano del agua | 6 |
| 1.2 El agua residual | 8 |
| 1.2.1 Generalidades | 8 |
| 1.2.2 Consideraciones ambientales y de salud pública..... | 8 |
| 1.2.3 Caracterización del agua residual y evaluación de su calidad | 13 |
| 1.2.4 El tratamiento del agua residual | 20 |
| 1.2.5 Sistemas de tratamiento de las aguas residuales | 36 |
| 1.2.6 Disposición final del agua residual y reutilización | 41 |
| 1.3 Conceptos básicos de hidráulica de canales | 41 |
| 1.3.1 Geometría de un canal..... | 42 |
| 1.3.2 Tipos de flujo..... | 42 |
| 1.3.3 Ecuaciones fundamentales del flujo unidimensional permanente..... | 44 |
| 1.3.4 Flujo uniforme..... | 45 |
| 1.4 Conceptos básicos de comportamiento de suelos | 46 |
| 1.4.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos..... | 46 |
| 1.4.2 Ley de Darcy y coeficiente de permeabilidad | 48 |
| Capítulo 2: Marco histórico..... | 50 |
| 2.1 Contexto histórico del agua en México | 50 |
| 2.1.1 Obras hidráulicas para usos domésticos..... | 50 |
| 2.1.2 Aprovechamiento agrícola del agua | 51 |
| 2.1.3 El comercio colonial y los ríos | 52 |
| 2.1.4 La llegada de los españoles..... | 52 |
| 2.1.5 La higiene y salud pública | 53 |
| 2.1.6 Los nuevos sistemas..... | 54 |
| 2.1.7 Los pozos artesianos | 55 |
| 2.1.8 Empresas privadas de agua potable | 55 |
| 2.1.9 El agua ¿Un factor de poder?..... | 56 |
| 2.1.10 La legislación | 57 |
| 2.1.11 Caso particular: Querétaro y los conflictos por el agua | 58 |
| 2.1.12 Caso particular: La Ciudad de México | 60 |
| 2.1.13 El tratamiento del agua residual en México | 73 |
| 2.1.14 El uso de los humedales como sistema de tratamiento | 73 |
| 2.2 Situación actual del agua en México | 74 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2.1 Situación ambiental | 74 |
| 2.2.2 Situación social..... | 88 |
| 2.2.3 Situación económica | 89 |
| 2.3 Desarrollo sustentable..... | 94 |
| 2.3.1 El desarrollo sustentable..... | 94 |
| 2.3.2 Las dimensiones del desarrollo sustentable | 95 |
| 2.3.3 Educación ambiental..... | 97 |
| Capítulo 3: Marco jurídico y normativo..... | 99 |
| 3.1 La constitución política de los Estados Unidos Mexicanos..... | 99 |
| 3.2 Ley de aguas nacionales..... | 99 |
| 3.3 Reglamentos | 100 |
| 3.4 Normas | 100 |
| 3.4.1 Las NOM y NMX | 103 |
| 3.4.2 Las normas oficiales mexicanas | 103 |
| Capítulo 4: Los humedales artificiales..... | 110 |
| 4.1 Generalidades | 110 |
| 4.1.1 ¿Qué son los humedales artificiales?..... | 110 |
| 4.1.2 Clasificación de los humedales artificiales..... | 111 |
| 4.1.3 Componentes de los humedales artificiales | 118 |
| 4.1.4 Mecanismos de remoción..... | 124 |
| 4.1.5 Eficiencia esperada | 134 |
| 4.1.6 Aplicaciones de los humedales | 143 |
| 4.2 Diseño | 146 |
| 4.2.1 Elección del tipo de humedal..... | 147 |
| 4.2.2 Requerimientos del tratamiento anterior | 147 |
| 4.2.3 Humedales de flujo a superficie libre | 148 |
| 4.2.4 Humedales de flujo subsuperficial..... | 158 |
| 4.3 Construcción | 162 |
| 4.3.1 Bermas y diques..... | 162 |
| 4.3.2 Revestimiento impermeable y sustratos | 163 |
| 4.3.3 Estructuras de control de entrada y salida del flujo | 164 |
| 4.4 Operación, mantenimiento y control | 167 |
| 4.4.1 Manejo de la vegetación..... | 168 |
| 4.4.2 Control de fauna molesta | 168 |
| 4.4.3 Monitoreo | 169 |
| 4.4.4 Mantenimiento de las estructuras..... | 169 |
| Capítulo 5: Aplicación | 170 |
| 5.1 Estudio de Caso: Revisión del humedal del Bosque de San Juan de Aragón. | 170 |
| 5.1.1 Muestreo, y resultados pruebas de campo y laboratorio..... | 183 |
| 5.1.2 Análisis de los resultados y recomendaciones..... | 185 |
| Capítulo 6: Conclusiones..... | 187 |
| Bibliografía..... | 189 |

Índice de Tablas

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1-1. Principales enfermedades relacionadas con el agua..... | 12 |
| Tabla 1-2. Características de un agua residual urbana..... | 14 |
| Tabla 1-3. Patógenos comunes transportados por el agua..... | 17 |
| Tabla 1-4. Composición típica del agua residual doméstica cruda..... | 19 |
| Tabla 1-5. Tipos y número de microorganismos típicamente presentes en las aguas residuales domésticas crudas..... | 19 |
| Tabla 1-6. Periodos de diseño..... | 21 |
| Tabla 1-7. Factores a considerar en la elección de procesos y operaciones unitarias..... | 26 |
| Tabla 1-8. Operaciones, procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes en el agua residual..... | 28 |
| Tabla 1-9. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios..... | 29 |
| Tabla 1-10. Factores que afectan el rendimiento de los procesos de tratamiento secundario típicos..... | 30 |
| Tabla 1-11. Efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección y dimensionamiento de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario..... | 30 |
| Tabla 1-12. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento acuáticos..... | 39 |
| Tabla 1-13. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento por humedales..... | 40 |
| Tabla 1-14. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento terrestres..... | 41 |
| Tabla 2-1. Número de estaciones climatológicas e hidrométricas..... | 74 |
| Tabla 2-2. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador DBO5 en 2015..... | 76 |
| Tabla 2-3. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador DQO en 2015..... | 77 |
| Tabla 2-4. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador SST en 2015..... | 78 |
| Tabla 2-5. No. de sitios por clasificación de calidad de agua subterránea, salinidad en SDT, 2015..... | 79 |
| Tabla 2-6. Usos de acuerdo a la clasificación del REPDA..... | 80 |
| Tabla 2-7. Usos consuntivos por tipo de fuente, 2015..... | 81 |
| Tabla 2-8. Procesos principales de potabilización, 2015..... | 86 |
| Tabla 2-9. Descargas de aguas municipales y no municipales..... | 86 |
| Tabla 2-10. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales 2015..... | 87 |
| Tabla 2-11. Títulos de concesión o asignación inscritos en el REPDA..... | 90 |
| Tabla 2-12. Derechos por explotación, uso o aprovechamiento de aguas superficiales, 2015 (pesos por metro cúbico)..... | 92 |
| Tabla 2-13. Derechos por explotación, uso o aprovechamiento de aguas subterráneas, 2015 (pesos por metro cúbico)..... | 92 |
| Tabla 2-14. Recaudación por el cobro de derechos y conceptos (En millones de pesos a precios del 2015)..... | 93 |
| Tabla 2-15. Inversiones por sector de origen del recurso (En millones de pesos)..... | 93 |
| Tabla 2-16. Inversiones por rubro de aplicación (En millones de pesos)..... | 94 |
| Tabla 3-1. Normas mexicanas relacionadas al sector agua..... | 102 |
| Tabla 3-2. Límites Máximos Permisibles para Contaminantes Básicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales..... | 105 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 3-3. Límites Máximos Permisibles para Metales Pesados y Cianuros en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales..... | 106 |
| Tabla 3-4. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal | 107 |
| Tabla 3-5. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público | 108 |
| Tabla 3-6. Clasificación de lodos en función de su contenido de metales pesados | 109 |
| Tabla 3-7. Clasificación de lodos en función de su contenido de patógenos y parásitos..... | 109 |
| Tabla 3-8. Aprovechamiento de Biosólidos. | 109 |
| Tabla 4-1. Materiales filtro usados en humedales artificiales | 121 |
| Tabla 4-2. Características de los animales encontrados en los humedales artificiales. | 123 |
| Tabla 4-3. Mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales artificiales. | 124 |
| Tabla 4-4. Grupos de bacterias responsables por la descomposición de varios contaminantes | 126 |
| Tabla 4-5. Remoción de Demanda bioquímica de oxígeno en humedales FWS | 135 |
| Tabla 4-6. Remoción de Demanda bioquímica de oxígeno en humedales de flujo subsuperficial | 135 |
| Tabla 4-7. Remoción de sólidos suspendidos totales en humedales FWS | 136 |
| Tabla 4-8. Remoción del amonio y nitrógeno en humedales FWS | 137 |
| Tabla 4-9. Remoción del fósforo en humedales FWS..... | 138 |
| Tabla 4-10. Remoción de metales en humedales FWS..... | 139 |
| Tabla 4-11. Remoción de metales a través de un humedal de flujo subsuperficial en Hardin, Kentucky..... | 140 |
| Tabla 4-12. Remoción de metales de acuerdo a la longitud recorrida por el flujo en humedales FWS.. | 140 |
| Tabla 4-13. Reducción de la temperatura del agua por efecto de pasar por el humedal FWS..... | 140 |
| Tabla 4-14. Remoción de contaminantes orgánicos prioritarios en humedales | 141 |
| Tabla 4-15. Remoción de patógenos en humedales artificiales | 142 |
| Tabla 4-16. Concentraciones de contaminantes producidas por el sistema en un efluente de humedal artificial típico. | 143 |
| Tabla 4-17. Recomendaciones de diseño para humedales de flujo a superficie libre..... | 146 |
| Tabla 4-18. Valores del factor de resistencia “a” para humedales FWS..... | 149 |
| Tabla 4-19. Constantes para los contaminantes en los que aplica la ecuación 4-12..... | 153 |
| Tabla 4-20. Constantes para los contaminantes en los que aplica la ecuación 4-22..... | 157 |
| Tabla 5-1. Parámetros de contaminantes medidos en el efluente de la Planta de Tratamiento de San Juan de Aragón..... | 172 |
| Tabla 5-2. Parámetros de contaminantes medidos en el Lago del Bosque de San Juan de Aragón ... | 173 |
| Tabla 5-3. Especies vegetales comprendidas en el sistema de humedales artificiales. | 179 |
| Tabla 5-4. Áreas y flujos establecidos para el sistema de humedales artificiales | 179 |
| Tabla 5-5. Resultados del análisis de campo y de laboratorio: Temperatura, pH, Conductividad, Sólidos disueltos, DBO5, Sólidos Suspendidos T., Coliformes fecales, Nitrógeno y Fósforo. | 184 |
| Tabla 5-6. Eficiencias obtenidas por el humedal de flujo subsuperficial, el humedal de flujo superficial y la eficiencia total del sistema. | 184 |
| Tabla 5-7. Tabla de comparación de niveles de contaminación entre lo que marca la NOM-001-SEMARNAT- 1996 y los niveles del caudal al salir del sistema de humedales..... | 185 |

Índice de Figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1-1. El ciclo hidrológico | 5 |
| Figura 1-2. Ciclo urbano del agua | 7 |
| Figura 1-3. Relaciones entre el ciclo hidrológico y el ciclo urbano del agua | 7 |
| Figura 1-4. Eutrofización. Proceso de envejecimiento en la evolución ecológica. | 10 |
| Figura 1-5. Costo de inversión para tratamiento primario avanzado en función del gasto a tratar | 32 |
| Figura 1-6. Costo de inversión para lodos activados en función del gasto a tratar..... | 33 |
| Figura 1-7. Costo de inversión para filtros biológicos en función del gasto a tratar. | 33 |
| Figura 1-8. Costo de inversión para lagunas aeradas en función del gasto a tratar..... | 34 |
| Figura 1-9. Costo de inversión para lagunas de estabilización en función del gasto a tratar | 34 |
| Figura 1-10. Costo de inversión para humedales artificiales en función del gasto a tratar | 35 |
| Figura 2-1. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2015..... | 75 |
| Figura 2-2. Calidad del Agua, DBO5 | 76 |
| Figura 2-3. Calidad del Agua, DQO..... | 77 |
| Figura 2-4. Calidad del Agua, SST..... | 78 |
| Figura 2-5. Calidad del Agua, SDT. | 79 |
| Figura 2-6. Volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2006-2015. (en miles de hm ³)..... | 81 |
| Figura 2-7. Volumen en las 180 presas principales en (hm ³) | 82 |
| Figura 2-8. Mapa, principales presas en México | 83 |
| Figura 2-9. Productividad del agua en los DR por año..... | 84 |
| Figura 2-10. Población nacional con cobertura de agua potable entubada..... | 85 |
| Figura 2-11. Población nacional con cobertura de alcantarillado | 85 |
| Figura 2-12. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2015 | 87 |
| Figura 2-13. Comparativo Recaudación - Monto Presupuestario..... | 90 |
| Figura 2-14. Tarifas del Agua para los 3 usos en las principales ciudades de México en 2015 (Pesos por metro cúbico). | 91 |
| Figura 2-15. Dimensiones del concepto sustentabilidad | 96 |
| Figura 3-1. Nivel jerárquico de los instrumentos legales que regulan el uso de los recursos naturales. | 99 |
| Figura 4-1. Clasificación de los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales..... | 112 |
| Figura 4-2. Configuración de un humedal de flujo a superficie libre..... | 113 |
| Figura 4-3. Arreglo de sistema más común en humedales de flujo a superficie libre..... | 113 |
| Figura 4-4. Configuración de un humedal de flujo subsuperficial horizontal..... | 114 |
| Figura 4-5. Arreglo de sistema más común en humedales de flujo subsuperficial horizontal..... | 114 |
| Figura 4-6. Configuración usual de los humedales verticales de flujo ascendente | 115 |
| Figura 4-7. Configuración usual de los humedales verticales de flujo descendente | 116 |
| Figura 4-8. Diferentes combinaciones para sistemas de humedales artificiales híbridos o combinados..... | 117 |
| Figura 4-9. Esquema de los humedales de sistemas flotantes. | 118 |
| Figura 4-10. Procesos de transformación y remoción del nitrógeno | 127 |
| Figura 4-11. Secuencia de transformación del nitrógeno..... | 128 |
| Figura 4-12. Procesos de transformación del nitrógeno en un humedal FWS | 128 |
| Figura 4-13. Procesos de transformación del fósforo en un humedal FWS | 131 |
| Figura 4-14. Relaciones en los procesos de transformación y remoción del fósforo | 131 |
| Figura 4-15. Esquema de un humedal para agua pluvial | 144 |
| Figura 4-16. Ejemplo de berma exterior construida..... | 163 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4-17. Ejemplo de berma interior construida..... | 163 |
| Figura 4-18. Distribución de los flujos de acuerdo a las estructuras de entrada, salida y redistribución | 164 |
| Figura 4-19. Entrada por tubo perforado sumergido | 165 |
| Figura 4-20. Entrada por gaviones de rocas..... | 165 |
| Figura 4-21. Entrada por T giratoria..... | 165 |
| Figura 4-22. Salida por vertedero ajustable..... | 166 |
| Figura 4-23. Salida por sección intercambiable..... | 166 |
| Figura 4-24. Salida por arreglo de codo de 90° | 167 |
| Figura 5-1. Ubicación del humedal dentro del lago del Bosque de San Juan de Aragón..... | 171 |
| Figura 5-2. Diagrama de flujo del agua dentro del sistema de humedales artificiales..... | 174 |
| Figura 5-3. Canales de conducción en el sistema. | 175 |
| Figura 5-4. Sedimentador en el sistema. | 176 |
| Figura 5-5. Humedal artificial de flujo subsuperficial y Humedal artificial de flujo superficial en el sistema. | 176 |
| Figura 5-6. Muro gavión en el sistema..... | 177 |
| Figura 5-7. Distribución de la vegetación en el sistema de humedales artificiales | 178 |
| Figura 5-8. Esquema de distribución de los elementos del sistema de humedales artificiales..... | 180 |
| Figura 5-9. Diagrama de flujo del proceso del sistema de humedales artificiales | 181 |
| Figura 5-10. Perfil de los parámetros medidos por etapa del sistema de humedales artificiales..... | 182 |

Índice de Ecuaciones

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (1-1) Ecuación para el gasto medio en zonas habitacionales y condiciones normales | 22 |
| (1-2) Ecuación para el gasto mínimo | 22 |
| (1-3) Ecuación para el gasto máximo instantáneo | 22 |
| (1-4) Ecuación para la variación máxima instantánea de las aportaciones | 22 |
| (1-5) Ecuación para el gasto máximo extraordinario | 23 |
| (1-6) Ecuación para la pendiente de un canal | 42 |
| (1-7) Ecuación para el radio hidráulico de un canal | 42 |
| (1-8) Ecuación para el tirante medio de un canal | 42 |
| (1-9) Ecuación para el número de Reynolds..... | 43 |
| (1-10) Ecuación para el número de Froude | 43 |
| (1-11) Ecuación de continuidad..... | 44 |
| (1-12) Ecuación de la energía | 44 |
| (1-13) Ecuación de la energía para flujo turbulento y pendiente del canal menor a 8° | 44 |
| (1-14) Principio de conservación aplicado a la ecuación de la energía | 44 |
| (1-15) Ecuación de la cantidad de movimiento..... | 45 |
| (1-16) Ecuación de Chezy..... | 45 |
| (1-17) Ecuación de Manning para el coeficiente “C” | 46 |
| (1-18) Ecuación de Manning para la velocidad | 46 |
| (1-19) Ecuación del peso específico de la masa del suelo | 47 |
| (1-20) Ecuación del peso específico de la fase sólida del suelo | 47 |
| (1-21) Ecuación del peso específico relativo de la masa del suelo | 47 |
| (1-22) Ecuación del peso específico relativo de la fase sólida del suelo | 47 |
| (1-23) Ecuación de la relación de vacíos..... | 48 |
| (1-24) Ecuación de la porosidad..... | 48 |
| (1-25) Ecuación del grado de saturación | 48 |
| (1-26) Ecuación del contenido de agua o humedad | 48 |
| (1-27) Ecuación que relaciona a la porosidad y a la relación de vacíos | 48 |
| (1-28) Ecuación de la ley de Darcy | 48 |
| (1-29) Ecuación del gradiente hidráulico | 49 |
| (4-1) Ecuación química de transformación de nitrógeno orgánico en amoníaco..... | 128 |
| (4-2) Ecuación química de la transformación de aminoácidos en amoníaco..... | 129 |
| (4-3) Ecuación química de la transformación de la urea en amoníaco | 129 |
| (4-4) Ecuación química de la fase 1 de la nitrificación | 129 |
| (4-5) Ecuación química de la fase 2 de la nitrificación | 129 |
| (4-6) Ecuación química de la reacción total de la nitrificación..... | 129 |
| (4-7) Ecuación química de la desnitrificación..... | 130 |
| (4-8) Ecuación de Manning para la velocidad de flujo en humedales artificiales de flujo superficial | 148 |
| (4-9) Ecuación de relación entre el coeficiente de Manning y el factor de resistencia..... | 148 |
| (4-10) Ecuación de longitud máxima de las celdas del sistema de humedales..... | 149 |
| (4-11) Ecuación simplificada para flujo medio del humedal..... | 149 |
| (4-12) Ecuación básica para reactores de flujo pistón (de predicción de la calidad de remoción de contaminantes para el modelo volumétrico para humedales de flujo superficial) | 150 |
| (4-13) Ecuación del tiempo de retención hidráulica para humedales de flujo superficial | 150 |
| (4-14) Ecuación del área para humedales de flujo superficial según el modelo volumétrico | 151 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (4-15) Ecuación modificada del área para humedales de flujo superficial según el modelo volumétrico..... | 151 |
| (4-16) Ecuación de la constante del contaminante a determinada temperatura..... | 152 |
| (4-17) Ecuación para la remoción de los sólidos suspendidos totales para el modelo volumétrico en humedales de flujo superficial..... | 153 |
| (4-18) Ecuación para la concentración del nitrógeno total a la salida del sistema para el modelo volumétrico en humedales de flujo superficial..... | 153 |
| (4-19) Ecuación para la remoción del fósforo total para el modelo volumétrico en humedales de flujo superficial..... | 154 |
| (4-20) Ecuación para la remoción de coliformes fecales para el modelo volumétrico en humedales de flujo superficial..... | 154 |
| (4-21) Ecuación de la tasa de carga hidráulica..... | 154 |
| (4-22) Ecuación de predicción de la calidad de remoción de contaminantes para el modelo de carga por área en humedales de flujo superficial..... | 155 |
| (4-23) Ecuación del área de un humedal para el modelo de carga por área en humedales de flujo superficial..... | 155 |
| (4-24) Ecuación de Darcy..... | 158 |
| (4-25) Ecuación general de velocidad para flujos..... | 158 |
| (4-26) Ecuación para el gasto combinada con la ecuación de Darcy..... | 158 |
| (4-27) Ecuación para el ancho mínimo aceptable para un humedal de flujo subsuperficial..... | 159 |
| (4-28) Ecuación para el área de un humedal de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 159 |
| (4-29) Ecuación de la constante de temperatura para la remoción de amoníaco cuando $T=0^{\circ}\text{C}$ en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 160 |
| (4-30) Ecuación de la constante de temperatura para la remoción de amoníaco cuando $T=1^{\circ}\text{C}$ en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 160 |
| (4-31) Ecuación de la constante de temperatura para la remoción de amoníaco cuando $T>1^{\circ}\text{C}$ en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 160 |
| (4-32) Ecuación de la constante de nitrificación a 20°C en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 160 |
| (4-33) Ecuación de la constante para la remoción de nitrato cuando $T=0^{\circ}\text{C}$ en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 161 |
| (4-34) Ecuación de la constante para la remoción de nitrato cuando $T>1^{\circ}\text{C}$ en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 161 |
| (4-35) Ecuación para remoción de sólidos suspendidos totales en humedales de flujo subsuperficial para el modelo volumétrico..... | 161 |
| (4-36) Ecuación para la remoción de contaminantes en humedales de flujo subsuperficial para el modelo de carga por área..... | 161 |

Introducción

El agua es un recurso indispensable para el ser humano, es por eso que a través de la historia las grandes civilizaciones siempre se han asentado cerca de cuerpos de agua, y éstos han contribuido al desarrollo de la ciudad en cuestión: el río Yangtzé Kiang y la civilización China; el río Nilo en Egipto; los ríos Tigris y Éufrates en lo que se conoció como Mesopotamia; y claro, el lago de Texcoco en Tenochtitlán.

En el momento actual en el que se encuentra México, pero sobre todo la Ciudad de México, el agua es un recurso el cual se debe aprovechar de manera inteligente y planeada. Por el galopante crecimiento demográfico que presenta la ciudad con una capacidad en cuestión de infraestructura del agua muchas veces rebasada, es imperante tomar acciones que puedan solventar los problemas de esta índole, no sólo para beneficio de los seres humanos, sino también para beneficio del medio ambiente.

La infraestructura del agua, en general, se enfoca en la distribución del agua potable a la población; sin embargo, el desalojo de las aguas residuales, la mayoría de las veces, parece no ser prioridad para las autoridades; e incluso cuando se cuenta con la capacidad de desalojar este tipo de agua, no siempre se tienen los espacios para su tratamiento, y se vierte en cuerpos de agua. Alarmantemente, muchos cuerpos de agua no solamente son contaminados con aguas residuales municipales sino también con aguas provenientes de la industria. Ese es el caso del río Atoyac el cual se encuentra completamente contaminado y representa un riesgo importante para la salud. Esto debido a las descargas industriales que se llevaron a cabo durante mucho tiempo en el territorio del estado de Puebla y las descargas municipales que aún se llevan a cabo en su recorrido por el territorio del estado de Oaxaca. Por otra parte, el comportamiento que se ha observado en el abastecimiento público es alarmante; en el año 2014 se registró una disponibilidad de agua renovable per cápita de 3 736 (m³/hab/año) y para el año 2030 se pronostica que la disponibilidad per cápita disminuirá a 3 253 (m³/hab/año)¹. Ambas disponibilidades muy inferiores a la que se tenía en 1950 que era de 18 035 (m³/hab/año)². No es un secreto que muchos científicos han expresado que una escasez de agua se avecina. En el siglo pasado, era muy común descargar las aguas residuales en ríos, lagos, o incluso el océano (práctica que algunas veces sigue ocurriendo).

El desarrollo sustentable se ha convertido en un tema importante en el presente siglo, pero las tecnologías antiguas no pueden remplazarse todas al mismo tiempo no solo por razones económicas sino también por razones técnicas. Es por eso que, muchos investigadores se han enfocado en la búsqueda de fuentes de energía renovables. En un momento tan crítico en temas relacionados al agua, y con la búsqueda de nuevas alternativas de abastecimiento y de tratamiento de agua, no solamente para consumo humano, sino también para saneamiento de aguas residuales. En los últimos años, una alternativa ha llamado la atención de muchos investigadores, los humedales artificiales.

Aunque probablemente los humedales naturales han sido utilizados para la disposición de aguas residuales desde que el agua residual ha sido colectada, con descargas documentadas que datan de 1912; los humedales construidos por el hombre, humedales artificiales, son más recientes. Las investigaciones de este tipo de tratamiento iniciaron en Europa durante la década de 1950, y EEUU

¹ SEMARNAT, CONAGUA. (diciembre 2015). Atlas del Agua en México 2015. D.F., México: CONAGUA. Pág. 28.

² SEMANART, CONAGUA. (abril 2014). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. D.F., México: CONAGUA. Pág. 21.

durante la década de 1960³. En México la investigación aún se encuentra muy poco desarrollada, sin embargo, existen ya algunos humedales en el territorio nacional.

Lo anterior aunado a la poca información, especialmente en español, acerca del tema (diseño, construcción, operación y mantenimiento), es que motiva el presente trabajo.

En el primer capítulo se presentan las bases para el entendimiento de los humedales y su diseño. Temas como el agua residual, los contaminantes en ésta y los efectos causados de verterla sin tratamiento en cuerpos de agua. También los relacionados a la hidráulica de canales como la geometría de éstos, los tipos de flujos, y las ecuaciones que modelan un flujo en un canal. Además, los relacionados al comportamiento de suelos como lo es el flujo de agua en suelos, o relaciones volumétricas y gravimétricas. Dichos temas cubren dos de los tres elementos básicos de un humedal: el agua y el suelo.

En el segundo capítulo se presenta una pequeña semblanza histórica que nos recuerda distintos periodos de México y cómo ha evolucionado la relación de nuestro país con el agua. Este capítulo se aborda desde una perspectiva social, cultural, económica, y técnica, dándonos un panorama de las obras hidráulicas construidas a través del tiempo, el avance del tratamiento de las aguas residuales, el uso de humedales como tecnología depuradora, así como un diagnóstico de la situación actual del agua y las directrices que deben guiar su manejo en el marco del desarrollo sustentable.

En el tercer capítulo se enlistan las normas, leyes y reglas que enmarcan el manejo del agua en nuestro país, pero sobre todo que versan sobre el tratamiento de aguas residuales: desde su conducción, tratamiento, límites permisibles y disposición final de ésta.

El cuarto capítulo nos habla de los humedales artificiales: qué son, cómo funcionan, de qué elementos se componen, y las directrices para el diseño, construcción, operación, y mantenimiento, haciendo énfasis en las ecuaciones de modelado de predicción de concentraciones y eficiencia del sistema. Así como recomendaciones en la elección de los distintos elementos como lo son la vegetación, suelo o sustrato utilizado para obtener los resultados deseables.

El capítulo 5 es la revisión del sistema de humedales artificiales que se encuentra en el Bosque de Aragón que es auxiliar en el tratamiento del agua en el lago del bosque con problemas de eutrofización. Se analiza su estructura y componentes del sistema, la situación en la que se encuentra, y se discuten los resultados obtenidos de las pruebas de campo y de laboratorio a partir de las muestras tomadas.

El capítulo 6 es un balance de la utilización de un humedal artificial como sistema de tratamiento de aguas residuales.

³ Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters US EPA, pág 4.

Objetivo general

Elaborar una guía sobre humedales artificiales, enfocada en el diseño de éstos, pero también incluyendo la construcción, operación y mantenimiento del proyecto.

Objetivos particulares

1. Dar un panorama general del agua en el país a través del tiempo para poder establecer la situación de la que venimos, la situación en la que nos encontramos y la situación deseable en un futuro.
2. Presentar y describir los distintos tipos de humedales, así como el proceso de diseño, construcción, operación y mantenimiento.
3. Especificar los distintos modelos de diseño de humedales artificiales; analizar las ventajas y desventajas; realizar una comparativa entre estos y de esta forma recomendaciones acerca del uso de cada uno.
4. Analizar un humedal artificial en operación, presentar el estado actual y dar recomendaciones con base en los resultados de las pruebas de campo y de laboratorio realizadas.

Capítulo 1: Marco teórico

1.1 El ciclo del agua

1.1.1 El ciclo hidrológico

En la Tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrósfera, que se extiende desde unos quince kilómetros arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litósfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrósfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico.

El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se evapora desde los océanos y la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera. El vapor de agua se transporta y se eleva hasta condensarse, para después precipitarse sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo y descargar en los ríos como escorrentía superficial, o infiltrarse en él y correr a través del suelo como flujo subsuperficial. La mayor parte interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede infiltrarse profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa⁴. En la figura 1-1 se muestra el ciclo de manera esquemática.

⁴ Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Pág. 2.

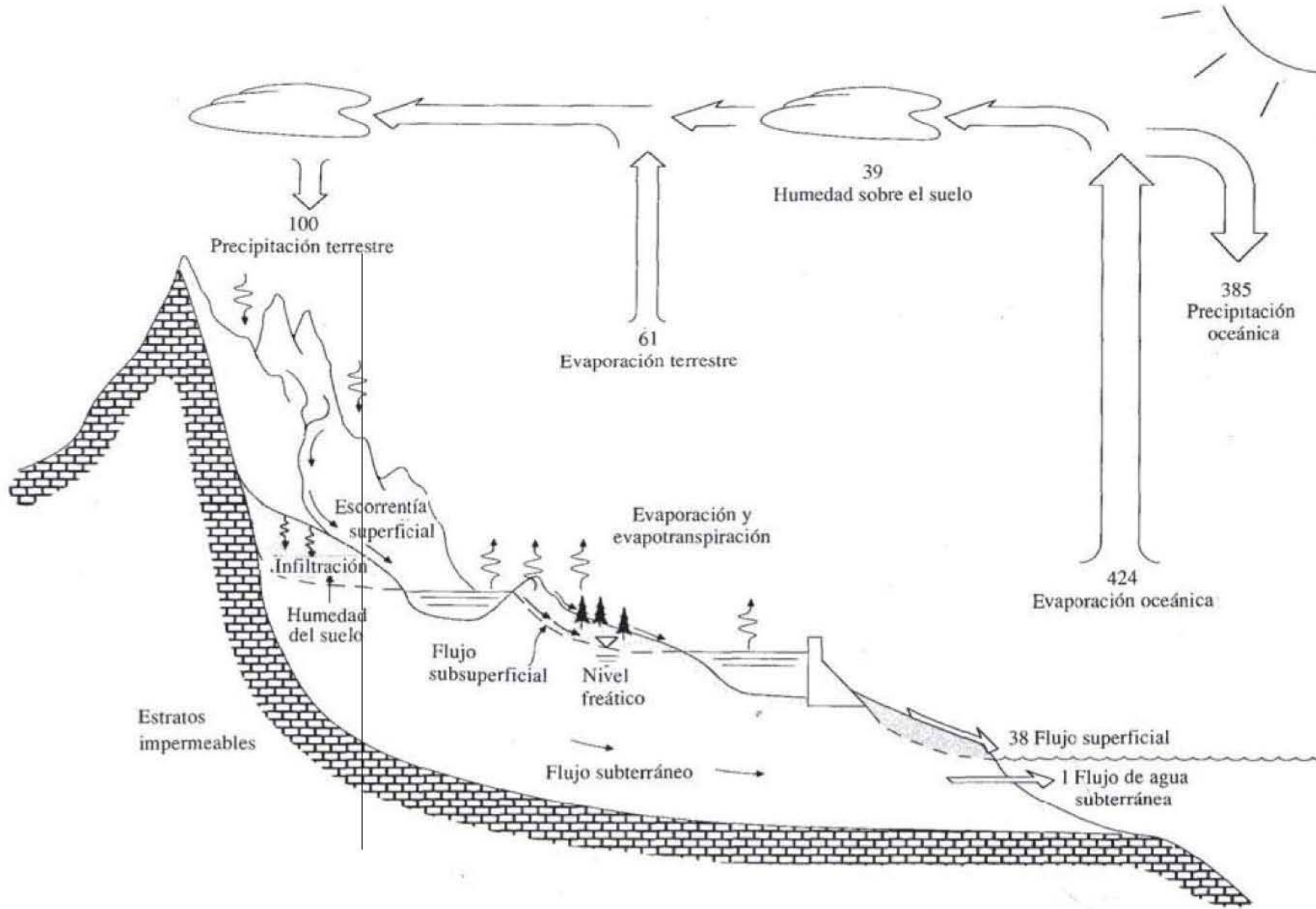


Figura 1-1. El ciclo hidrológico. Fuente: Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Pág. 3.

1.1.2 El ciclo urbano del agua

A diferencia del ciclo hidrológico del agua, en este ciclo si puede verse claramente un inicio y un fin, aun incluso cuando el agua vuelva a entrar al mismo sistema.

El ciclo del agua en el medio urbano puede entenderse, a través de 7 elementos⁵ los cuales se describen a continuación y se ilustran en la figura 1-2:

1. La captación, que es el punto o puntos de origen del agua para un abastecimiento;
2. La planta de tratamiento de agua para consumo humano, que es el lugar donde se procesa el agua para poder darle la calidad suficiente para el consumo de las personas.
3. La red de distribución, que es el conjunto de elementos que hacen que el agua se conduzca hacia el siguiente elemento;
4. Puntos de consumo (domésticos, industriales o de servicios), es el destino al cual se quiere llevar el agua para el aprovechamiento de la población o de privados;
5. Red de drenaje y alcantarillado, es el encargado de desalojar las aguas residuales de los puntos de consumo y llevarlas al siguiente elemento. En este punto están contenidas la red de drenaje pluvial y de drenaje sanitario, independientemente si es un sistema combinado o separado;
6. La planta de tratamiento de aguas residuales, es el lugar en el que se le da tratamiento al agua para que pueda ser reutilizada en distintos servicios o pueda retornarse al medio ambiente.
7. La disposición final, ésta puede entenderse como final porque de aquí puede salir del sistema urbano, siendo dispuesta en cuerpos de agua, o puede volver a entrar en él para su reutilización en distintos servicios.

El ciclo hidrológico interactúa con el ciclo urbano en dos puntos: en la captación, en la cual el agua se deriva del medio natural al medio urbano, y en la disposición final, en la cual el agua puede regresar al medio natural. Además, con las precipitaciones, el agua del medio natural entra en el medio urbano directamente a la red de drenaje, y al contrario, con la evaporación, el agua puede salir del medio urbano para entrar al medio natural. Estas relaciones pueden verse en el diagrama de la figura 1-3.

⁵ Soriano Rull, A., & Pancorbo Floristan, F. J. (2012). Suministro, Distribución y Evacuación Interior de Agua Sanitaria. Marcombo. Pág.98.



Figura 1-2. Ciclo urbano del agua. Fuente: Soriano Rull, A., & Pancorbo Floristan, F. J. (2012). Suministro, Distribución y Evacuación Interior de Agua Sanitaria. Marcombo. Pág.97.

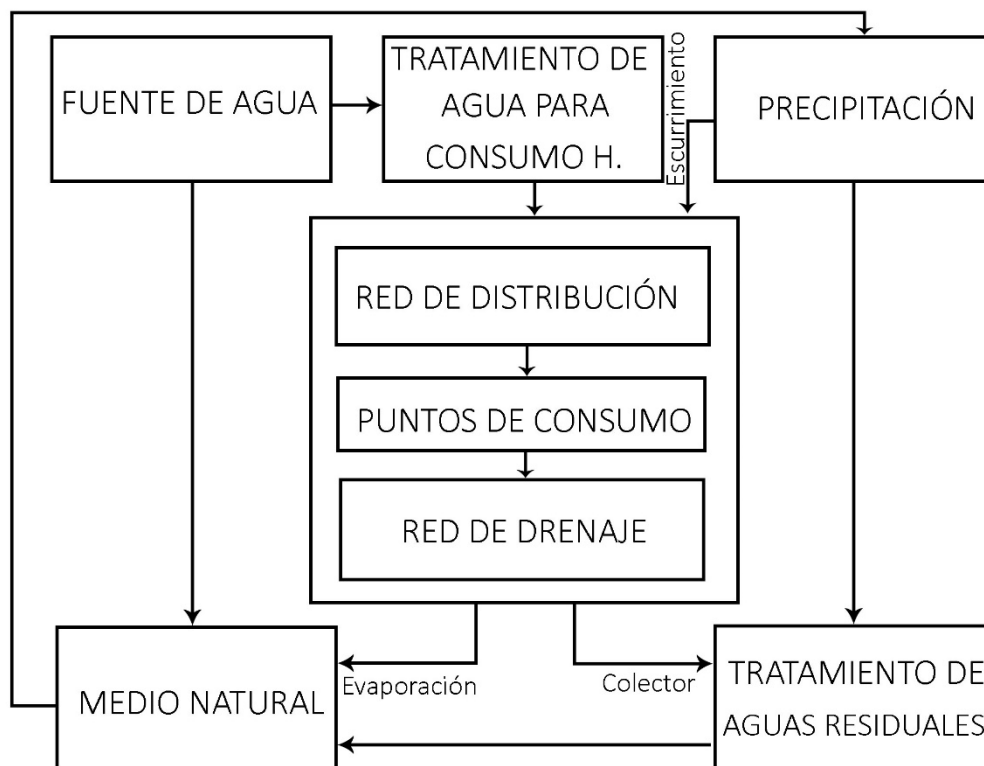


Figura 1-3. Relaciones entre el ciclo hidrológico y el ciclo urbano del agua. Fuente: Meré Alcocer, F. (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro. Pág. 19.

1.2 El agua residual

1.2.1 Generalidades

Las aguas residuales son las aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica (aguas residuales domésticas) o la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en el núcleo urbano, así como las aguas de lluvia.

Atendiendo a los aspectos cuantitativos y cualitativos conviene hacer la siguiente clasificación:

- A) Aguas blancas o pluviales: Son aguas procedentes de drenajes o de escorrentía superficial. Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes y escasa contaminación. Sus caudales, en una superficie urbanizada, son de 50 a 200 veces superiores a los correspondientes a las medias de las descargas domésticas, comerciales e industriales. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la lluvia de la atmósfera, o por el lavado de las superficies y terrenos.
- B) Aguas grises o urbanas: Son las aguas procedentes de los vertidos de la actividad humana, doméstica, comercial, industrial, agrícola, etc. Sus caudales son menos y más continuos, y su contaminación y mucho mayor⁶.

Las aguas residuales tienen como características organolépticas el color y el olor. El color es una característica cualitativa para clasificar sus condiciones. Si las aguas tienen un color café ligero, son aguas recientemente contaminadas, con un tiempo inferior a las 6 horas; si son grises de ligero a medio son aguas que han tenido alguna descomposición o han permanecido algún tiempo en los sistemas de captación; si su color es entre gris oscuro a negro, es agua séptica que ha tenido una descomposición bacteriana anaerobia. El color oscuro puede provenir de la formación de sulfitos (sulfito ferroso) originado por la combinación del ácido sulfhídrico producido en condiciones anaerobias con un metal divalente contenido en el agua como el hierro u otro.

Por otra parte, cuando las aguas tienen ya un proceso de descomposición anaerobia, éstas liberan productos olorosos como el ácido sulfúrico, u otros con olores más fuertes como el indol, estacol, cadaversina y el mercaptano. Muchos de estos procesos depende de la temperatura, la cual varía según la estación y la geografía⁷.

1.2.2 Consideraciones ambientales y de salud pública

Impacto de las aguas residuales en cuerpos de agua

Las aguas residuales presentan dos tipos de impactos sobre el medio receptor, causados por su canalización y descarga. El primer impacto causado a corto plazo, se produce al combinarse las aguas residuales con las aguas contenidas en el medio receptor que incrementan su grado de contaminación, además de su volumen. El segundo impacto se produce a largo plazo, por la acumulación de los contaminantes en los lechos de corrientes o cuerpos de agua.

Como consecuencia de estos dos impactos, las aguas residuales presentan efectos negativos en cuatro niveles principalmente. A nivel estético, producen materiales en suspensión sobre las aguas

⁶ Trapote Jaume, A. (2011). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Universidad de Alicante. Pág. 15.

⁷ Meré Alcocer, F. (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro. Pág. 123.

receptoras; a nivel físico-químico, producen un efecto de shock en el cambio de características; a nivel biológico, producen efectos en la vida acuática de los cuerpos de agua; y a nivel bacteriológico, limitan la utilización posterior de las aguas⁸.

Efectos en el ambiente y la biota

Para saber qué cantidad de desecho puede ser asimilado por un cuerpo de agua, es preciso conocer el tipo de contaminantes descargados y la manera en cómo éstos afectan la calidad del agua. También debe estudiarse cómo afectan la calidad del agua factores naturales como la herencia mineral de la cuenca, la topografía y el clima de la región.

El lugar común para la evacuación de las aguas residuales de una comunidad es un cuerpo natural de agua. Esta forma de desagüe, denominada evacuación por dilución, ha sido empleada por muchos municipios, con poco o ningún tratamiento. El proceso natural denominado autodepuración ha evitado problemas en muchos casos, pero la industrialización y la demografía urbana siempre crecientes, acompañadas de un retraso en la construcción de plantas de tratamiento, han llevado a una contaminación severa de las aguas de la mayor parte del país. Los resultados de esta contaminación son:

- a) Los microorganismos patógenos de las aguas residuales convierten las aguas naturales en las que desaguan en inseguras como fuentes de suministro, para el recreo y para los criaderos de ostras y mariscos.
- b) La descomposición de la materia orgánica inestable despojará al agua de su oxígeno, y por lo tanto de peces, porque morirán.
- c) También los ácidos, aceites, y otros materiales tóxicos exterminarán a los peces y cualquier otra vida acuática o harán que resulten incomedibles.
- d) La putrefacción de las materias orgánicas producirá olores y condiciones desagradables, quizá hasta el extremo de afectar adversamente las propiedades del agua.

La contaminación de una corriente por residuos industriales o domésticos en cantidades excesivas, rompe el ciclo de la cadena alimenticia en los cuerpos receptores o a veces incluso en el entorno completo. Por lo que se refiere a la normalidad del mecanismo equilibrado de los organismos, del suministro de oxígeno y de la luz solar, la excesiva contaminación introduce generalmente demasiada materia orgánica inestable en la corriente. La consecuencia es que algunos organismos, especialmente aquellos que proliferan en condiciones anaerobias, se reproducen en forma creciente, con los consiguientes olores y otras molestias. Sin embargo, aguas abajo, a una distancia que depende de la cantidad de contaminación, de la velocidad y condiciones de la corriente, se restablece el ciclo normal. Esta restauración es lo que se denomina autodepuración⁹.

Ciertos residuos industriales son tóxicos para los organismos e impiden con su presencia el normal desarrollo del ciclo, y la recuperación del mismo no se restablecerá hasta que el material venenoso se haya disipado por dilución o por otros medios.

⁸ Meré Alcocer, F. (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro. Pág. 109.

⁹ César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.45.

Eutrofización

La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento de los lagos. Progresan aun sin tener la ayuda del hombre. La contaminación antrópica, sin embargo, acelera el envejecimiento natural y acorta considerablemente la vida del receptor acuático.

La secuencia general del proceso de eutrofización de un lago se puede resumir en la figura 1-4. Éste consiste en una progresión gradual (sucesión ecológica) de una etapa a la otra, basada en cambios en el grado de nutrición o productividad. La etapa más joven del ciclo se caracteriza por una concentración muy baja de nutrientes de las plantas y una productividad biológica pequeña. Tales lagos se llaman oligotróficos (del griego “oligo”, que significa poco, y trófico que significa alimentar, de tal forma que oligotrófico significa pocos nutrientes). En una etapa posterior de la sucesión, el lago se hace mesotrófico (“meso” igual a intermedio). A continuación el lago puede llegar a ser eutrófico (“eu” igual a bien) o altamente productivo. La etapa final antes de la desaparición puede ser una tierra húmeda, o una marisma.

El enriquecimiento y la sedimentación son los principales contribuyentes al proceso de envejecimiento. El lago gradualmente se va rellenando acumulándose las plantas y sedimentos en el fondo y haciéndose más pequeño por la invasión de la vegetación en las orillas, pudiendo llegar a ser tierra firme. La extinción de un lago, en consecuencia, es un resultado del enriquecimiento, productividad, degradación y sedimentación¹⁰.

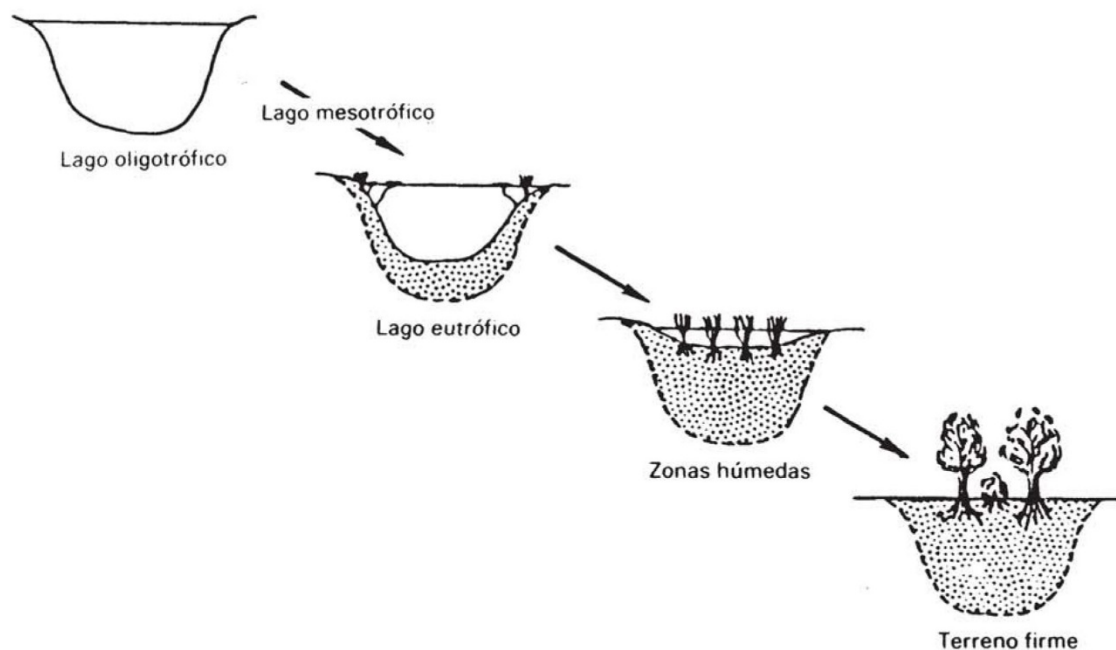


Figura 1-4. Eutrofización. Proceso de envejecimiento en la evolución ecológica. Fuente: RAMALHO, R. (1990). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVERTÉ. Pág. 23.

Enfermedades relacionadas al agua

Gracias al carácter esencial que tiene el agua en la vida humana, ésta también tiene un gran potencial de transmitir una gran variedad de enfermedades si es que está contaminada o no se encuentra apta para consumo humano. En los países desarrollados, las enfermedades relacionadas al agua son raras

¹⁰ RAMALHO, R. (1990). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVERTÉ. Pág. 23-24.

debido a un suministro de agua eficiente, y un desalojo y tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, en los países en vías de desarrollo, la situación respecto a sistemas de suministro y de disposición de aguas no siempre es la más favorable. Millones de personas mueren cada año como consecuencia de un inadecuado saneamiento, y aunque la información es difícil de obtener, la OMS da algunos datos de la magnitud del problema.

- Cada año cerca de cinco millones de personas mueren de enfermedades relacionadas al agua.
- Dos millones de estas muertes son de niños.
- En los países en vías de desarrollo, el 80% de las enfermedades están relacionadas al agua.
- En algún momento dado, la mitad de la población sufrirá de una o más de las principales enfermedades relacionadas al agua.
- Un cuarto de los niños nacidos en los países en vías de desarrollo habrá muerto antes de cumplir los 5 años, la gran mayoría de enfermedades relacionadas al agua.

En promedio, en este momento, 400 millones de personas están sufriendo de gastroenteritis, 200 millones de esquistosomiasis, 160 millones de malaria y 30 millones de oncocercosis. Estas enfermedades, las cuales están relacionadas al agua, también pueden tener otros factores del entorno que puedan ser importantes.

Todas estas enfermedades para propagarse requieren de una fuente de infección, una ruta de transmisión, y la exposición de un organismo vivo susceptible. El control de estas enfermedades, entonces, está basado en curar a los que padecen dichas enfermedades, en romper la ruta de transmisión y en proteger a la población susceptible. Las medidas ingenieriles para el control tienen como preocupación esencial romper la ruta y las medidas médicas tienen como preocupación de las otras dos partes de la cadena de infección.

Las enfermedades relacionadas al agua pueden ser debidas a virus, bacterias, protozoarios o gusanos. Y, aunque su control y detección está basada en parte en la naturaleza del agente de infección, es comúnmente más útil considerar los aspectos relacionados al agua y la propagación de la infección.

En la tabla 1-1 se muestran las enfermedades más comunes que pueden relacionarse al agua.

Tabla 1-1. Principales enfermedades relacionadas con el agua. Fuente: Tebbutt, T. (1998). *Principles of Water Quality Control*. Butterworth-Heinemann. Pág. 53

| Enfermedad | Tipo de relación con el agua | Muertes anuales estimadas |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Cólera Giardiasis Hepatitis infecciosa Leptospirosis Paratifoidea Tularemia Tifoidea | Transmitidas por la ingesta | 4 millones |
| Disentería Amebiana Disentería Bacilar Gastroenteritis | Transmitidas por la ingesta o contacto con el agua para higiene (o ausencia de ésta) | 1 millón |
| Ascariasis Conjuntivitis Enfermedades diarreicas Lepra Sarna Sepsis cutánea y úlceras Dermatofitosis Tiña Tracoma | Transmitidas por contacto con el agua para higiene (o ausencia de ésta) | Relativamente pocas muertes pero un gran número de casos. |
| Dracunculiasis Esquistosomiasis | Desarrolladas en el agua | 200 mil |
| Paludismo Malaria Oncocercosis Tripanosomiasis africana Fiebre amarilla | Insectos vectores relacionados al agua | 1 millón |

Enfermedades transmitidas por la ingesta

Estas enfermedades son las más comunes de todas las relacionadas al agua y ciertamente las que causan más daño a nivel global incluyendo a las enfermedades esparcidas por la contaminación del agua por materia fecal y orina de origen humano. Con este tipo de enfermedades, la infección ocurre cuando el organismo patógeno accede al agua la cual es consumida por una persona que no tiene inmunidad a la enfermedad. La mayoría de las enfermedades tienen una ruta de transmisión fecal-oral, y los brotes están caracterizados por enfermedades simultaneas entre las personas usando la misma fuente del agua. Es importante recalcar que estas enfermedades que pueden ser transportadas por el agua, también pueden ser esparcidas por otra ruta que implique la ingesta de materia fecal de una persona que sufra de dicha enfermedad.

Enfermedades transmitidas por el contacto

En este caso, ya que son debidas a un abastecimiento inadecuado de agua para higiene personal y limpieza, el esparcimiento de las infecciones puede llegar a ser reducido suministrando más agua, en la cual la calidad de la misma se convierte en una consideración secundaria.

Este tipo de enfermedades incluye un gran número de infecciones de ojos y pie, y pese a que no son normalmente fatales, sí tienen un serio efecto de debilitamiento en los que las padecen. Estas enfermedades tienden a ser asociadas a climas calurosos y secos, y su incidencia puede ser significativamente reducida si hay abundante agua para aseo personal.

Enfermedades con el agua como hábitat de los parásitos

Un gran número de enfermedades dependen de organismos patógenos que pasan parte de su ciclo de vida en el agua o en un huésped intermediario que vive en el agua, por lo cual las infecciones humanas no pueden ocurrir por ingesta inmediata del organismo excretado por algún huésped o por contacto con el mismo. Muchas de estas enfermedades son causadas por gusanos, los cuales infectan al huésped y producen huevos que son descargados en las heces fecales y la orina. La infección comúnmente ocurre por penetración de la piel más que por el consumo del agua.

Desafortunadamente la esquistosomiasis es comúnmente esparcida por sistemas de irrigación, los cuales, a menos de que sean cuidadosamente diseñados y operados, tienden a proveer de un hábitat que se ajusta a los parásitos o a los huéspedes. Además, incrementa su propagación por el contacto del agua con los trabajadores agrícolas.

Enfermedades producidas por insectos vectores relacionados al agua

Hay un gran número de enfermedades que son esparcidas por insectos, los cuales se reproducen o se alimentan cerca del agua, así que la incidencia puede ser relacionada con la proximidad del tipo de agua que se ajusta a las preferencias de dichos vectores. Entonces es importante asegurar que el suministro de agua y el desalojo de esta, funcione de manera correcta, provocando así que no se proporcione un hábitat para los vectores¹¹.

1.2.3 Caracterización del agua residual y evaluación de su calidad

Hablar de la calidad del agua es hablar de contaminación en mayor o menor grado. La contaminación se define como la alteración de la calidad natural por la acción humana, definición que puede aplicar para todos los componentes de nuestro ecosistema. El análisis del uso del agua puede incidir en su grado de aprovechamiento. No es la misma calidad del agua para beber, que para regar, ni para fines de vida acuática o para la industria¹².

Para conocer las posibilidades de uso de las aguas residuales urbanas, su peligrosidad potencial, y sus posibles aplicaciones es preciso conocer con detalle las características de la composición y demás factores que conforman los efluentes. Éstos varían mucho ante la presencia o ausencia de industrias y ante las costumbres higiénicas que siga la población.

Se entiende como características del agua residual urbana el conjunto de parámetros que pueden ser necesarios bien para el diseño o control de una planta de tratamiento; o bien para las posibilidades mencionadas anteriormente¹³.

¹¹ Tebbutt, T. (1998). Principles of Water Quality Control. Butterworth-Heinemann. Pág. 51-56.

¹² Meré Alcocer, F. (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro. Pág. 109-110.

¹³ Trapote Jaume, A. (2011). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Universidad de Alicante. Pág. 16.

Tabla 1-2. Características de un agua residual urbana. Fuente: Trapote Jaume, A. (2011). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*. Universidad de Alicante. Pág. 16.

| CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA | |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| PARÁMETRO | ORIGEN |
| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | |
| Sólidos | Abastecimientos, residuos domésticos e industriales |
| Temperatura | Residuos domésticos e industriales |
| Color | Residuos domésticos e industriales |
| Sabor | Agua residual en descomposición, residuos industriales |
| CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS | |
| Orgánicas | |
| Proteínas | Residuos industriales, comerciales y domésticos |
| Carbohidratos | Residuos comerciales y domésticos |
| Grasas y aceites | Residuos industriales, comerciales y domésticos |
| Tensoactivos | Residuos comerciales y domésticos |
| Fenoles | Residuos industriales |
| Pesticidas | Residuos agrícolas |
| Inorgánicas | |
| pH | Residuos industriales |
| Cloruros | Suministro de agua doméstica, residuos domésticos e infiltraciones de aguas subterráneas |
| Alcalinidad | Suministro de agua doméstica, residuos domésticos e infiltraciones de aguas subterráneas |
| Nitrógeno | Residuos agrícolas y domésticos |
| Fósforo | Residuos industriales y domésticos |
| Azufre | Suministro de agua doméstica y residuos industriales |
| Tóxicos | Residuos industriales e infiltraciones de aguas subterráneas |
| Metales Pesados | Residuos industriales |
| Gases | |
| Oxígeno | Introducción de agua doméstica e infiltraciones de aguas superficiales |
| Sulfuro de hidrógeno (H₂S) | Descomposición anaerobia del agua residual |
| Metano (CH₄) | Descomposición anaerobia del agua residual |
| CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS | |
| Protistas | Residuos domésticos |
| Virus | Residuos domésticos |
| Plantas | Aguas superficiales y plantas de tratamiento |
| Animales | Aguas superficiales y plantas de tratamiento |

Parámetros más comunes para caracterizar aguas residuales

Las aguas residuales urbanas presentan distintos contaminantes muy variados, de hecho tantos, que sería difícil encasillarlas en ciertas categorías tomando en cuenta todos ellos, es por eso que hay ciertos parámetros que son más importantes y que son los más comúnmente usados. Los más básicos para diseñar una planta de tratamiento son la DBO₅ y los sólidos suspendidos.

Parámetros físicos

Sólidos

Generalmente, las aguas residuales contienen distintos tipos de sólidos, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a distintas características.

Clasificación según su composición

Sólidos orgánicos

Los glúcidos, lípidos, proteínas, y sus derivados son los grandes grupos de esta clase; son biodegradables y su eliminación por combustión es relativamente sencilla. Este tipo de sólidos también suele llamarse sólidos volátiles.

Sólidos inorgánicos

Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables, y ciertos compuestos como sulfatos, carbonatos, etc. que pueden sufrir algunas transformaciones (fenómenos de óxido-reducción y otros). Este tipo de sólidos también suele llamarse sólidos fijos.

Clasificación según su presentación

Sólidos sedimentables

Son aquellas partículas más gruesas que se depositarán por gravedad, en los fondos de los receptores. Su análisis se realiza por volumetría y gravimetría, previa decantación y tamizado. Generalmente se componen de un 70% de sólidos orgánicos y de un 30% de sólidos inorgánicos.

Sólidos en suspensión

Son aquellas partículas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada, o en forma de suspensión micro-granular. Tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos, pero que son tan ligeras que no llegan a sedimentarse por la acción de la gravedad misma. Se diferencian de los sólidos disueltos porque los sólidos en suspensión se componen de sustancias que no pueden pasar a través de un filtro de 0.45 micrómetros. Generalmente se componen de un 68% de sólidos orgánicos y de un 32% de sólidos inorgánicos.

Sólidos disueltos

Son todos aquellos sólidos que logran pasar por el crisol de *Gooch* aunque una pequeña parte está constituida por coloides (un 10%). Su proporción es de un 40% de productos orgánicos y un 60% de sólidos inorgánicos¹⁴.

Temperatura

El control de la temperatura es importante, porque ésta condiciona no sólo los procesos de depuración biológica (degradación de la materia orgánica y de nitrificación) sino también afecta procesos físicos como la sedimentación (entre otros) dado que la densidad se ve afectada¹⁵.

Parámetros químicos

pH

Mide la concentración de iones hidrógeno en el agua. Un pH elevado indica una baja concentración de iones H⁺, y por tanto, una alcalinización del medio. Por el contrario, un pH bajo indica una acidificación del medio¹⁶.

¹⁴ Seoáñez Calvo, M. (2001). Tratado de gestión del medio ambiente urbano. MUNDI PRENSA. Pág. 56-57.

¹⁵ Trapote Jaume, A. (2011). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Universidad de Alicante. Pág. 18.

¹⁶ Seoáñez Calvo, M. (2001). Tratado de gestión del medio ambiente urbano. MUNDI PRENSA. Pág. 61.

Si las aguas residuales urbanas no contienen vertidos industriales, su pH oscila entre 6.5 y 8.5, valores que no plantean problemas a los procesos de depuración. Fuera de este rango se producen problemas en los procesos biológicos; por ello, en áreas en las que se tienen vertidos industriales, se debe medir el pH a la entrada de la planta por si fuera necesario llevar a cabo una corrección de éste.

Materia orgánica

Dado que la materia orgánica como tal no puede medirse, se hace una medición indirecta a través de los siguientes parámetros:

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno expresada en mg/L (ppm), y consumida en condiciones de ensayo (20°C, presión atmosférica y oscuridad) en un tiempo dado, como consecuencia de la oxidación por vía biológica de las materias biodegradables presentes en el agua residual.

La DBO refleja, por tanto, la materia orgánica biodegradable que existe en el agua residual, indicando el oxígeno necesario para alimentar a los microorganismos aerobios y las reacciones químicas del metabolismo microbiano.

Pero, puesto que la obtención de los resultados de la DBO puede tardar más de 20 días (en función de la temperatura), para el control de la autodepuración natural o de los procesos de depuración se adopta la *Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días* (DBO₅), que da resultados suficientemente aproximados.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno consumida por los cuerpos reductores presentes en el agua residual, sin intervención de los organismos vivos. Como sustancia oxidante se utilizan distintos reactivos como pueden ser el dicromato o el permanganato potásico.

La DQO de un agua residual es, generalmente, mayor que la DBO (en aguas residuales urbanas es del orden de 3 veces mayor) ya que es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente¹⁷.

Carbono orgánico total (COT)

Es un indicador de los compuestos orgánicos, fijos, o volátiles presentes en las aguas residuales. Su medida facilita la estimación de la demanda de oxígeno ligada a los vertidos y establece una correlación con la DBO y la DQO. En presencia de sustancias nitrogenadas, la medida del COT está menos sujeta a interferencias por dichas sustancias que la medida de la demanda total de oxígeno.

Nitrógeno total

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno presente en los compuestos orgánicos aminados y en el amoníaco. El nitrógeno orgánico presente en el agua se encuentra formando parte de compuestos tales como proteínas, polipéptidos y aminoácidos. El método Kjeldahl permite la transformación en amoníaco de los compuestos de origen biológico, pero no la de los compuestos nitrogenados de origen industrial (oximas, hidracina y derivados, etc.), ni el nitrógeno procedente de los nitritos ni los nitratos. Para determinar estos últimos hay que practicar una reducción en medio alcalino¹⁸.

¹⁷ Trapote Jaume, A. (2011). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Universidad de Alicante. Pág. 18-20.

¹⁸ *Ibíd.*, pág. 62-64.

Nitrógeno amoniacal

Expresa el contenido de nitrógeno en forma de ion amoniaco¹⁹.

Parámetros microbiológicos

Todas las formas de microorganismos patógenos se pueden encontrar en las aguas residuales domésticas e incluyen: bacterias, virus, protozoarios y helmintos. Algunos de estos microorganismos son descargados al ambiente por portadores. Aunque es raro que estén presentes los microorganismos que causan algunas de las enfermedades más severas, por seguridad se asume que lo están en número significativo y que representan un peligro para la salud. Afortunadamente sólo unos cuantos microorganismos patógenos en estado viable sobreviven al tratamiento.

En la tabla 1-3 se presentan los patógenos más comunes que son transportados por el agua.

Tabla 1-3. Patógenos comunes transportados por el agua. Fuente: César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.26.

| MICROORGANISMOS | | ENFERMEDADES |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bacterias | <i>Francisella tularensis</i> | Tularemia |
| | <i>Leptospira</i> | Leptospirosis |
| | <i>Salmonella paratyphi (A, B, C)</i> | Paratifoidea (fiebre entérica) |
| | <i>Salmonella typhi</i> | Fiebre tifoidea, fiebre entérica |
| | <i>Shigella (S. Flexneri, S. Sonnei, S. Dysenteriae, S. Boydii)</i> | Shigelosis (disentería bacilar) |
| | <i>Vibrio comma (Vibrio cholerae)</i> | Cólera |
| Virus | <i>Poliomyelitis (3 tipos)</i> | Poliomyelitis aguda, parálisis infantil |
| | Virus desconocidos | Hepatitis infecciosa |
| Protozoarios | <i>Entamoeba histolytica</i> | Amebiasis (disentería amebiana, enteritis amebiana, colitis amebiana) |
| | <i>Giardia lamblia</i> | Giardiasis (enteritis giardia, lamblisis) |
| Helmintos (gusanos parásitos) | <i>Dracunculus medinensis</i> | Dracontiasis (dracunculiasis; dracunculosis; medina; infección serpiente, dragón o gusano-guinéa) |
| | <i>Echinococcus</i> | Equinococosis |
| | <i>Shistosoma (S. Mansoni, S. Japonicum, S. Haematobium)</i> | Squistosomiasis (bilharziasis o enfermedad de "Bill Harris") |

Bacterias

Son microorganismos unicelulares, comúnmente sin color y constituyen la menor forma de vida capaz de sintetizar el protoplasma a partir de su ambiente. Pueden tener forma cilíndrica o de bastón (bacilos), oval o esférica (cocos) o espirales (espirilos). Los desórdenes intestinales son síntomas comunes de la mayoría de las enfermedades transmitidas por las bacterias patógenas transportadas por el agua.

Virus

Son las estructuras biológicas inferiores de las cuales se conoce que contienen toda la información genética necesaria para su propia reproducción. Son tan pequeños que sólo pueden ser observados con la ayuda de un microscopio electrónico. Los virus son parásitos obligados a requerir un huésped

¹⁹ *Ibíd.*, pág. 20.

en donde alojarse. Los síntomas asociados con infecciones causadas por virus transportados por el agua comúnmente involucran desórdenes del sistema nervioso, más que del tracto intestinal.

Protozoarios

Constituyen el nivel inferior de la vida animal. Son organismos unicelulares más complejos que las bacterias y los virus en su actividad funcional. Son organismos auto-contenidos que pueden vivir libremente o en forma parásita. Pueden ser patógenos o no patógenos, microscópicos o macroscópicos. Debido a que son altamente adaptables, los protozoarios están ampliamente distribuidos en las aguas naturales, aunque sólo unos cuantos protozoarios acuáticos son patógenos. Las infecciones causadas por protozoarios se manifiestan por desórdenes intestinales menos severos que los asociados con bacterias.

Helmintos

El ciclo de vida de los helmintos, o gusanos parásitos, frecuentemente incluye dos o más animales huéspedes, uno de los cuales puede ser humano, y la contaminación del agua puede ser causada por el vertido de desechos animales y humanos que contienen helmintos. La contaminación puede ser también a través de especies acuáticas u otros huéspedes, como insectos y caracoles²⁰.

Organismos indicadores

Los organismos patógenos se presentan en las aguas residuales y contaminadas en cantidades muy pequeñas y, además, resultan difíciles de aislar y de identificar. Por ello se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, puesto que su presencia es más numerosa y fácil de comprobar. El tracto intestinal humano contiene innumerables bacterias con forma de bastoncillos, conocidas como organismos coliformes. Aparte de otras clases de bacterias, cada ser humano evacua de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes cada día. Por ello, se considera que la presencia de coliformes puede ser un indicador de la posible presencia de organismos patógenos, y que la ausencia de aquellos es un indicador de que las aguas están libres de organismos que puedan causar enfermedades. Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. El uso de los coliformes como organismos indicadores es problemático debido a que la *Aerobacter* y ciertas clases de *Escherichia* pueden crecer en el suelo. Por lo tanto, la presencia de coliformes no siempre es sinónimo de contaminación con residuos humanos. No obstante, aunque parece ser que las *Escherichia coli* sí son de origen exclusivamente fecal, la dificultad de determinar la *E. coli* sin incluir los coliformes del suelo hace que se use todo el grupo de los coliformes como indicador de la contaminación fecal²¹.

Composición típica de las aguas residuales

El agua residual cruda promedio contienen alrededor del 1 000 mg/l de sólidos en suspensión y solución, esto significa que cerca del 99.9% es agua pura y sólo el 0.1% es la contaminación física, química y biológica del agua. De este 0.1%, la parte de contaminación física está formada por 70% sólidos de tipo orgánico y 30% de tipo inorgánico. Los contaminantes orgánicos se componen de 45% proteínas, 18% carbohidratos, y 7% grasas. De los inorgánicos sin alguna proporción común, se

²⁰ César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.25-1.26.

²¹ Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 109.

componen de arenas, sales y metales²². Las siguientes dos tablas (1-4 y 1-5) muestran valores típicos de los distintos parámetros de las aguas residuales.

Tabla 1-4. Composición típica del agua residual doméstica cruda. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 126.

| Contaminantes | Unidades | Concentración | | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|---------|---------|
| | | Débil | Media | Fuerte |
| Sólidos totales (ST) | mg/l | 350 | 720 | 1 200 |
| Fijos | mg/l | 165 | 355 | 600 |
| Volátiles | mg/l | 185 | 365 | 600 |
| Sólidos disueltos totales (SDT) | mg/l | 250 | 500 | 850 |
| Fijos | mg/l | 145 | 300 | 525 |
| Volátiles | mg/l | 105 | 200 | 325 |
| Sólidos en suspensión totales (SST) | mg/l | 100 | 220 | 350 |
| Fijos | mg/l | 20 | 55 | 75 |
| Volátiles | mg/l | 80 | 165 | 275 |
| Sólidos sedimentables | mg/l | 5 | 10 | 20 |
| Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días, 20°C (DBO₅, 20°C) | mg/l | 110 | 220 | 400 |
| Carbono orgánico total (COT) | mg/l | 80 | 160 | 290 |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/l | 250 | 500 | 1 000 |
| Nitrógeno (total en la forma N) | mg/l | 20 | 40 | 85 |
| Orgánico | mg/l | 8 | 15 | 35 |
| Amoniaco libre | mg/l | 12 | 25 | 50 |
| Nitritos | mg/l | 0 | 0 | 0 |
| Nitratos | mg/l | 0 | 0 | 0 |
| Fósforo (total en la forma P) | mg/l | 4 | 8 | 15 |
| Orgánico | mg/l | 1 | 3 | 5 |
| Inorgánico | mg/l | 3 | 5 | 10 |
| Cloruros | mg/l | 30 | 50 | 100 |
| Sulfato | mg/l | 20 | 30 | 50 |
| Alcalinidad (como CaCO₃) | mg/l | 50 | 100 | 200 |
| Grasa | mg/l | 50 | 100 | 150 |
| Coliformes totales | No./100ml | 106-107 | 107-108 | 107-109 |
| Compuestos orgánicos volátiles (COVs) | µg/l | <100 | 100-400 | >400 |

Tabla 1-5. Tipos y número de microorganismos típicamente presentes en las aguas residuales domésticas crudas. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 127.

| Organismo | Concentración |
|------------------------------|----------------------------------|
| | número/ml |
| Coliformes totales | 10 ⁵ -10 ⁶ |
| Coliformes fecales | 10 ⁴ -10 ⁵ |
| Estreptococos fecales | 10 ³ -10 ⁴ |
| Enterococos | 10 ² -10 ³ |

²² Meré Alcocer, F. (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro. Pág. 110.

| | |
|------------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Shigella</i> | Presentes ^a |
| <i>Salmonella</i> | 10 ⁰ -10 ² |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | 10 ¹ -10 ² |
| <i>Clostridium perfringens</i> | 10 ¹ -10 ³ |
| <i>Mycobacterium tuberculosis</i> | Presentes ^a |
| Cistos de protozoos | 10 ¹ -10 ³ |
| Cistos de giarda | 10 ⁻¹ -10 ² |
| Cistos de cryptosporidium | 10 ⁻¹ -10 ¹ |
| Huevos de helmintos | 10 ⁻² -10 ¹ |
| Virus entericos | 10 ¹ -10 ² |

^a. Los resultados de estos ensayos se suelen clasificar como positivos o negativos en lugar de ser ensayos cuantitativos.

1.2.4 El tratamiento del agua residual

Una vez que se ha definido la calidad del efluente requerida, el diseño de la planta se realiza de acuerdo con la siguiente secuencia de actividades:

1. Aforo, muestreo y pruebas de tratabilidad
2. Evaluación y determinación de los caudales de diseño
3. Alternativas de diagramas de flujo y elección de los procesos u operaciones unitarias
4. Dimensionamiento de las instalaciones físicas
5. Balance de sólidos y demás cálculos requeridos de acuerdo al tren de tratamiento
6. Distribución en el terreno de las instalaciones físicas
7. Preparación de perfiles hidráulicos
8. Elaboración de los planos especificaciones y estimación de los costos

Aforo, muestreo y pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad son pruebas a escala que se llevan a cabo en laboratorio, y cuyos resultados se emplean para establecer dosis aproximadas de sustancias químicas, y para obtener coeficientes cinéticos. El realizar pruebas de tratabilidad tiene los siguientes propósitos:

- a) Establecer si las operaciones y procesos unitarios son adecuados para el tratamiento del agua residual específica.
- b) Obtener los datos e información necesaria para el diseño de las operaciones y procesos unitarios.

El propósito del muestreo es coleccionar una porción de aguas residuales lo suficientemente pequeña en volumen para ser manejada convenientemente en el laboratorio y que, no obstante esto, sea representativa del agua residual que se va a examinar. Debe recogerse en tal forma que no se agregue ni se pierda nada en la porción tomada, y que no se produzca ningún cambio durante el tiempo que transcurra desde la recolección hasta su análisis en el laboratorio.

No puede especificarse la localización de los puntos de muestreo y la recolección de las muestras para todos los proyectos de plantas de tratamiento ya que las condiciones son diferentes para cada caso y hay que adaptar a cada uno el procedimiento a seguir. Sin embargo, se pueden formular las siguientes recomendaciones²³:

²³ César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.69, 1.72.

1. La muestra debe tomarse en donde estén bien mezcladas las aguas residuales. Esto se logra más fácilmente si se localiza el punto de muestreo donde el flujo sea turbulento.
2. Deben excluirse las partículas grandes, considerándose como grandes las que sean mayores de 6 mm.
3. No deben incluirse en el muestreo los sedimentos, crecimientos o material flotante que se haya acumulado en el punto de muestreo.
4. La muestra debe analizarse tan pronto como sea posible. Si se retiene por más de una hora, debe mantenerse fría, pues la descomposición bacteriana de las aguas residuales continúa en el recipiente de muestra. Después de una hora son apreciables los cambios debido a tal descomposición. El enfriar la muestra retarda mucho la acción bacteriana.
5. Debe procurarse que la recolección de muestras sea lo más fácil posible. Los puntos de muestreo deben ser de fácil acceso, tener el equipo adecuado y proteger al personal de las inclemencias del tiempo, pues mientras más fácil sea la toma de muestras, mejor será su ejecución.

Evaluación y determinación de los caudales de diseño

El proceso de evaluar y determinar los caudales de proyecto hace necesario obtener unos caudales medios basados en la población actual y las predicciones de población futura, en la contribución de las aguas industriales y la influencia de la infiltración, y en las aportaciones incontroladas. Una vez determinados los caudales medios, se multiplican por una serie de factores de punta para obtener los caudales punta de proyecto. Tanto para la obtención de los caudales medios como de los factores de punta es necesario tener en cuenta los siguientes factores: (1) obtención y predicción futura de los caudales medios diarios; (2) criterios empleados para la elección de los factores de punta; (3) aplicación de los factores de punta y de caudal mínimo, y (4) elementos de control de los caudales punta existentes aguas arriba de la planta que puedan afectar al diseño de la misma²⁴.

Dado que la mayoría de las plantas de tratamiento se diseñan para las condiciones previstas en el futuro (de 10 a 25 años), los criterios de diseño deben considerar las condiciones existentes al momento en que las instalaciones entren en servicio y las previstas para el horizonte de planeación. Estas últimas se basan en las estimaciones sobre la población a servir y en los estudios de costo-efectividad, para diversos periodos de diseño²⁵.

La Comisión Nacional del Agua recomienda los periodos de diseño que se presentan a continuación.

Tabla 1-6. Periodos de diseño. Fuente: Lineamientos Técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario, CONAGUA 2007.

| Elemento | Periodo de diseño en años |
|-----------------------|---------------------------|
| Red de atarjeas | A saturación |
| Colector y emisor | De 5 a 20 |
| Planta de tratamiento | De 5 a 10 |

Las expresiones a continuación presentadas forman parte del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Libro 1 de la CONAGUA.

²⁴ Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trad.) McGraw-Hill. Pág. 170.

²⁵ César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.75.

La expresión para calcular el valor del gasto medio en zonas habitacionales y condiciones normales es:

$$Q_{med} = \frac{A * P}{86400} \quad (1-1)$$

En donde:

- Q_{med} = Gasto medio de agua residual [l/s]
- A = Aportación de aguas residuales, de acuerdo al uso de suelo [l/hab/día]
- P = Población de proyecto, [hab]
- 86400 = [s/día]

La expresión que se utiliza para calcular el valor del gasto mínimo es:

$$Q_{min} = 0.5 * Q_{med} \quad (1-2)$$

En donde:

- Q_{min} = Gasto mínimo [l/s]
- Q_{med} = Gasto medio [l/s]

La estimación del gasto máximo instantáneo se hace afectando al gasto medio por el coeficiente de variación máxima instantánea (M), por lo que:

$$Q_{MI} = M * Q_{med} \quad (1-3)$$

En donde:

- Q_{MI} = Gasto máximo instantáneo [l/s]
- Q_{med} = Gasto medio [l/s]
- M = Coeficiente de variación máxima instantánea

Para cuantificar la variación máxima instantánea de las aportaciones, se utiliza la fórmula de Harmon, cuya expresión es:

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{P}{1000}}} \quad (1-4)$$

En donde:

M = Coeficiente de variación instantánea de aguas residuales

P = Población servida acumulada hasta el tramo de la tubería considerada

El coeficiente de variación máxima instantánea, o coeficiente de Harmon, se aplica cuando la población acumulada es mayor a los 1 000 habitantes, pero menor a los 63 450.

En caso de que la población acumulada sea menor a 1 000 habitantes el coeficiente se considera constante e igual a 3.8.

En caso de que la población acumulada sea mayor a 63 450, también se considera constante, pero igual a 2.17.

El gasto máximo extraordinario se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{ME} = C_S * Q_{MI} \quad (1-5)$$

En donde:

Q_{ME} = Gasto máximo extraordinario [l/s]

C_S = Coeficiente de seguridad

Q_{MI} = Gasto máximo instantáneo [l/s]

Previendo lo excesos en las aportaciones que puede recibir la red, generalmente por concepto de aguas pluviales, se considera un coeficiente de seguridad que puede ser igual 1.5. Para nuevos asentamientos, siempre y cuando se garantice que las aportaciones pluviales de los lotes no se conecten a los albañales o las atarjeas del alcantarillado sanitario, el coeficiente de seguridad será igual a 1.0.

Alternativas de diagramas de flujo y elección de los procesos u operaciones unitarias

Los diagramas de flujo se elaboran con base en las características de las aguas residuales por tratar, los objetivos del tratamiento, y si están disponibles, los resultados de las pruebas de tratabilidad. Las mejores alternativas de diagramas de flujo se seleccionan después de que éstas han sido evaluadas en términos de su comportamiento, implantación física, requerimientos de energía y costo.

Dependiendo de los constituyentes que deben eliminarse, se puede concebir un número limitado de diferentes diagramas de flujo utilizando las operaciones y procesos unitarios.

Etapas del proceso de tratamiento

Para comprender mejor el proceso de tratamiento de forma integral, se distinguen dos grandes etapas del tratamiento, una ellas es el tratamiento del agua residual en sí, y la segunda es el tratamiento de los lodos, producto del tratamiento anterior.

Tratamiento de la fracción líquida

Pretratamiento

El pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento

y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Como ejemplos de pretratamientos podemos citar el desbaste y dilaceración para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites, y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucciones en los equipos y un desgaste excesivo de los mismos.

Tratamiento primario

En el tratamiento primario se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas tales como el tamizado y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta. En el futuro, las plantas de tratamiento que sólo incluyen tratamiento primario irán quedando desfasadas, conforme se vayan implantando las medidas de la EPA en cuanto a la necesidad de disponer de tratamientos secundarios. Sólo en casos especiales (para aquellas comunidades a las que se dispense de disponer de tratamientos secundarios) se emplearán los tratamientos primarios como único método de tratamiento.

Tratamiento secundario

El tratamiento secundario de las aguas residuales está principalmente encaminado a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario. Se define el tratamiento secundario convencional como la combinación de diferentes procesos normalmente empleados para la eliminación de estos constituyentes, e incluye tratamientos como lodos activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación.

Tratamiento terciario o avanzado

El término «tratamiento avanzado» tiene diversas definiciones. En el contexto de las aguas residuales, se define al tratamiento avanzado como el nivel de tratamiento necesario, más allá del tratamiento secundario convencional, para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención como los nutrientes, los compuestos tóxicos, y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión. Además de los procesos de eliminación de nutrientes, otros procesos u operaciones unitarias habitualmente empleadas en los tratamientos avanzados son la coagulación química, floculación y sedimentación seguida de filtración y carbono activado. Para la eliminación de iones específicos y para la reducción de sólidos disueltos, se emplean métodos menos comunes, como el intercambio iónico o la ósmosis inversa. También se emplea el tratamiento avanzado para diversas posibilidades de reutilización de las aguas residuales para las cuales es preciso conseguir efluentes de alta calidad, como puede el caso del agua empleada para refrigeración industrial o para la recarga de aguas subterráneas. En términos de calidad del efluente, algunos procesos de tratamiento natural (antes llamado tratamiento en el terreno) pueden resultar equivalentes al tratamiento avanzado de las aguas residuales.

Tratamiento de la fracción sólida

Tratamiento de lodos

La mayoría de los procesos que se han descrito están concebidos para el tratamiento de la fracción líquida del agua residual. No obstante, en el proyecto de las plantas de tratamiento, el tratamiento de los lodos obtenidos del agua residual tiene un papel de igual o mayor importancia. Es por ello que

también es preciso conocer los métodos, procesos y operaciones unitarias que se emplean para tratar dichos lodos²⁶.

Elección de los sistemas de tratamiento

Para la elección de los sistemas, el diagrama de flujo, y los procesos u operaciones que conformarán el tren de tratamiento, es preciso contar con los conocimientos teóricos y la experiencia práctica del ingeniero para evaluar las diferentes alternativas.

Las diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias de una planta de tratamiento funcionan como un sistema, por lo que el ingeniero debe abordar el proyecto de la planta desde una perspectiva global, en términos de sistemas. La mayor parte de la selección de procesos se centra en la evaluación y valoración de diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias, así como sus interacciones. La evaluación del proceso no se limita al estudio de las unidades de tratamiento del agua residual, sino que también debe incluir la interacción entre las diferentes alternativas de tratamiento del agua y de los lodos. Con relación a este punto del estudio, un análisis basado en el balance de masas es un factor crítico de la evaluación.

Algunos factores a considerar en la elección se describen en la tabla 1-7:

²⁶ Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 145-147.

Tabla 1-7. Factores a considerar en la elección de procesos y operaciones unitarias. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 193,194.

| Factores a considerar en la elección de procesos y operaciones unitarias | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Factor | Información a considerar |
| Potencial de aplicación del proceso | El potencial de aplicación de un proceso se evalúa con base en la experiencia anterior, datos de plantas a escala industrial, y datos obtenidos en estudio en planta piloto. Si se presentan condiciones nuevas o no usuales, los estudios en planta piloto son fundamentales. |
| Rango de caudal aplicable | El proceso debe corresponder con el intervalo de caudales esperado. Por ejemplo, los estanques de estabilización no son adecuados para caudales muy elevados. |
| Variación de caudal aplicable | La mayoría de las operaciones y procesos unitarios trabajan mejor a caudal constante, a pesar de que pueden tolerar algunas variaciones. Si la variación de caudal es demasiado grande, puede ser necesaria su regulación. |
| Características del agua a tratar | Las características del agua a tratar afectan a los tipos de procesos a utilizar (por ejemplo químicos o biológicos) y las exigencias para su adecuada explotación. |
| Constituyentes inhibidores y no afectados | ¿Qué constituyentes potencialmente inhibidores están presentes? ¿Bajo qué condiciones se manifiestan? ¿Qué constituyentes no se ven afectados por el tratamiento? |
| Limitaciones climáticas | La temperatura afecta a la velocidad de reacción en la mayoría de los procesos químicos y biológicos, y también puede afectar al funcionamiento de las operaciones físicas. Las temperaturas cálidas pueden acelerar la aparición de olores y limitar la dispersión en la atmósfera. |
| Cinética de reacción y selección del reactor | El dimensionamiento de los reactores se basa en la cinética de reacción que gobierna el proceso. Los datos de las expresiones cinéticas suelen deducirse a partir de la experiencia, de la literatura y de los resultados de estudios en planta piloto. |
| Eficacia | La eficacia se suele medir en función de la calidad del efluente, que debe estar de acuerdo con las exigencias formuladas respecto al vertido de efluentes. |
| Residuos del tratamiento | Es necesario conocer o estimar los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos producidos. A menudo se llevan a cabo estudios en planta piloto para la adecuada identificación de los residuos generados. |
| Tratamiento de lodos | ¿Existe alguna limitación que convierta el tratamiento de lodos en un proceso excesivamente caro o inviable? ¿Cómo afecta al rendimiento de las unidades de proceso del líquido las cargas del caudal de recirculación del tratamiento de lodos? La elección del sistema de tratamiento de los lodos debe estar estrechamente relacionada con la elección del sistema de tratamiento de la fracción líquida. |
| Limitaciones ambientales | Factores ambientales tales como la presencia de vientos, direcciones preferentes del viento, o la proximidad a núcleos de población, pueden implicar restricciones sobre la aplicabilidad de determinados procesos de tratamiento, especialmente en el caso de procesos que puedan generar olores. Tanto el tráfico como los ruidos pueden afectar a la ubicación de las instalaciones. Las aguas receptoras cuentan con limitaciones específicas que pueden precisar la eliminación de constituyentes específicos como los nutrientes. |

| Continuación de la tabla | |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Factor | Importancia |
| Necesidades químicas | ¿Qué recursos y en qué cantidades van a ser necesarios a largo plazo para el desarrollo satisfactorio de las operaciones o procesos unitarios? ¿Qué influencia tiene la adición de productos químicos sobre las características de los residuos del tratamiento y sobre el costo del mismo? |
| Necesidades energéticas | Para proyectar sistemas de tratamiento con una relación costo-efectividad satisfactoria es necesario conocer las necesidades energéticas, así como el costo futuro de la energía. |
| Necesidades de otros recursos | ¿Qué recursos adicionales, si los hubiese, son necesarios para el desarrollo satisfactorio del sistema de tratamiento propuesto? ¿Qué incluye la operación o proceso unitario en cuestión? |
| Necesidades de personal | ¿Con cuántos empleados, y con qué nivel de preparación, es preciso contar para la explotación del proceso u operación unitaria? ¿Es posible alcanzar rápidamente dichos niveles de preparación? ¿Qué cursos de preparación serán necesarios? |
| Necesidades de explotación y mantenimiento | ¿Qué necesidades de explotación y mantenimiento adicionales es necesario cubrir? ¿Qué repuestos serán necesarios? ¿Cuál es su costo y disponibilidad? |
| Procesos auxiliares | ¿Qué procesos auxiliares son necesarios? ¿Cómo afectan a la calidad del efluente, especialmente cuando se vuelven inoperantes? |
| Fiabilidad | ¿Cuál es la fiabilidad a largo plazo de la operación o proceso unitario en cuestión? ¿Puede desestabilizarse el proceso fácilmente? ¿Puede hacer frente a cargas de choque periódicas? Si es así, ¿Cómo afectan estas circunstancias a la calidad del efluente? |
| Complejidad | ¿Qué grado de complejidad presenta la explotación del proceso, tanto en condiciones rutinarias como de emergencia? ¿Qué nivel de preparación de los operarios es necesario? |
| Compatibilidad | ¿Pueden emplearse de manera satisfactoria las operaciones y procesos unitarios en conjunción con las instalaciones existentes? ¿Se puede ampliar la planta de manera sencilla? |
| Disponibilidad de espacio | ¿Existe espacio suficiente, no sólo para la implantación de las instalaciones que se están estudiando, sino también para instalaciones futuras? ¿Qué superficie de terreno hay disponible para minimizar el impacto visual de la construcción de las instalaciones? |

Para la selección también deben hacerse algunos análisis como lo son el de tipos de contaminantes que deben que eliminarse, la comparación de rendimientos entre procesos y operaciones unitarias, los factores que afectan el rendimiento en los sistemas y el análisis de costos. Un concentrado de la parte medular de cada uno de los análisis se presenta a continuación en la tabla 1-8.

Tabla 1-8. Operaciones, procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes en el agua residual. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 164, 165.

| Operaciones, procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contaminante | Operaciones unitarias, procesos unitarios o sistemas de tratamiento | |
| Sólidos en suspensión | Desbaste y dilaceración Desarenado Sedimentación Filtración Flotación Adición de polímeros Coagulación/sedimentación Sistemas naturales (tratamiento por evacuación al terreno) | |
| Materia orgánica biodegradable | Variantes de lodos activados Película fija: filtros percoladores Película fija: Discos biológicos Variantes de lagunaje Filtración intermitente en arena Sistemas físico-químicos Sistemas naturales | |
| Compuestos orgánicos volátiles | Arrastre por aire Tratamiento de gases Adsorción en carbón | |
| Patógenos | Cloración Hipo-cloración Cloruro de bromo Ozonización Radiación UV 7 Sistemas naturales | |
| Nutrientes | Nitrógeno | Variantes de sistemas de cultivo en suspensión con nitrificación y desnitrificación Variantes de sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación Arrastre de amoníaco Intercambio iónico Cloración al punto de quiebre Sistemas naturales |
| | Fósforo | Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Eliminación biológica del fósforo Eliminación biológica-química del fósforo Sistemas naturales |
| | Nitrógeno y fósforo | Eliminación biológica de nutrientes |
| Materia orgánica refractaria | Adsorción en carbón Ozonización terciaria Sistemas naturales | |
| Metales pesados | Precipitación química Intercambio iónico Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno | |
| Sólidos orgánicos disueltos | Intercambio iónico Ósmosis inversa Electrodialisis | |

Comparación de rendimientos

La comparación de los rendimientos de las instalaciones es de gran importancia en la elección y proyecto de los reactores, que es donde el ingeniero puede actuar sobre los resultados del tratamiento. La tabla 1-9 muestra una comparativa del grado de tratamiento obtenido por algunos sistemas de tratamiento.

Tabla 1-9. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 195.

| Unidades de tratamiento | | Rendimiento en porcentaje de eliminación del constituyente | | | | | |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|---------------------|---------------|--------------------|---------------------|
| | | DBO | DQO | Sólidos suspendidos | Fósforo total | Nitrógeno orgánico | Nitrógeno amoniacal |
| Rejas de barras | | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo |
| Desarenadores | | 0-5 | 0-5 | 0-10 | Nulo | Nulo | Nulo |
| Sedimentación primaria | | 30-40 | 30-40 | 50-65 | 10-20 | 10-20 | 0 |
| Lodos activados (proceso convencional) | | 80-95 | 80-85 | 80-90 | 10-25 | 15-50 | 8-15 |
| Filtros percoladores | Alta carga, medio pétreo | 65-80 | 60-80 | 60-85 | 8-12 | 15-50 | 8-15 |
| | Carga muy alta, medio sintético | 65-85 | 65-85 | 60-85 | 8-12 | 15-50 | 8-15 |
| Discos biológicos | | 80-85 | 80-85 | 80-85 | 10-25 | 15-50 | 8-15 |
| Cloración | | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo | Nulo |

Factores que afectan el rendimiento

La tabla 1-10 muestra los factores típicos que afectan al rendimiento de los procesos de tratamiento secundario.

Tabla 1-10. Factores que afectan el rendimiento de los procesos de tratamiento secundario típicos. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trans.) McGraw-Hill. Pág. 196

| Proceso | Factores |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lodos activados | Tipo de reactor Tiempo de detención hidráulica Carga hidráulica Carga orgánica Capacidad de aireación Tiempo medio de retención celular Relación nutrientes/microorganismos Relación de recirculación de lodo Nutrientes Factores ambientales (pH, temperatura) |
| Filtros percoladores | Tipo y profundidad del medio filtrante Carga hidráulica Carga orgánica Ventilación Disposición por etapas Caudal de recirculación Distribución del caudal |
| Discos biológicos | Número de etapas Carga orgánica Carga hidráulica Mecanismo de transmisión Densidad del medio Tipo de ejes Relación de recirculación Sumergencia Velocidad de rotación |

Dos de los factores más importantes que afectan todos los sistemas de tratamiento son el caudal y la carga de contaminantes, la tabla 1-11 presenta dichos factores y el efecto que tienen en el proceso u operación unitaria.

Tabla 1-11. Efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección y dimensionamiento de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario. Fuente: Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trans.) McGraw-Hill. Pág. 224, 225.

| Efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección y dimensionamiento de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario. | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proceso u operación unitaria | Factores críticos de diseño | Criterios de dimensionamiento | Efecto de los criterios de diseño sobre el funcionamiento de la planta |
| Bombeo de agua residual y conducciones | Caudal máximo horario | Caudal | Posibilidad de inundación del pozo de bombeo, sobrecarga de la red de alcantarillado, o desbordamiento de las unidades de tratamiento si se supera el caudal punta |
| Desbaste | Caudal máximo horario | Caudal | Las pérdidas de carga en la circulación a través de rejillas y tamices aumentan para caudales elevados. |
| | Caudal mínimo | Velocidad de aproximación en el caudal | A caudales bajos, puede producirse la deposición de sólidos en el canal. |

| Continuación de la tabla | | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proceso u operación unitaria | Factores críticos de diseño | Criterios de dimensionamiento | Efecto de los criterios de diseño sobre el funcionamiento de la planta |
| Desarenado | Caudal máximo horario | Carga superficial | A caudales elevados, el rendimiento de los desarenadores disminuye, provocando problemas en el resto de las instalaciones. |
| Sedimentación primaria | Caudal máximo horario | Carga superficial | La eficacia de la eliminación de sólidos se reduce para cargas superficiales altas; y se incrementa la carga en los procesos de tratamiento secundario. |
| | Caudal mínimo horario | Tiempo de retención hidráulica | A caudales bajos, el aumento del tiempo de retención puede hacer que el agua se vuelva séptica. |
| Lodos activados | Caudal máximo horario | Tiempo de retención hidráulica | Arrastre de sólidos a caudales elevados; puede hacer necesaria la recirculación del lodo efluente a caudales bajos. |
| | Carga orgánica máxima diaria | Relación nutrientes/microorganismos | Una demanda de oxígeno alta puede exceder la capacidad de aireación y provocar bajos rendimientos del proceso de tratamiento. |
| Filtros percoladores | Caudal máximo horario | Carga hidráulica | El arrastre de sólidos a caudales elevados puede provocar bajos rendimientos del proceso de tratamiento. |
| | Caudal mínimo horario | Carga hidráulica y carga orgánica | A caudales bajos, puede ser necesario aumentar la recirculación para mantener el proceso. |
| | Carga orgánica máxima diaria | Carga contaminante / volumen del medio | La presencia de cantidades inadecuadas de oxígeno en las fases de carga punta puede reducir la eficacia del proceso y generar olores. |
| Sedimentación secundaria | Caudal máximo horario | Carga superficial o tiempo de retención | Menor eficacia en la eliminación de sólidos para caudales elevados o tiempos de retención cortos. |
| | Caudal mínimo horario | Tiempo de retención | Posibilidad de lodo ascendente para tiempos de retención elevados. |
| | Carga orgánica máxima diaria | Carga de sólidos | La carga de sólidos aplicada a un tanque de sedimentación puede ser un factor limitante. |
| Tanques de cloración | Caudal máximo horario | Tiempo de retención hidráulica | Para tiempos de retención cortos, la eliminación de bacterias puede ser insuficiente. |

Análisis de costos

Este análisis siempre debe ser relativo, generalmente se hace respecto al nivel de tratamiento obtenido por los distintos sistemas, o en relación al caudal que se debe tratar. La figura 1-5 muestra dicha relación con los procesos más comunes.

En EE.UU. el costo medio para 1 000 galones de agua es de aproximadamente 0.2 dólares, lo que corresponde a 0.05 dólares el metro cúbico. Es un servicio relativamente barato y como resultado las economías del tratamiento de aguas residuales son bastante críticas. En principio y utilizando procesos de tratamiento bastante sofisticados se puede llegar a obtener agua potable de las aguas residuales. La consideración de aspectos económicos, sin embargo, evita el que se pueda llegar a la aplicación y la consecuente utilización de muchos métodos de tratamiento disponibles. En países donde el agua es un recurso muy escaso (como, por ejemplo, Israel, Arabia Saudita), muchos tratamientos de aguas sofisticados y que no son económicamente viables en EE.UU., están empezando a ser rentables. Al evaluar un proceso de tratamiento de aguas residuales específico es importante estimar la relación costo/beneficio entre el beneficio derivado del tratamiento para obtener agua de una calidad específica y el costo en conseguir este grado de calidad²⁷.

Éste es un tema de importancia, por lo cual en México el IMTA publicó un artículo con información sobre este tipo de costos. Las figuras 1-5, 1-6, 1-7, 1-8, 1-9, y 1-10 muestran la inversión para los procesos más comunes en las plantas de tratamiento en función del gasto a tratar. Esto es, en orden, tratamiento primario avanzado, lodos activados, filtros biológicos, lagunas aeradas, lagunas de estabilización y humedales. Es importante recalcar que las cantidades se encuentran en pesos a septiembre del 2002, además de que en un análisis completo de costos, también se deben considerar los costos por operación, mantenimiento y control.



Figura 1-5. Costo de inversión para tratamiento primario avanzado en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

²⁷ RAMALHO, R. (1990). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVERTÉ. Pág. 10-11.

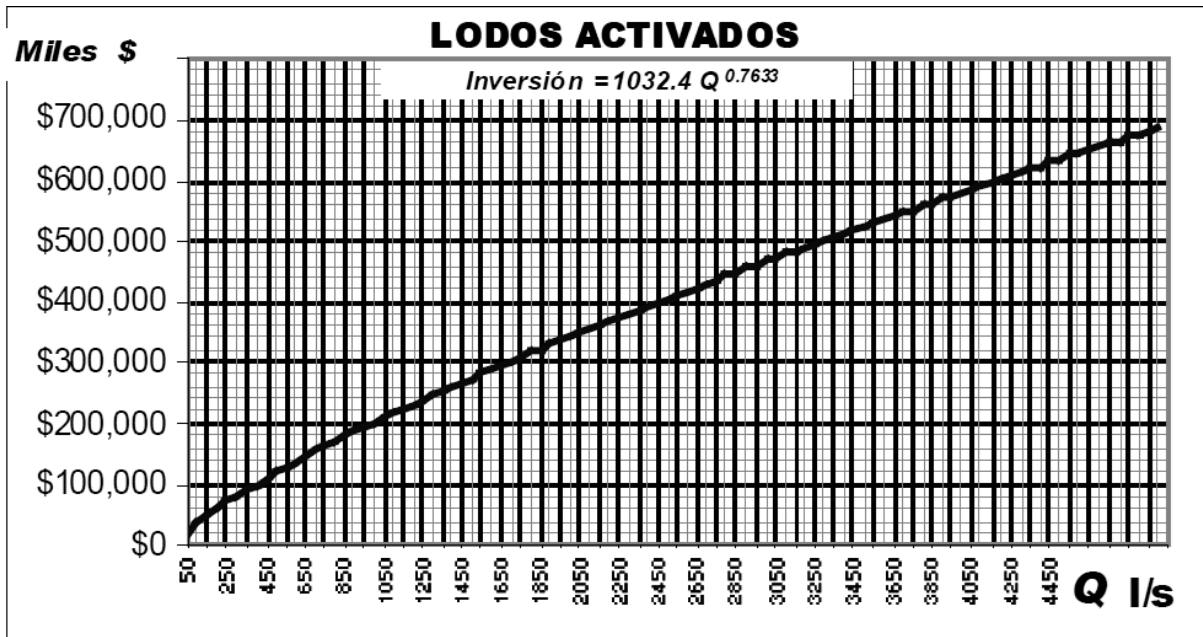


Figura 1-6. Costo de inversión para lodos activados en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

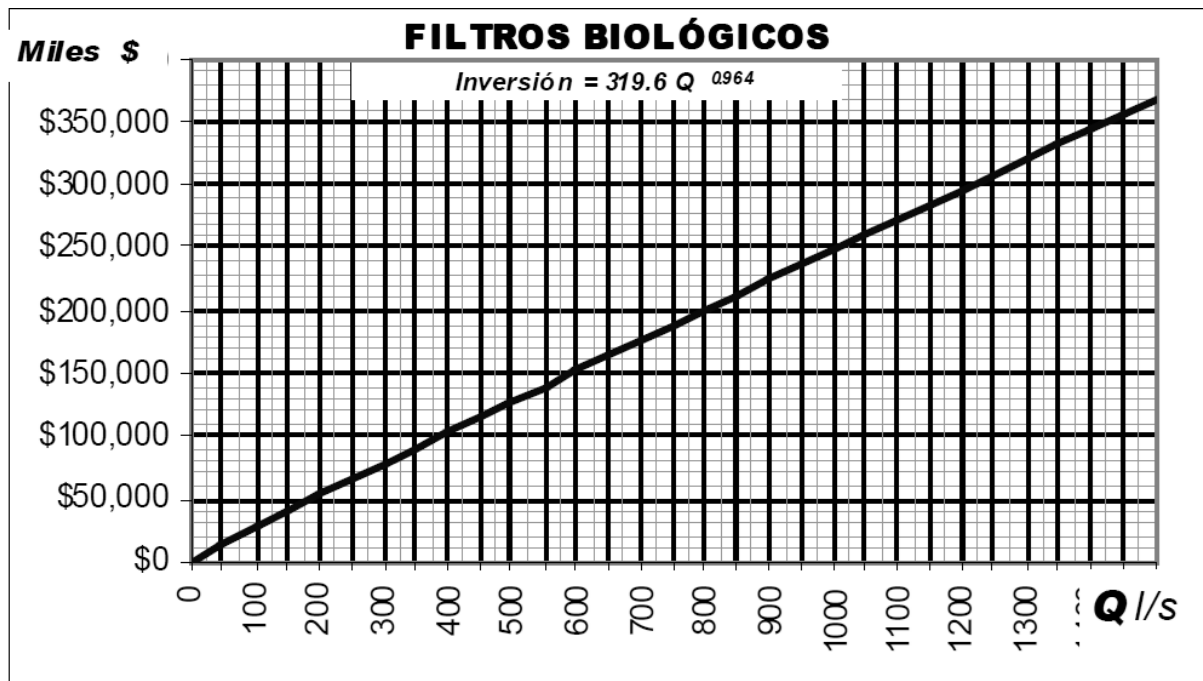


Figura 1-7. Costo de inversión para filtros biológicos en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

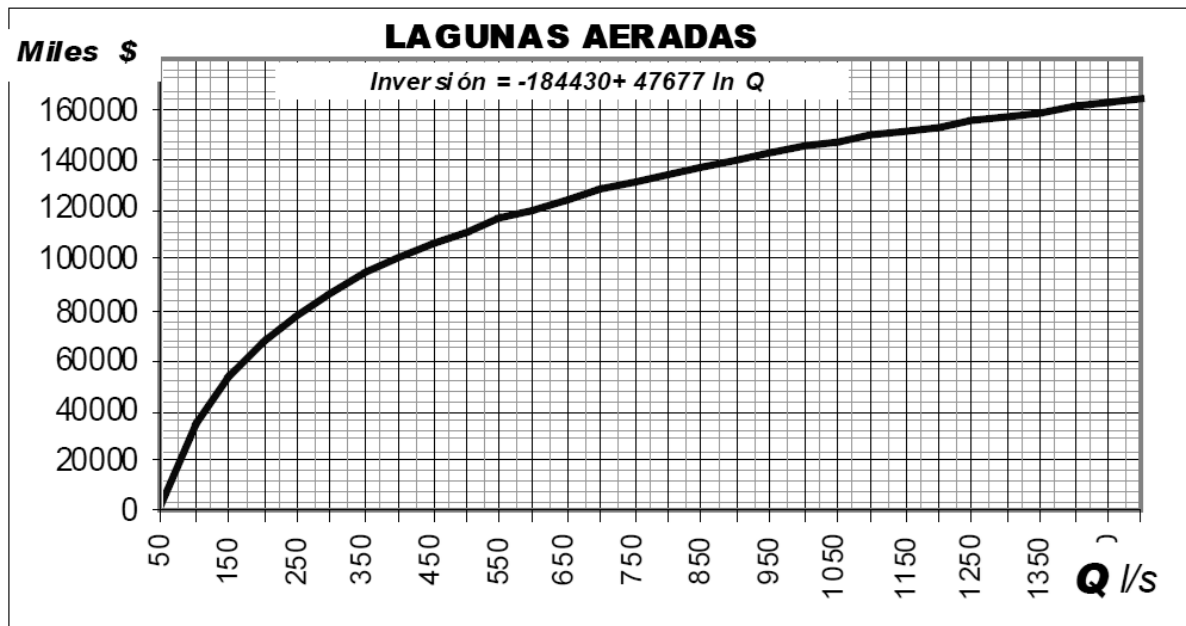


Figura 1-8. Costo de inversión para lagunas aeradas en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



Figura 1-9. Costo de inversión para lagunas de estabilización en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

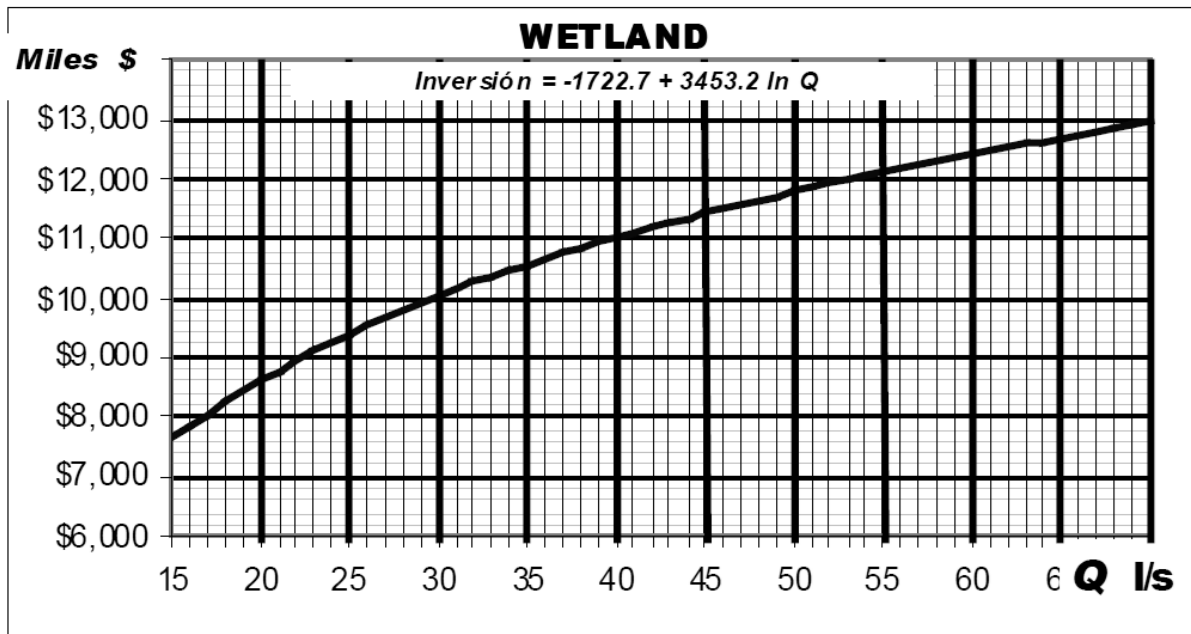


Figura 1-10. Costo de inversión para humedales artificiales en función del gasto a tratar. Fuente: Mantilla Morales G. [et al.]. (2002). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Dimensionamiento de las instalaciones físicas

Una vez que se han seleccionado los procesos de diseño, el siguiente paso es dimensionar las operaciones y procesos unitarios requeridos, de manera que se puedan determinar las obras necesarias para su implantación. Dependiendo de las restricciones impuestas por el predio.

Esta actividad generalmente está relacionada a la actividad siguiente que es el balance de sólidos y demás cálculos requeridos; así como también de los costos, y a la elección de procesos u operaciones unitarias, por lo que si en algún momento alguna actividad de esta secuencia arroja que algún proceso u operación unitaria es inadecuado, las dimensiones no cumplen con alguna restricción, o los costos no podrían cubrirse de acuerdo a la situación económica, se debe regresar a alguna actividad de la secuencia para cambiar algo y volver a empezar desde dicha actividad.

Balance de sólidos y demás cálculos requeridos de acuerdo al tren de tratamiento

Después de haber escogido los criterios de diseño y de haber diseñado las operaciones y procesos unitarios, se preparan balances de sólidos para cada diagrama de flujo del proceso seleccionado.

Los balances de sólidos deben efectuarse para los gastos medio y máximo extraordinario. La elaboración de un balance de sólidos consiste en determinar las cantidades de sólidos que entran y salen de cada operación o proceso unitario. Estos datos son especialmente importantes en el diseño de las instalaciones de procesamiento de lodos.

Los demás cálculos requeridos dependen completamente de los distintos procesos en el tren de tratamiento.

Distribución en el terreno de las instalaciones físicas

Usando la información acerca de las dimensiones de las instalaciones, determinadas sobre la base de los criterios seleccionados, se desarrollan varios planteamientos de arreglo de acuerdo con las

restricciones del sitio. En la propuesta de la distribución o arreglo de unidades debe procurarse minimizar la longitud de las tuberías, agrupando juntas las instalaciones relacionadas; también es importante considerar la necesidad de expansión futura. Entre los factores que deben considerarse en el estudio de implantación de una planta de tratamiento, se pueden citar los siguientes:

1. Geometría de los predios disponibles para la planta de tratamiento
2. Topografía
3. Condiciones del suelo y de las cimentaciones
4. Localización de la alcantarilla del efluente
5. Localización del punto de vertido
6. Accesos para el transporte
7. Tipos de procesos considerados
8. Efectos sobre la longitud de las conducciones entre las unidades de la planta
9. Eficiencia de los procesos
10. Fiabilidad y economía de operación
11. Estética
12. Impacto ambiental
13. Existencia de terreno adicional para ampliación futura de la planta

Preparación de perfiles hidráulicos

Una vez que se han dimensionado preliminarmente las instalaciones e interconexiones de tubería, se elaboran los perfiles hidráulicos para los gastos pico (máximo extraordinario) y medio.

Los perfiles hidráulicos se elaboran con los siguientes propósitos:

1. Asegurar que el gradiente hidráulico es el adecuado para que se desarrolle un flujo por gravedad del agua residual a través de las instalaciones de tratamiento
2. Para establecer las alturas de impulsión requeridas por las bombas, cuando el bombeo sea necesario
3. Para asegurar que las instalaciones de la planta no se verían inundadas o que el agua alcance cotas no previstas durante los periodos de gasto punta

Al trazar una línea piezométrica y representar gráficamente las instalaciones físicas, se utilizan normalmente escalas verticales y horizontales distorsionadas. Los procedimientos específicos varían dependiendo de las condiciones locales. Por ejemplo, si una condición del vertido aguas abajo puede ser un punto de control, algunos proyectistas calculan la línea piezométrica comenzando en el punto de control y procediendo hacia aguas arriba. Otros, por el contrario, prefieren trabajar en el sentido de circulación del agua, comenzando en la cabecera de la planta. Un tercer procedimiento consiste en comenzar partiendo desde el centro, en cada dirección, ajustando las cotas al final de los cálculos²⁸.

Elaboración de los planos especificaciones

Uno de los pasos finales es la elaboración de los planos constructivos y especificaciones.

1.2.5 Sistemas de tratamiento de las aguas residuales

Los distintos sistemas de tratamiento se pueden clasificar de acuerdo a tres criterios:

- Según las fases del tratamiento

²⁸ César Valdez, E., & Vázquez González, A. (2001). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Unidad 1.78-1.79.

- Según el tipo de tratamiento
- Según los costos asociados

La clasificación según las fases del tratamiento se aborda en el capítulo 5 del presente trabajo, bajo el apartado de etapas del proceso de tratamiento, por lo cual en este apartado solamente se abordarán desde el punto de vista del tipo de tratamiento y de los costos asociados.

Clasificación de los sistemas según el tipo de tratamiento

Operaciones unitarias

Los sistemas considerados en este tipo de tratamiento son en los cuales predomina la acción de fuerzas físicas. La mayoría de estos métodos han evolucionado a partir de las observaciones del hombre en la naturaleza, y es por esta razón que fueron los primeros en ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Entre las operaciones unitarias más comunes se encuentran: el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración.

Procesos unitarios

Químicos

Este tipo de métodos de tratamiento son en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se consigue a partir de la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas. Fenómenos como la precipitación química, adsorción y la desinfección son ejemplos de los procesos unitarios químicos más comunes.

Biológicos

En tipo de métodos la eliminación de los contaminantes se lleva a cabo gracias a la actividad biológica. Su principal aplicación es la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual en forma tanto coloidal como en disolución. Estas sustancias se convierten en gases que se liberan a la atmósfera, y en tejido celular biológico que puede ser eliminado por sedimentación²⁹.

Clasificación de los sistemas según los costos asociados

Tecnologías convencionales

Son aquellos sistemas de tratamiento los cuales dependen principalmente de equipo electromecánico para el correcto funcionamiento de las instalaciones, por lo cual los costos asociados a la operación y mantenimiento suelen ser altos, algunas veces superando al de construcción. Entre los sistemas más conocidos están los lodos activados.

Tecnologías blandas

Estos tipos de tratamiento son aquellos en los cuales los costos asociados al funcionamiento y mantenimiento son relativamente bajos respecto a las tecnologías convencionales, por lo cual estos sistemas de tratamiento tienen componentes que no dependen directamente de la energía eléctrica.

Este tipo de tecnologías también suelen llamarse como sistemas naturales, de los cuales se verá una clasificación en el siguiente apartado.

²⁹ Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trads.) McGraw-Hill. Pág. 142-143.

Entre los sistemas más convencionales se encuentran los humedales; los sistemas de estanques y lagunas; los lechos de turba; y los sistemas agrarios como el riego, la infiltración-percolación, y la escorrentía superficial sobre cubierta vegetal.

Sistemas naturales de tratamiento

Todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales dependen en mayor o menor medida de la naturaleza, en algunos casos de las fuerzas, tales como la fuerza de gravedad, en otros de componentes naturales como los organismos vivos. Sin embargo, estos componentes naturales tienen como soporte un complejo arreglo de equipo electromecánico. El término de sistemas naturales se utiliza entonces para describir los métodos de tratamiento que dependen primordialmente en los componentes naturales para alcanzar el propósito de dar un tratamiento al agua. Aunque esto no excluye que existan tuberías o bombas para la distribución y el transporte del agua, estos sistemas no dependen de las fuentes de energía para mantener su respuesta de tratamiento.

Sistemas acuáticos de tratamiento

Este tipo de sistemas dependen mayormente de la vida microbiana, y de pequeñas formas de plantas y animales. En este tipo de sistemas están comprendidos los sistemas de estanques y lagunas, en los cuales el desempeño y la calidad final del agua dependen de la presencia de algas en el sistema, las cuales tienen una función importante: proveen de oxígeno, el cual permite que otras respuestas biológicas se desarrollen.

Las principales unidades de sistemas de tratamiento, características de diseño y desempeño esperado se resumen en la tabla 1-12.

Tabla 1-12. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento acuáticos. Fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 3.

| Unidad | Nivel de tratamiento alcanzado | Criterios típicos | | | | |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| | | Necesidades climáticas | Tiempo de retención [días] | Profundidad [m] | Carga orgánica [kg/ha*día] | Características del efluente [mg/l] |
| Lagunas de oxidación | Tratamiento secundario | Clima Cálido | 10-40 | 1-1.5 | 40-120 | DBO: 20-40 SST: 80-140 |
| Lagunas facultativas | Tratamiento secundario | Ninguna en específico | 25-280 | 1.5-2.5 | 22-67 | DBO: 30-40 SST: 40-100 |
| Lagunas airadas parcialmente mezclada | Tratamiento secundario; Pulimiento | Ninguna en específico | 7-20 | 2-6 | 50-200 | DBO: 30-40 SST: 30-60 |
| Lagunas de almacenamiento y descarga controlada | Tratamiento secundario; Pulimiento | Ninguna en específico | 100-200 | 3-5 | - | DBO: 10-30 SST: 10-40 |
| Lagunas con lirios acuáticos | Tratamiento secundario | Clima Cálido | 30-50 | <1.5 | <30 | DBO: <30 SST: <30 |
| Lagunas con lirios acuáticos | Tratamiento avanzado (con influente de tratamiento secundario) | Clima Cálido | >6 | <1 | <50 | DBO: <10 SST: <10 NT.: <5 FT.: <5 |

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno
NT: Nitrógeno total

SST: Sólidos suspendidos totales
FT: Fósforo total

Sistemas de humedales

Este tipo de sistemas comprenden extensiones de tierra en las cuales el agua que se encuentra yace encima o formando parte de ésta, manteniendo el sustento sólido siempre saturado, lo cual permite el crecimiento de vegetación asociada. La gran diferencia entre este tipo de sistemas y los sistemas acuáticos es que el tratamiento de los primeros se basa principalmente en la acción de grandes plantas y el papel que toma el suelo para el tratamiento, mientras que, para los sistemas acuáticos, el agua es el principal medio de tratamiento siendo los microorganismos los principales actores en la purificación.

La capacidad para la renovación del agua residual en los humedales ha sido verificada en numerosos estudios en una gran variedad de configuraciones geográficas. Los humedales, usados de esta forma, incluyen ambientes naturales como ciénegas, pantanos, marjales, lodazales, turberas y manglares; y los sistemas especialmente contruidos para el tratamiento de agua residual.

Las principales unidades de sistemas de tratamiento, características de diseño y desempeño esperado se pueden observar en la tabla 1-13.

Tabla 1-13. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento por humedales. Fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing.. Pág. 4

| Unidad | Nivel de tratamiento alcanzado | Criterios típicos | | | | |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|
| | | Necesidades climáticas | Tiempo de retención [días] | Profundidad [m] | Carga orgánica [kg/ha*día] | Características del efluente [mg/l] |
| Pantanos, Ciénegas, Marjales | Pulimiento, Tratamiento avanzado (con influente de tratamiento secundario) | Clima Cálido | 10 | 0.2-1 | 100 | DBO: 5-10 SST: 5-15 NT.: 5-15 |
| Humedales artificiales | | | | | | |
| Humedales de flujo a superficie libre | Tratamiento secundario a Tratamiento avanzado | Ninguna en específico | 7-15 | 0.1-0.6 | 100 | DBO: 5-10 SST: 5-15 NT.: 5-20 |
| Humedales de flujo subsuperficial | Tratamiento secundario a Tratamiento avanzado | Ninguna en específico | 3-15 | 0.3-0.6 | 90 | DBO: 5-40 SST: 5-20 NT.: 5-20 |
| Humedales de flujo vertical | Tratamiento secundario a Tratamiento avanzado | Ninguna en específico | 1-2 | 0.6-0.9 | 200 | DBO: 5-10 SST: 5-10 NT.: 10-20 |

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno.
NT: Nitrógeno total.

SST: Sólidos suspendidos totales

Sistemas terrestres de tratamiento

Este tipo de métodos consisten en la aplicación controlada de agua residual al suelo para lograr el tratamiento deseado. Éstos procesos utilizan mecanismos naturales, químicos y biológicos dentro de un sistema suelo-plantas-agua. El sistema de lenta tasa y el sistema de suelo-acuífero usan el suelo con sustento para el tratamiento después de la infiltración del agua. La diferencia entre estos dos procesos es la rapidez con la cual el agua residual se descarga en el sitio. El proceso de flujo terrestre usa la superficie del suelo y la vegetación como tratamiento, con limitada percolación, y el efluente es colectado como la escorrentía superficial en el fondo de la ladera³⁰.

Las principales unidades de sistemas de tratamiento, características de diseño y desempeño esperado se muestran en la tabla 1-14.

³⁰ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 359.

Tabla 1-14. Características de diseño y desempeño esperado para los sistemas de tratamiento terrestres. Fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 6.

| Unidad | Nivel de tratamiento alcanzado | Criterios típicos | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| | | Necesidades climáticas | Vegetación | Área [ha] | Carga hidráulica [m/año] | Características del efluente [mg/l] |
| Sistema de lenta tasa | Tratamiento secundario o Tratamiento avanzado | Temporadas cálidas | Si | 23-280 | 0.5-6 | DBO: <2 SST: <2 NT.: <3 FT.: <0.1 CF: 0 |
| Sistema suelo-acuífero | Tratamiento secundario, avanzado o recarga de acuíferos | Ninguna en específico | No | 3-23 | 6-125 | DBO: 5 SST: 2 NT.: 10 FT.: <1 ^a CF: 10 |
| Sistema de flujo terrestre | Tratamiento secundario; remoción de nitrógeno | Temporadas cálidas | Si | 6-40 | 3-20 | DBO: 10 SST: 10 NT.: <10 |
| Sistema en sitio | Tratamiento secundario a terciario | Ninguna en específico | No | El área de la cama y el desempeño dependen del nivel de tratamiento preliminar. | | |

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

SST: Sólidos suspendidos totales

NT: Nitrógeno total

FT: Fósforo total

CF: Coliformes fecales [número/100ml]

^a Medido en la inmediata vecindad de la cuenca

1.2.6 Disposición final del agua residual y reutilización

El vertido en aguas superficiales continúa siendo el método de evacuación de aguas residuales más común. No obstante, y con el fin de proteger el medio ambiente acuático, se han adoptado medidas más restrictivas que las dictadas por el gobierno federal. En algunos lugares, las plantas de tratamiento se han diseñado y ubicado de tal manera que parte del efluente tratado pueda ser evacuado aplicándose al terreno y reutilizándose para diversos fines, como pueden ser el riego de campos de golf o como agua para refrigeración industrial. Se supone que esta tendencia aumentará en el futuro, especialmente en aquellas localidades y zonas áridas o semiáridas en la que exista escasez de agua³¹.

1.3 Conceptos básicos de hidráulica de canales

Un canal abierto es un conducto para líquidos (generalmente agua) el cual tiene una superficie libre, es decir, una de las fronteras está expuesta a la atmósfera. De forma general, la superficie libre es una interface entre dos fluidos de diferente densidad³².

El movimiento de un líquido a superficie libre se ve afectado por las mismas fuerzas que intervienen en el flujo al interior de un tubo: la fuerza de gravedad; la fuerza de resistencia ocasionada por la fricción y la naturaleza turbulenta del flujo; la fuerza producidas por la presión en las fronteras del

³¹ Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. (J. Trillo Monsorius, & I. Trillo Fox, Trad.) McGraw-Hill. Pág. 32.

³² French, R. H. (1988). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill. Pág. 2.

canal particularmente en las zonas de cambio de geometría y la fuerza por la viscosidad del líquido (que no es tan importante en flujos turbulentos).

1.3.1 Geometría de un canal

Hablando de la geometría de un canal, en sentido longitudinal se destaca el elemento conocido como pendiente del canal, la cual puede definirse como el cociente del desnivel entre dos puntos sobre la plantilla y la distancia horizontal que los separa, dicho cociente suele identificarse como S_0 , y se obtiene a través de la expresión siguiente:

$$S_0 = \tan \theta \quad (1-6)$$

En donde:

- S_0 = Pendiente
- θ = Angulo de inclinación de la plantilla respecto a la horizontal

En el sentido transversal la selección del tipo de sección depende de cada proyecto siendo los más comunes la sección rectangular, la trapecial, la triangular y la circular. Los elementos más importantes de la sección transversal son los siguientes:

Tirante. Es la distancia perpendicular a la plantilla, la cual se mide desde el punto más bajo de la sección hasta la superficie libre del agua. Comúnmente se representa como "y".

Ancho de superficie libre. Es el ancho de la sección a nivel de la superficie libre y se representa como "T".

Área hidráulica. Es el área ocupada por el flujo en la sección del canal, y se representa como "A".

Perímetro mojado. Es la longitud de la línea de contacto entre el agua y las paredes del canal, por lo cual no incluye la superficie libre. Comúnmente se representa como "P".

Radio hidráulico. Es el cociente (R_h) del área hidráulica y el perímetro mojado. La ecuación (1-7) representa dicho cociente.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (1-7)$$

Tirante medio o tirante hidráulico. Es la relación entre el área hidráulica y el ancho de superficie libre como lo representa la ecuación (1-8).

$$Y = \frac{A}{T} \quad (1-8)$$

Talud. Designa la inclinación de las paredes de la sección y corresponde a la distancia recorrida horizontalmente desde un punto sobre la pared para ascender la unidad de longitud sobre otro punto de la misma. Generalmente se expresa como k:1; sin embargo, basta con indicar el valor k³³.

1.3.2 Tipos de flujo

El flujo se puede clasificar con base en diferentes criterios, que son: con base en el flujo respecto al tiempo; respecto al espacio; respecto a la fuerza dominante entre la viscosidad y la gravedad; y

³³ Sotelo Ávila, G. (2002). Hidráulica de canales. UNAM, Facultad de Ingeniería. Pág. 1-3.

respecto a la fuerza dominante entre la inercia y la gravedad. Si se toma el tiempo como criterio el flujo puede ser permanente cuando la velocidad no varía y no permanente cuando si lo hace. Si el criterio es el espacio el flujo es uniforme si la velocidad es constante durante toda la longitud o variado cuando la velocidad si cambia³⁴.

Si el criterio es la fuerza dominante entre la viscosidad y la gravedad, el flujo puede ser laminar cuando las fuerzas viscosas son las fuerzas que rigen el movimiento; si son las fuerzas de gravedad, el flujo es turbulento; mientras que el flujo es de transición si se encuentra entre las dos condiciones anteriores. Esta dominancia puede entenderse a partir del número de Reynolds como sigue:

- Si el número de Reynolds es menor o igual a 500, el flujo es laminar.
- Si el número de Reynolds es mayor a 500 pero menor a 12 500, el flujo es de transición.
- Y si el número de Reynolds es mayor o igual que 12 500, el flujo es turbulento.

El número de Reynolds está definido por la ecuación (1-9):

$$R_e = \frac{V * R_h}{\nu} \quad (1-9)$$

En donde:

- R_e = Número de Reynolds [1]
- V = Velocidad media en la sección [$\frac{m}{s}$]
- R_h = Radio hidráulico [m]
- ν = Viscosidad cinemática del agua [$\frac{m}{s^2}$]

Si el criterio es la fuerza dominante entre la inercia y la gravedad, de acuerdo al número de Froude, el flujo puede ser:

- Subcrítico si el número de Froude es menor a uno
- Crítico si el número de Froude es igual a 1
- O supercrítico si el número de Froude es mayor a uno

El número de Froude puede definirse de la siguiente manera cuando $\theta \leq 8^\circ$, $\cos\theta \approx 1$ y por consiguiente el error es menor al 1%.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * \left(\frac{A}{T}\right)}} \quad (1-10)$$

³⁴ French, R. H. (1988). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill. Pág. 3.

1.3.3 Ecuaciones fundamentales del flujo unidimensional permanente

Ecuación de continuidad

Cuando no hay aportaciones o salidas de líquido en el trayecto del canal se dice entonces que la variación del flujo de masa con respecto a la distancia es igual a cero. Que en un flujo que es incompresible, al integrar la ecuación en dos secciones 1 y 2 que limitan al volumen de control, la ecuación resultante es:

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 = \text{constante} \quad (1-11)$$

Es decir, el caudal se mantiene constante en todo el canal.

Ecuación de la energía

La energía total por unidad de peso que posee el agua en su movimiento en una sección i se expresa como la suma de su elevación "z" desde un plano de referencia, la carga de presión $P/g\rho$, y la energía cinética local $v^2/2g$, donde v es la velocidad en dicha sección. Esta suma puede representarse con la ecuación (1-12).

$$H = z + y * \cos \theta + \alpha * \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (1-12)$$

Esta ecuación también puede representarse como la ecuación (1-13) cuando el flujo es turbulento (es decir $\alpha=1$) y el ángulo de inclinación de la plantilla es menor a 8° (es decir $\cos\theta \approx 1$).

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (1-13)$$

Cuando dicho análisis se hace con respecto a dos secciones en el canal, por el principio de conservación de masa se cumple la siguiente ecuación.

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_r = \text{Constante} \quad (1-14)$$

En la cual el término h_r es la pérdida de energía entre las dos secciones.

Ecuación de la cantidad de movimiento

Se considera el volumen de control limitado por las secciones 1 y 2, las paredes, y la superficie libre de un flujo unidimensional e incompresible, cuyo gasto no cambia en toda su longitud. La ecuación de

la cantidad de movimiento para dicho volumen resulta de eliminar el término correspondiente al tiempo en la ecuación general obtenida en el volumen 1 y en la forma vectorial³⁵:

$$F_P + F_T + F_C = \rho * [(Q * \beta * V)_2 - (Q * \beta * V)_1] \quad (1-15)$$

En donde:

- F_P = Fuerza resultante de la presión ejercida sobre las superficies de frontera del volumen de control
- F_T = Fuerza resultante producida por el esfuerzo tangencial generado sobre el fondo de paredes del volumen de control
- F_C = Fuerza de cuerpo debido al peso del volumen de control
- Q = Gasto en la sección
- V = Vector velocidad media en la sección
- β = Coeficiente de Boussinesq para considerar el efecto que tiene la distribución irregular de la velocidad en la sección en el cálculo de la cantidad de movimiento con la velocidad media.

1.3.4 Flujo uniforme

El flujo uniforme pocas veces ocurre en los canales naturales debido a que no son prismáticos, y en los prismáticos debido a la existencia de distintos controles como los vertedores, compuertas, etc. Sin embargo, dicha condición debe considerarse en todos los problemas de diseño.

El flujo uniforme se presenta cuando la velocidad, y por consecuencia el tirante y a su vez el área hidráulica, son constantes en todas las secciones a lo largo del canal; y cuando la línea de energía, la superficie libre del agua, y la plantilla del canal son paralelas. Para que el flujo uniforme ocurra, es necesario que exista un balance dinámico entre el componente de la fuerza de peso en la dirección del flujo y la de fricción.

Ecuación de Chezy y coeficiente de Manning

Chezy obtuvo experimentalmente en 1775 una ecuación para determinar la velocidad del flujo turbulento, uniforme y unidimensional, en donde "C" es un factor de resistencia o de fricción, el cual es similar al factor "f" de la ecuación de Darcy-Weisbach empleada en los conductos a presión.

$$V = C * \sqrt{R_h * S} \quad (1-16)$$

En donde:

- V = Velocidad
- C = Coeficiente de fricción
- R_h = Radio hidráulico
- S = Pendiente del canal

Existen una gran cantidad de ecuaciones para obtener el coeficiente "C", siendo la más común la ecuación de Manning en el cual el coeficiente se expresa de la siguiente forma:

³⁵ Sotelo Ávila, G. (2002). Hidráulica de canales. UNAM, Facultad de Ingeniería. Pág. 10-15.

$$C = \frac{R_h^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (1-17)$$

Que sustituyendo en la ecuación (1-16) resulta la forma más común de la ecuación de Manning.

$$V = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (1-18)$$

En donde “n” es el coeficiente de rugosidad de Manning³⁶.

1.4 Conceptos básicos de comportamiento de suelos

El suelo puede definirse como un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas con organización definida y propiedades que varían vectorialmente³⁷. Sin embargo, dicha definición tiene un enfoque de mecánica de suelos, y dado que los humedales artificiales son una combinación de varias disciplinas ingenieriles, pero también biológicas es pertinente agregar la siguiente definición con enfoque ecológico. Esta definición también nos ayudará a diferenciar entre suelo y sustrato.

Suelo: base, materia o sustancia que sirve de sostén a un organismo ya sea vegetal, animal o protista. Dicha sustancia satisface determinadas necesidades básicas de los organismos como la fijación, nutrición, la protección, la reserva de agua, etc.

Sustrato: Todo material sólido distinto del suelo in situ, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico.

En un suelo se distinguen tres fases que lo constituyen: la sólida, la líquida, y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas de mineras del suelo; la fase líquida está formada por el agua (que, aunque pueden existir otros líquidos, el agua es el de mayor significación); y la fase gaseosa comprende todo el aire (aunque pueden estar presentes otros gases). Las fases líquida y gaseosa suelen comprenderse en el “volumen de vacíos”, mientras que la fase sólida constituye el “volumen de los sólidos”.

En el caso en el que el agua ocupa todos los vacíos en el suelo se habla de que el suelo está totalmente saturado. Lo cual significa que dicho suelo consta solamente de dos fases, la sólida y la líquida.

1.4.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos

Los conceptos son necesarios para entender las relaciones importantes en la mecánica de suelos.

- V_m = Volumen total de la muestra de suelo (volumen de la masa)
- V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos)
- V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos)
- V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (volumen de agua)
- V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra (volumen de aire)
- W_m = Peso total de la muestra del suelo (peso de la masa)

³⁶ *Ibíd.*, pág. 65-68, 93.

³⁷ Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos. 1973. Pág. 7.

- W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos)
- W_w = Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua)
- W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra, convencionalmente considerado como nulo en mecánica de suelos.

En mecánica de suelos se relacionan el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes por medio del concepto de peso específico. Esto es, la relación entre el peso de la sustancia y su volumen. Los pesos específicos importantes son los siguientes:

- γ_0 = Peso específico del agua destilada a 4°C, a presión atmosférica al nivel del mar. En el sistema métrico decimal es igual a 1 g/cm³
- γ_w = Peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo (la cual varía un poco con respecto a γ_0 , y a veces por cuestiones prácticas se asumen iguales)
- γ_m = Peso específico de la masa del suelo (definido por la ecuación 1-19)

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m} \quad (1-19)$$

- γ_s = Peso específico de la fase sólida del suelo (definido por la ecuación 1-20)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1-20)$$

El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua destilada a 4°C a una atmósfera de presión. Los dos pesos específicos más importantes son los dos siguientes:

- δ_m = Peso específico relativo de la masa del suelo (definido por la ecuación 1-21)

$$\delta_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} = \frac{W_m}{V_m * \gamma_0} \quad (1-21)$$

- δ_s = Peso específico relativo de la fase sólida del suelo (definido por la ecuación 1-22)

$$\delta_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{V_s * \gamma_0} \quad (1-22)$$

Las siguientes relaciones son muy importantes para comprender las propiedades mecánicas de los suelos, y el significado y sentido físico de dichas propiedades.

Relación de vacíos, oquedad o índice de poros. Es la relación entre el volumen de vacíos y el de los sólidos de un suelo:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-23)$$

Porosidad. Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la masa del suelo, expresada como porcentaje en la siguiente ecuación:

$$n[\%] = \frac{V_v}{V_m} * 100 \quad (1-24)$$

Grado de saturación. Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos, expresada como porcentaje en la siguiente ecuación:

$$G_w[\%] = \frac{V_w}{V_v} * 100 \quad (1-25)$$

Contenido de agua o humedad. Es la relación entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso de su fase sólida. Expresada como porcentaje en la siguiente ecuación:

$$w[\%] = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (1-26)$$

Existe una expresión también importante que relaciona a la porosidad y a la relación de vacíos la cual es como sigue³⁸:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1-27)$$

1.4.2 Ley de Darcy y coeficiente de permeabilidad

El flujo de agua a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henri Darcy en 1856. Darcy investigó las características del flujo del agua a través de filtros formados por materiales térreos y descubrió que, para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto queda expresado por:

$$Q = \frac{dV}{dt} = k * A * i \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (1-28)$$

En donde:

- Q = Gasto $\left[\frac{cm^3}{s} \right]$
- K = Coeficiente de permeabilidad
- A = Área total de la sección transversal del filtro
- i = Gradiente hidráulico del flujo

³⁸ *Ibíd.*, pág. 25-29.

El gradiente hidráulico del flujo puede calcular con la expresión 1-29.

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1-29)$$

La diferencia h_1-h_2 representa la pérdida de energía sufrida por el flujo en el desplazamiento L.

En las ecuaciones anteriores aparece el coeficiente k de permeabilidad, el cual se puede definir como la velocidad del agua a través del suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. Este valor indica la medida con la cual el agua fluye a través del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico dado³⁹.

³⁹ *Ibíd.*, pág. 149-151.

Capítulo 2: Marco histórico

Durante el segundo capítulo se expondrán ciertos temas acerca del agua, los cuales darán, a modo de semblanza histórica, un panorama general acerca del agua en nuestros días, su evolución a través del tiempo, y el escenario deseable para el futuro en materia hídrica.

Los temas tratados en esta parte, tendrán relación directa con el tema de la tesis; los humedales, además de algunos temas estrechamente relacionados, como el tratamiento del agua; el drenaje rural y urbano; el abastecimiento del agua potable y los usos del agua, así como algunos temas sociales también muy importantes para conocer la relevancia del agua en nuestro país, no sólo a nivel ecológico y de desarrollo sino también de idiosincrasia y de creencias.

El valle de México ha recibido la atención de los estudiosos desde que Hernán Cortés decidiera que Tenochtitlán sería la nueva capital de los dominios españoles, el cual fuera el centro político del imperio mexica. Es por eso que la literatura acerca del agua en la capital del país es abundante, no obstante, un buen número de historias estatales, municipales y de las ciudades abarca la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

Y a pesar de su importancia demográfica, económica y política, ciudades como Toluca, Salamanca, León, Morelia y Guadalajara sólo cuentan con estudios históricos parciales y sólo Querétaro puede decir que tiene una investigación sistemática que cubre desde el siglo XVI hasta el siglo XX.

Dado que la literatura historiográfica acerca de obras y proyectos relacionados con el agua, es más extensa en zonas con mayor inversión para el desarrollo, ésta aborda mayormente los propósitos y resultados de dicho desarrollo y toca de manera superficial aspectos técnicos y sociales de dichas obras. En el presente trabajo se abordarán solamente dos casos específicos, Querétaro y la Ciudad de México; y se intentará hacerlo de la manera más clara y concisa posible para no confundir al lector, pero siempre dándole un panorama general que le ayude a entender mejor la situación del agua.

2.1 Contexto histórico del agua en México

El agua desviada, situación requerida para muchas obras hidráulicas y sanitarias, obtiene nuevos destinos y cancela los anteriores, o al menos los inhibe. Lamentablemente el desarrollo es así, beneficio para algunos y la cancelación de oportunidades para otros. Y sólo el balance final dirá cual situación presenta más ventajas.

2.1.1 Obras hidráulicas para usos domésticos

La recolección y el almacenamiento de agua pluvial fueron prácticas comunes en Mesoamérica desde tiempos muy antiguos, fuera en recipientes en depósitos subterráneos, o a cielo abierto. El agua se captaba mediante canales y zanjas, aprovechando el agua rodada (en patios y casas, o en el campo, en jagüeyes, mediante bordos, entre otros), o bien, conduciéndola desde los techos de las viviendas y edificios por medio de canoas o canjilones de madera, pencas o canalitos a los depósitos. En las viviendas el agua se almacenó en recipientes de barro, enterrados o no, así como en pilas o piletas de barro, cal y canto, piedra, excavados en el suelo, recubiertos o no con piedra o argamasa y estuco.

Entre los almacenes subterráneos domésticos de mayor antigüedad en el área se encuentran los de San José Mogote (1000 a.C.) y Tierras Largas (1000-900 a.C.), Oaxaca (Marcus 2006:233). Otros depósitos subterráneos son los chultunes o cisternas mayas, que se cuentan por miles en la península de Yucatán, que fueron vitales para los asentamientos prehispánicos y que persisten hasta el presente.

En lo que respecta a los depósitos pluviales a cielo abierto, destacan los jagüeyes, que fueron muy comunes en el centro y el sur de México, en especial en las zonas áridas y semiáridas donde el nivel freático estaba muy bajo o el suelo era rocoso y resultaba muy difícil alcanzarlo mediante la excavación de pozos someros. A los jagüeyes, hechos artificialmente o acondicionados aprovechando hondonadas naturales, situados en terrenos cercanos a cerros y lomeríos, se canalizaba el agua de las pequeñas corrientes pluviales o de los escurrimientos de los cerros y techos aledaños.

Así como hubo asentamientos que únicamente tuvieron acceso al agua de lluvia para abastecerse, otras se surtieron de fuentes permanentes. De acuerdo con Doolittle (1990), la construcción de acueductos en el México antiguo pasó por las siguientes tres etapas: 1) acueductos de tierra, bajos y cortos (como el de Loma La Coyotera, Oaxaca); 2) acueductos hechos de varas y troncos entretejidos con piedras, tierra y céspedes, que servían para rellenar y atravesar algunos barrancos y, 3) acueductos sobre taludes hechos de cal, canto y estucados.

La perforación de pozos verticales para “alumbrar aguas” fue un procedimiento común para surtir a las poblaciones y en ocasiones también para irrigar. Sin embargo, se conoce poco sobre sus características, antigüedad y distribución, con la excepción de uno de los más antiguos, que tiene 4.7 metros de profundidad y fue identificado por Neely en San Marcos Necoxtla, Puebla, fechado nada menos que en 7900 a.C.

2.1.2 Aprovechamiento agrícola del agua

El riego cumplió dos fines básicos: incrementar los rendimientos tanto de las plantas cultivadas (productividad agrícola) como del trabajo humano (productividad del trabajo, las horas-hombre invertidas por superficie cultivada) y, servir como instrumento para ampliar la “frontera agrícola”, dado que la irrigación permitió colonizar más tierras (cada vez más altas o más bajas, más áridas y con lluvia errática o insuficiente o sujetas a heladas y granizadas) y dar lugar al cultivo continuo de la tierra⁴⁰.

La arqueología ha descubierto grandes alzadas superficiales de terreno en diversas zonas lacustres: las que existieran en el fondo de los valles, desde el norte de Jalisco hasta Nayarit, además del valle de Zacapu. También se detectaron similares desniveles en toda la Ciénega de Chapala y pudo documentarse su conversión a zona ganadera desde los albores de la época colonial. Las evidencias del aprovechamiento de lagos y pantanos mediante la creación de suelos para la agricultura en chinampas son quizá indicativas del precoz desarrollo de estos sistemas en el Occidente de México. En Michoacán, algunos informes arqueológicos permiten suponer dos variaciones para aprovechar agrícolamente los suelos palustres, lacustres y su humedad: los cultivos de zonas inundadas periódicamente durante la época de lluvias y despejadas de agua durante la época de estiaje. Las chinampas. Y una tercera técnica: la de las cajas de agua o entarquinados, la cual no parece tener antecedentes prehispánicos, pero que proliferó en todas las llanuras de la cuenca del Lerma desde la época colonial hasta mediados del siglo XX y aún sigue practicándose en los valles de Zacapu, Zamora y Yurécuaro. Respecto a las presas y canales, es significativa la abundancia de éstos en el tiempo en que las haciendas eran las unidades de producción predominantes⁴¹.

⁴⁰ SEMARNAT, CONAGUA. (2009). Semblanza Histórica del Agua en México. CONAGUA. Pág. 10-12.

⁴¹ Durán, J., Sánchez, M., & Escobar Ohmstede, A. (2005). El agua en la historia de México. Balance y perspectiva. Morelia, El Colegio de Michoacán. Pág. 50-53

2.1.3 El comercio colonial y los ríos

A pesar del clima cálido extremo de las llanuras de la costa del Golfo, la región del Sotavento⁴² adquirió un fuerte atractivo económico para algunos colonizadores hispanos. Su riqueza del paisaje natural y sus recursos, además de su posición geográfica y la navegabilidad de los ríos de la cuenca baja del Papaloapan, fueron factores suficientes para que a partir de la segunda mitad del siglo XVI se empezara a desarrollar una economía regional basada en cuatro vertientes fundamentales:

1. La convergencia de diversos ríos navegables que facilitaron la comunicación y el tránsito interregional.
2. La explotación de productos tropicales, base de la economía de exportación, regional e interregional.
3. La apropiación de enormes extensiones de tierra dedicadas a la ganadería.
4. La pesca y salazón del producto para su venta en los mercados de la sierra y valle de Oaxaca y en los del altiplano central.

Durante cuatro siglos la actividad mercantil tuvo como soporte la navegabilidad de los ríos. Todo esto, ya que los españoles aprovecharon los conocimientos técnicos que los indígenas tenían para construir canoas de una sola pieza de árbol y de la habilidad de los canoeros que conocían las épocas del año y las características de navegabilidad de los ríos.

Para fines del siglo XVII, el sistema mercantil del Papaloapan estaba bien configurado, y esta configuración y sus intereses se vieron favorecidos con la aplicación de las leyes de “libre comercio” expedidas entre 1765 y 1789. Así, el tráfico con Alvarado se mejoró, y éste justamente fue un puerto de gran importancia, la cual se conservó en la transición del periodo prehispánico al colonial. Y tanto era así, que hasta él llegaban canoas procedentes del territorio maya para intercambiar sal y otros productos con los habitantes del Papaloapan⁴³.

2.1.4 La llegada de los españoles

En los inicios de la época novohispana, la mayoría de los sistemas hidráulicos prehispánicos fue utilizada por los españoles sin mayores modificaciones, pero pronto transformaron técnicamente estos sistemas con la incorporación de las nuevas máquinas, tanto como por la necesidad de irrigar porciones territoriales continuas y de mayores dimensiones, al irse consolidando la propiedad territorial en sus manos, en detrimento de la de los pueblos (y en el contexto de la baja demográfica indígena). Pero las continuidades fueron también muy importantes y significativas hasta el punto en que muchas de ellas han pervivido hasta el presente.

Las innovaciones técnicas más significativas del periodo en materia hidráulica son, en un pequeño resumen, las siguientes:

Palancas. Éstas no fueron empleadas en la época prehispánica con fines hidráulicos. A la Nueva España llegaron en la forma de un instrumento muy sencillo, originario del antiguo Egipto, el bimbalete (bambilete, cigüeñal, shadouf), que permite a un sólo hombre extraer y elevar el agua de pozos, lagunas y ríos con una pértiga colocada sobre una horqueta o caballete que tiene en un extremo un

⁴² Territorialmente, el Sotavento es toda la franja costera de lomeríos y sabanas que se extiende a partir de la depresión de la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Juárez. Sus tierras llanas arrancan en la porción media del estado de Veracruz, el noreste de Oaxaca y el oeste de Tabasco; interrumpidos apenas por ese macizo montañoso que se levanta en la sierra de los Tuxtlas.

⁴³ Durán, J., Sánchez, M., & Escobar Ohmstede, A. (2005). El agua en la historia de México. Balance y perspectiva. Morelia, El Colegio de Michoacán. Pág. 106-109

recipiente y en el otro una piedra que le sirve de contrapeso. Llegó a la Nueva España en fecha no determinada, pero su presencia se registra en Río Verde (San Luis Potosí); Lago de Chapala y Guadalajara (Jalisco), Guanajuato e Irapuato (Guanajuato). Otra palanca manual estuvo en uso hasta no hace muchos años en el lago de Pátzcuaro, que se combinaba con un cucharón de madera con el fin de irrigar las parcelas contiguas.

Rueda. La rueda fue conocida y empleada en Mesoamérica, en juguetes, rodillos y malacates para hilar, entre otros, pero no en máquina alguna. En la colonia se hizo presente en diversas formas, entre las que se destacan ahora las utilizadas para elevar el agua y para mover maquinaria con fuerza hidráulica: las ruedas hidráulicas (norias, anorias: verticales y horizontales), las poleas (para sacar agua), los tornos (para lo mismo), los molinos (para trigo, caña de azúcar y otros, y para batanes de paños) y, más tarde, los tornillos (de Arquímedes) y los sifones invertidos.

Los acueductos sobre arquerías, para librar los accidentes topográficos por donde corría la atarjea o tubería, pronto sustituyeron a los acueductos prehispánicos sobre terraplenes. El arco se hizo igualmente presente en los puentes que complementaron o sustituyeron paulatinamente a los prehispánicos (colgantes o fijos, de troncos o entarimados).

Las cajas para el control de flujos o cajas repartidoras dotadas con “datas” (aberturas con dimensiones basadas en la “vara”, que iban de la “paja” y el “surco” hasta el “real” y el “buey de agua”, pasando por el “limón” y la “naranja”) fueron un nuevo e importante instrumento en lo que toca a los métodos de distribución tanto como a los derechos sobre el agua (Galván 1998:252-260). Las compuertas de tablonés y deslizantes (Doolittle 1990) sustituyeron a las prehispánicas, sobre las que se sabe muy poco.

Los animales de trabajo que, al lado de las carretas y carretillas, facilitaron el transporte de materiales y personas, las tareas agrícolas, artesanales, de albañilería, entre otros; jugaron por igual un importante papel en algunas de las máquinas basadas en la rueda, para extraer el agua de diversas fuentes como pozos y lagos.

El establecimiento de molinos, batanes y otros “ingenios” mecánicos movidos por agua, antes desconocidos, modificó profundamente el uso de los ríos y los sistemas hidráulicos indígenas al cambiar de función, básicamente porque, para poder contar con la fuerza necesaria, los nuevos edificios se colocaron en las cabeceras de los ríos. Otras innovaciones fueron las presas construidas con piedra cortada, ajustada y cementada; presas con contrafuertes y presas de almacenamiento sobre corrientes perennes, además de otros elementos arquitectónicos como cornisas, remates de los muros o caballetes, sardineles y gárgolas⁴⁴.

2.1.5 La higiene y salud pública

Durante el siglo XIX los avances de la bacteriología, la química y la ingeniería demostraron que la salubridad de la población estaba relacionada, entre otras cosas, con la calidad y cantidad de agua empleada en los usos domésticos⁴⁵.

La población mexicana sufría frecuentemente de viruela, tifo, fiebre amarilla y cólera, que en algunos años se convertían en epidemias. A partir de 1833, el “año del cólera”, las autoridades de casi todos los países comenzaron a proponer medidas preventivas respecto al manejo de los sistemas de abasto de agua potable. A partir de los trabajos de Louis Pasteur sobre los microbios, se estableció que las

⁴⁴ SEMARNAT, CONAGUA. (2009). Semblanza Histórica del Agua en México. CONAGUA. Pág. 20-21.

⁴⁵ Suárez Cortez, B. (1998). Historia de los usos del agua en México: oligarquías, empresas y ayuntamientos (1840-1940). CONAGUA; CIESAS; IMTA. Pág. 183

enfermedades infecciosas podían transmitirse principalmente por el agua que se consumía, así, los bacteriólogos insistieron en que se debería vigilar en los análisis del agua potable el que ésta estuviera libre de microorganismos causantes de enfermedades.

2.1.6 Los nuevos sistemas

Sistema de drenaje

Al mismo tiempo que existía un debate acerca del agua potable y la salud, los expertos iniciaron estudios para transformar el sistema de drenaje de las ciudades. El problema era que la mayor parte de las casas disponían sus desechos (materia fecal, las aguas de lavado y la cocina) por medio de estrechos caños conectados a la atarjea a la mitad de la calle. Los desechos sólidos quedaban asentados en los caños causando serios problemas de salud, y la limpieza periódica de las atarjeas era una operación pesada, y molesta para las autoridades y particulares.

Pero lo que es aún peor, el sistema de drenaje antes del siglo XIX, consistía en arrojar la materia fecal a los caños de las calles, para que después fuera transportada fuera de la ciudad por medio de carros. Por esto, los expertos insistían en que un mejor medio para deshacerse de los desechos era construir un sistema de drenaje que empleara el agua como vehículo para evitar la acumulación de la materia fecal cerca de la población.

En 1891 Roberto Gayol señalaba que este sistema ayudaría al saneamiento de la ciudad, no sólo porque podrían expulsar los desechos de sus casas sino también porque se le daría salida a las aguas pluviales, lo que evitaría inundaciones.

Sistema de agua potable

Los ingenieros de ese tiempo, consideraban que la hidráulica colonial o “sistema en línea”, que distribuía agua potable por medio de una red formada por distintas ramas o acueductos independientes entre sí, resultaba inadecuado para satisfacer las necesidades de los habitantes de los centros urbanos.

Así, en Londres, a mediados del siglo XVIII, se diseñó y construyó un nuevo “sistema en red” que pretendía distribuir el agua potable a un mayor número de usuarios. Pero esto hacía que fuera necesario calcular el aforo de las fuentes de abasto y las necesidades de los que se beneficiarían del sistema, y además los encargados se enfrentaban a otro tipo de problemas técnicos, como el estudio de la topografía e hidrografía de la ciudad, la velocidad del flujo y el diámetro de los tubos.

El sistema en red consistía en distribuir el agua por medio de tuberías conectadas entre sí, con válvulas conectadas en cada sector para suspender el suministro de agua. Esta red estaba formada por circuitos de tuberías, que eran abastecidos por una fuente o depósito. Esto presentó una gran ventaja, en caso de interrupción del abasto a un sector el sistema permitía abastecerlo con el líquido proveniente de otras fuentes. El sistema en red presentaba varias ventajas con relación al anterior: garantizaba un volumen más regular y además permitía mejorar las condiciones higiénicas del agua, y en consecuencia, de la población.

En 1884 el doctor José Lobato, señalaba para el caso de México, que con el sistema en red o “aferente” se conseguirían mejoras en la salubridad pública y se constituiría “la repartición particular”, al dotar a todos los propietarios de fincas de agua suficiente para sus necesidades. Lobato concluía diciendo que el nuevo sistema “es el mejor, bajo todos los conceptos, para abastecer la ciudad en sus necesidades económicas y es el más higiénico que se puede hallar en la actualidad para conseguir este objetivo”.

Por otra parte, el uso de la energía eléctrica y de las bombas hizo posible imprimir al agua la presión suficiente para elevarla a la parte alta de las casas y efectuar su distribución interior, según la conveniencia de los propietarios, en lugar de recibirla en la parte baja y limitarse a almacenarla en una fuente. Sin embargo, esta innovación también requirió el mejoramiento de las obras hidráulicas.

2.1.7 Los pozos artesianos

A principios del siglo XIX la apertura de pozos artesianos en Francia causó euforia, ya que se creía que esto resolvería el problema de proporcionar un abasto constante de agua a bajo costo para la industria. A mediados del siglo, en México también se confiaba en que la apertura de pozos sería la gran solución a la insuficiencia para el riego, la industria y las ciudades. En el valle de México, en 1857 había 144 pozos perforados, mientras que en 1883 había 483. Desde 1832 el Congreso del Estado de México había facultado al gobierno de Melchor Múzquiz a gastar hasta \$1 000 en la apertura de pozos artesianos y para emplear hasta \$3 000 en la compra de un barreno para abrirlos, aunque se desconoce si llegaron a perforarse.

2.1.8 Empresas privadas de agua potable

Las empresas privadas de agua potable florecieron en el periodo porfiriano y son una expresión del gran crecimiento económico ocurrido en esos años. La infraestructura heredada de la Colonia presentaba graves deficiencias; el agua se contaminaba fácilmente, se perdía por robo o filtraciones, y las reparaciones hacían que el servicio se suspendiera por largos periodos.

Las empresas de agua ofrecían dotar a las ciudades de grandes volúmenes mediante un nuevo sistema de distribución del agua potable, así mismo, los empresarios argumentaban que este ramo no producía ganancias para los ayuntamientos. Y decían que, en cambio, en manos de empresas privadas se podría dotar de más y mejor agua, como ocurría en Inglaterra, Francia y los Estados Unidos. En Francia e Inglaterra se contaba con experiencias diversas, pues este tipo de empresas se había iniciado desde fines del siglo XVIII. Estas empresas trataron de ampliar y mejorar la cobertura de agua potable, sin embargo, sus esfuerzos fracasaron y los sistemas retornaron a manos de las autoridades públicas.

Las reformas de los sistemas de abastecimiento de agua implicaban grandes cantidades de dinero, cosa que los ayuntamientos no podían afrontar, lo cual provocó que se confiara el en sector privado. Esto con el objeto de asegurar la construcción de nuevos sistemas de agua potable.

Las primeras referencias que se tienen sobre una compañía de agua potable hablan de una empresa en la ciudad de Puebla, formada en 1855. Posteriormente, durante el gobierno de Porfirio Díaz se impulsó esto, dando amplias concesiones a los empresarios. Los ayuntamientos optaron por contratar el servicio de agua a empresas privadas, cediendo el control de las fuentes de abastecimiento y con las empresas asumiendo el cobro de impuestos y la aplicación de multas a usuarios morosos.

Desde 1855 con la primera concesión, y hasta 1929, los contratos estipulaban condiciones ventajosas para los empresarios. Aunque es cierto, que después de la fundación de la empresa en Puebla no se tienen registros de otra sino hasta 1887, una compañía en la ciudad de Culiacán. En 1904 el gobierno del estado de Nuevo León, firmó un contrato con James D. Stocker y William Walker para construir y explotar un sistema de agua potable y drenaje; además, el ayuntamiento cedió sus derechos para captar aguas subterráneas en terrenos municipales. Y en la ciudad de México, el 28 de abril de 1927, Brarrif formó una empresa llamada Hidros S.A., que se habría encargado del servicio de agua en Villa Cecilia, Tamaulipas.

Desde que se formó la primera empresa privada de agua potable, comenzaron los conflictos por la negativa de los usuarios a ceñirse a los lineamientos de los contratos, aunado a eso, las empresas

también enfrentaban la oposición de sectores de la población que no estaban de acuerdo con las cuotas. La falta de legislación específica para regular el servicio a las poblaciones, explica que los contratos referidos a tal servicio tuvieran variantes, pues su duración podía llegar hasta 99 años. Posteriormente, las obras hidráulicas debían pasar a los ayuntamientos. En otros contratos la duración era menor, con opción a ampliar los términos.

Ya para 1917, en el terreno hidráulico, la constitución consolidó un completo y lento proceso de centralización que había iniciado con la expedición de la ley de junio de 1888. Un aspecto importante de ese proceso era el fortalecimiento del gobierno federal como instancia suprema en el manejo de los recursos hidráulicos, que trajo consigo el desplazamiento de gobiernos estatales y de los ayuntamientos en el manejo del agua. Después de 1917, la Secretaría de Agricultura y Fomento (SAyF) comenzó a ejercer un creciente control sobre los usos del agua, en especial en materia de concesiones⁴⁶.

2.1.9 El agua ¿Un factor de poder?

El agua un recurso natural, de utilidad para todos los seres humanos puede ser entendida de muchas formas como un bien. Cuando es público, pertenece al territorio en el que se encuentra y puede ser utilizada por quienes quieran hacerlo, sean o no vecinos de dicho territorio. Pero cuando es un bien particular, sólo puede ser utilizada por algunos, aquellos que tengan un convenio con el régimen político existente. De esta manera el que la posee se vuelve poderoso ante quien no, pero que también necesita de ella. Y esto puede causar muchos conflictos.

Pero para que el agua pase a ser un bien particular, siempre debe haber un reglamento, esto nos remonta hasta el primer artículo del *“Reglamento General de las Medidas del Agua”*, expedido en 1761 por fray Domingo de Lasso, según el cual:

Al rey pertenecen los bienes mostrencos⁴⁷, de naufragio, vacantes ab intestato⁴⁸, aguas, tierras y minas; por lo que todas las aguas de los ríos públicos, son del común sólo para los usos domésticos; pero no se pueden conducir para irrigar los fundos privados sin un permiso especial de la Corona⁴⁹.

Pero estos permisos no los conseguía cualquiera; estos implicaban un alto costo, ya que se debían hacer estudios, se debían levantar planos y mapas. Por lo cual, sólo una persona privilegiada podía obtenerlos. Sin embargo, el individuo no tenía completo poder sobre el agua: la cantidad que podía ocupar era dictada por la ley, aun así, esta persona era poderosa ya que tenía cierta prioridad sobre los que no gozaban de dicho permiso.

En el México colonial, el crecimiento demográfico, tanto indígena y mestizo como el de los grupos europeos, causó que el problema del agua se agrandara, provocando una menor irrigación y creando conflictos entre los terratenientes por la posesión del líquido⁵⁰. Durante el virreinato, la institución eclesiástica era una de las más fuertes económicamente y uno de los ramos de los cuales obtenía

⁴⁶ *Ibid.*, pág. 151, 188-207, 215-217

⁴⁷ Mostrencos: Son todos aquellos bienes, que se encuentran perdidos, abandonados o deshabitados y sin saberse su dueño.

⁴⁸ *Ab intestato*: Sin testamento o testamento nulo.

⁴⁹ Reglamento general de las medidas del agua, Lanz, legislación de aguas, 204; Galván, Ordenanzas de tierras y aguas, 200.

⁵⁰ Durán, J., Sánchez, M., & Escobar Ohmstede, A. (2005). El agua en la historia de México. Balance y perspectiva. Morelia, El Colegio de Michoacán. Pág. 136, 140.

beneficios económicos era a través de las obras pías⁵¹. Lo cual alentaba los favoritismos entre los mismos miembros de la hegemonía, y se premiaban las influencias.

Después de la lucha de independencia y la ruptura con España, el nuevo país debía construir su identidad como nación, proceso que le llevó mucho tiempo. Situación que se vio reflejada en las cuestiones agrarias, las cuales se siguieron manejando conforme a la legislación colonial, por lo que en la población rural mexicana no se notó un gran cambio en la actuación de las autoridades municipales. Algunas haciendas cambiaron de dueño, otras permanecieron con el dueño anterior y las tierras se siguieron trabajando de la misma forma que la Corona había autorizado durante la colonia.

De este modo, con el control del agua se obtiene un control económico, lo cual conlleva a uno social y algunas veces (no pocas) a uno político.

2.1.10 La legislación

A partir de la segunda década del siglo XX, la política del Estado inicia una nueva etapa, caracterizada por una intensa labor de reglamentación de las principales corrientes del país y el establecimiento de las organizaciones de usuarios (Juntas de Agua), las cuales se encargarían de implementar reglamentos, esto con el fin de mantener una vigilancia permanente de los procesos de distribución y de esta forma tener control sobre los aprovechamientos. Pero esta política se vio limitada tanto por la capacidad de respuesta de los usuarios, como de la organización social en torno a ésta⁵².

La constitución de 1917 le otorgó al Estado amplias prerrogativas con respecto a la propiedad sobre la tierra, el agua y los recursos del subsuelo, entre otros. Aun así, el Estado no logró que los participantes en permisos y concesiones llegaran a respetar y cumplir completamente con los principios establecidos; por ello, en ocasiones tuvo que recurrir a imposiciones. Pero algunas veces, en conflictos relacionados al agua, el Estado se ausentaba, debiendo los involucrados implementar soluciones al margen de él.

El artículo 27 de la Constitución de 1917 estableció que la nación era propietaria original de tierras, aguas y subsuelo comprendidos dentro de su territorio. En lo referente al agua, esta ley ratificaba la ley de diciembre de 1910, que definía qué corrientes podían ser consideradas propiedad federal, haciendo de lado los criterios de navegabilidad y flotabilidad de la legislación anterior. En esta ley se adoptaron de manera definitiva los conceptos de dominio público y propiedad inalienable e imprescriptible de la nación sobre los tipos de corrientes. Aunque a diferencia de la ley de 1910, en las leyes agrarias derivadas del artículo 27 se introdujeron a los ejidos como usuarios del líquido y no sólo a los empresarios o empresas privadas como la anterior ley contemplaba.

Más tarde la ley de agosto de 1929, que derogó a la de 1910, hizo posible modificar los derechos de los concesionarios cuando la ley considerara necesario, así mismo, especificaba que el poder ejecutivo estaba facultado para modificar los derechos de los concesionarios cuando se reglamentaran las corrientes. Claro, previo estudio de los aprovechamientos, de los volúmenes disponibles y de las necesidades actuales de las zonas que las aguas beneficiaran. Esta ley también introduce a las Asociaciones de Usuarios, las cuales tenían como funciones: dirigir la gestión del líquido en sus respectivas agrupaciones; e informar a la Secretaría de Agricultura y Fomento de la resolución de conflictos, y sobre la administración de los sistemas de riego. Más tarde, la ley de aguas expedida en agosto de 1934 especificó con mayor precisión la forma de elección de las juntas directivas y los

⁵¹ Pía (o): Que tiene o muestra una profunda devoción religiosa y cumple las prácticas propias de su religión.

⁵² Durán, J., Sánchez, M., & Escobar Ohmstede, A. (2005). El agua en la historia de México. Balance y perspectiva. Morelia, El Colegio de Michoacán. Pág. 143, 153, 321.

requisitos para constituirse en asociaciones de usuarios, estipulando que una vez reglamentados los aprovechamientos, éstos podían constituirse en Juntas de Aguas si así lo determinaba el conjunto de los usuarios y lo aprobaba la Secretaría de Agricultura y Fomento⁵³.

2.1.11 Caso particular: Querétaro y los conflictos por el agua

El agua fue un factor importante en los conflictos sociales que se suscitaron en Querétaro desde el siglo XVI. La limitada cantidad de agua disponible obligó a buscar diversas formas para apropiarse de ella: el arrendamiento, la explotación de nuevos recursos, el acaparamiento y el robo fueron algunas de esas formas. El desarrollo de la actividad industrial, la apertura de nuevas tierras de cultivos, la formación de nuevos asentamientos en las haciendas, y el cambio de cultivos provocaron una mayor presión sobre el recurso hidráulico que concluyó en pleitos que en ocasiones duraban varias décadas. El reparto del agua del río de Querétaro de 1654 fue resultado precisamente de un conflicto, en este caso entre los indios y el convento de Santa Clara. Con ello se pensaba dar solución a los problemas; para esta nueva distribución se tomó como base la anterior y se solicitaron a los interesados los títulos que comprobaran su derecho al agua.

El robo del agua era muy común. Las tomas clandestinas en las cañerías, tanto de agua sucia como de agua limpia, reducían de manera considerable las cantidades de agua que llegaban a las fuentes públicas y a las tomas para el riego. Una de las formas más comunes de usurpar el agua era bajar la toma, con lo cual se obtenía una mayor carga y por consecuencia mayor gasto que el autorizado.

Ejemplo de ello fue el conflicto de 1863 entre Crescencio Mena y Esteban de la Madrid, dueños de las haciendas de “La Capilla” y “El Jaral”. Quienes solicitaron al ayuntamiento que se corrigieran los abusos de los vecinos del barrio de Santa Rosa en Querétaro, los cuales habían modificado el marco de la toma de agua de riego⁵⁴.

Un problema que además agravaba los conflictos era el desconocimiento de la legislación vigente y la falta de leyes más detalladas, lo cual ocasionó que a veces se traslaparan las funciones del ayuntamiento y del poder judicial. Las referencias a las leyes a veces eran tan vagas que se pedía solución a un conflicto con frases como: resuélvase de acuerdo “a las leyes vigentes”; “conforme a la ley”; lo que la “ley señale” pero no se sabía con certeza a cuáles ordenamientos se referían exactamente. De allí que cada quien hiciera uso de ellas a su conveniencia, sobre todo quienes detentaban el poder⁵⁵.

Así, en el imperio de Maximiliano se dio una mayor apertura a las demandas de las clases desposeídas. Un ejemplo de ello fueron las leyes del 5 de julio y 15 de septiembre de 1865, que restituyeron la personalidad jurídica a las comunidades indígenas y reconocieron sus derechos a la posesión de tierras comunales. Otra muestra fue la creación de la junta protectora de la clase menesterosa⁵⁶. La junta era un órgano de consulta, y aunque como tal no tenía la capacidad de decisión, podía recibir y estudiar quejas, pedir información para dictaminar, y proponer posibles soluciones. La junta siempre gozó del apoyo del emperador en sus asuntos y tuvo acceso directo a él⁵⁷. La sola existencia de esta junta y la

⁵³ *Ibid.*, pág. 237-241.

⁵⁴ Suárez Cortez, B. (1998). Historia de los usos del agua en México: oligarquías, empresas y ayuntamientos (1840-1940). CONAGUA; CIESAS; IMTA. Pág. 41, 54.

⁵⁵ *Ibid.*, pág. 103.

⁵⁶ Menesteroso (a): Que carece de lo necesario para vivir.

⁵⁷ Suárez Cortez, B. (1998). Historia de los usos del agua en México: oligarquías, empresas y ayuntamientos (1840-1940). CONAGUA; CIESAS; IMTA. Pág. 84.

rapidez de sus contestaciones, hicieron despertar las esperanzas de los pueblos indígenas y de los sectores urbanos y rurales menesterosos.

Las industrias y obras hidráulicas de Cayetano Rubio, un empresario dedicado a la producción de telas, constituyeron un cambio profundo en la historia de los usos del agua de Querétaro. La compra de nueva maquinaria y la apertura de nuevas fábricas dieron a los usos del agua del río de Querétaro una lógica mucho más compleja que rebasó el ámbito local. La apertura de socavones para la obtención de agua subterránea y el acueducto de conducción y distribución causó admiración aun entre la misma elite de aquellos tiempos. El costo de estas obras, más de un millón de pesos, fue un negocio audaz al que muy pocos podían arriesgarse en el país, lo cual nos da una idea de la importancia de este empresario en Querétaro. Cayetano Rubio logró importantes vínculos con los gobiernos por su actividad como prestamista. La dependencia gubernamental con respecto a los agiotistas les dio a éstos gran influencia en la obtención de privilegios de diversa especie. Rubio se convirtió en uno de los principales prestamistas: en 1856 prestó al gobierno 198 456 pesos lo que implicaba el 23% del total de los préstamos recibidos por el gobierno en ese año.

Por otro lado, la falta de solvencia económica y la debilidad política obligaron a los gobiernos a trasladar a los prestamistas todas las actividades que no podían satisfacer, provocando a que dichos gobiernos se vieran obligados a ceder ante las exigencias de los prestamistas.

Si bien la base de las obras hidráulicas de Rubio fue la red de almacenamiento y distribución de la época colonial, ésta fue insuficiente para las necesidades de los nuevos establecimientos. Rubio recurrió a distintas formas de apropiación y concentración de los recursos hidráulicos, por un lado, los distintos convenios de la ciudad le permitieron disponer de casi todo el caudal del río; por otro, las obras hidráulicas construidas bajo su iniciativa duplicaron el volumen disponible en la ciudad. Pero este logro que aparentaba ser de gran utilidad pública, era en realidad un recurso casi exclusivo de la Casa Rubio⁵⁸.

Ya para 1853, la inversión requerida para establecer un suministro más eficaz, rebasaba lo que hasta entonces cualquier particular hubiera estado dispuesto a invertir sin obtener ganancias. Era necesaria la deparación de todo el sistema de distribución. También era indispensable mejorar la vigilancia sobre el uso del líquido.

El ayuntamiento parecía haber entendido, por lo menos a partir de ese mismo año, que su injerencia en este ramo debía ser más decisiva. No obstante, las autoridades municipales sólo pudieron dar inicio a las mejoras del sistema de abasto hasta 1861 cuando recibieron el apoyo decidido del gobierno del estado.

El 26 de octubre de 1861, el gobierno liberal de Felipe Berriozábal expidió un decreto que establecía un impuesto obligatorio para todos los propietarios de viviendas ubicadas en las calles por donde se colocaría la tubería de plomo. El impuesto, denominado "del derrame", ascendía a 24 pesos anuales y tendría vigencia durante el tiempo que demorara la colocación de la tubería. Así, por primera vez el ayuntamiento contaba con fondos destinados especialmente a este ramo.

El decreto del 23 de octubre de 1861 representó una continuidad en el proceso de fortalecimiento del ayuntamiento como responsable del servicio de agua; sin embargo, introdujo por primera vez el apoyo del gobierno del estado en este rubro.

La tubería sólo cubría el centro y poniente de la ciudad, en donde habitaban las familias con mejor posición económica, y dicha entubación tuvo un costo total de 21 141 pesos. En 1862 inició la

⁵⁸ *Ibíd.*, pág. 101-102

colocación del tubo de plomo a pesar de que las tuberías de plomo ya habían sido desechadas en otras ciudades porque se les consideraba nocivas para la salud. En la Ciudad de México desde 1719 se sustituyó la cañería de plomo por la de barro, pues se atribuyó a este material la aparición de una extraña enfermedad estomacal⁵⁹.

Según Suárez Cortez, durante el porfiriato el desarrollo de la industria; el incremento de la población; y las ideas liberales de progreso, que se materializaron en la construcción de obras públicas y en la limpieza de las localidades; se conjugaron para dar lugar a un notable crecimiento del consumo de agua. Hecho que requirió montos de inversión cada vez mayores. El financiamiento de las nuevas obras de captación y distribución del agua, requirió de la aplicación de vías autoritarias que motivaron fricciones entre las autoridades municipales y diversos sectores de la población.

Un ejemplo de esto, en 1908, con la escasez de recursos municipales y el afán de aprovechar todos los recursos hidráulicos disponibles, condujeron a la comisión de aguas que fungía en ese momento, a adquirir 1 800 metros de tubería de hierro de segundo uso, provenientes de una fábrica de gas para alumbrado en Veracruz. La compra e instalación de la tubería requirió de una erogación de 20 000 pesos, pero cuando se pretendió usar el agua, se descubrió que el líquido no servía para el consumo personal, puesto que conservaba un sabor y olor desagradables, y resultaba dañina para la salud. La dirección del Servicio Sanitario del estado advirtió que el consumo de esa agua podía causar trastornos digestivos, pues conservaba carburos de hidrógeno y la simple acción mecánica del paso del agua no bastaba para limpiar los tubos. Después de un examen practicado por una comisión especial del ayuntamiento, integrada por el doctor Esteban Uribe, el farmacéutico Rafael Araujo y el licenciado Rafael García Moreno, se concluyó que el líquido sufría de alteraciones que hacían imposible suministrarla al público. A final de cuentas la tubería fue sustituida por tubos nuevos comprados a una compañía francesa⁶⁰.

2.1.12 Caso particular: La Ciudad de México

Imaginario colectivo

El agua desempeñaba un papel crucial en todas las culturas del México antiguo como lo muestra la importancia de los cultos vinculados con las divinidades acuáticas entre los pueblos mesoamericanos antes y después de la conquista de los españoles. Se sabe que el agua gozaba, al igual que el fuego, de un estatuto especial, que debía a su origen misterioso y divino. El agua y el cielo para los pueblos indígenas parecen haber sido una sola entidad, así lo señala el franciscano Sahagún en su *“Historia general de las cosas en la Nueva España”*, compuesta en el siglo XVI de acuerdo con las narraciones de numerosos informantes de la lengua y de la cultura náhuatl. De acuerdo con el antropólogo alemán Eduard Seler, los mexicanos representaban la tierra como un gran disco rodeado por agua, un poco a semejanza del océano de Homero. Este océano prehispánico llevaba el nombre de *cem-anahuatl* (el anillo completo). Cada día, el sol salía del mar por el oriente, para hundirse en él de nuevo durante el crepúsculo por el occidente. Y al igual que el sol, los muertos debían atravesar un mar inmenso para llegar al *mictlán* (los infiernos), mar que se denominaba *chiconauh apan* (“nueve veces el mar” o “mar que se extiende en todas las direcciones”). En el universo de los aztecas, la tierra se concebía como una isla suspendida entre el cielo y el mar.

A consecuencia de su naturaleza divina, el agua posee cualidades que le permiten hacer milagros. Encierra una fuerza; virtudes mágicas, que el hombre ha de utilizar en beneficio propio. Tanto Sahagún como Jacinto de la Serna mencionan la utilización del agua en la curación de enfermedades. Cuando,

⁵⁹ *Ibíd.*, pág. 120-121

⁶⁰ *Ibíd.*, pág. 151

por ejemplo, un niño se enfermaba de algo cuyo origen no se lograba descubrir, el médico (o brujo) recurría al antiguo sortilegio del agua. En ese caso, se llamaba al *atlantlachixtle*, es decir, al que adivina mirando el agua. Colocaba la cara del niño encima del recipiente: si la cara aparecía como velada por una nube o una oscuridad, era que su propia estrella, su destino, se hallaba en peligro. Al contrario, si la imagen era clara e impoluta, la enfermedad podía curarse rápidamente. La quema de incienso y el hacer respirar los vapores al enfermo bastaban para apresurar la curación. Pero si el caso se presentaba más complicado, el agua era de todos modos el mejor remedio. En efecto, según Jacinto de la Serna “tienen a el agua por el principal ingrediente de esta acción, porque le atribuían el nacimiento de las criaturas”. Es el agua a la que se le pide que vuelva a hallar y a curar la estrella del niño enfermo.

En ese momento de la historia, el agua representaba un mundo mágico y fabuloso, pero también permanecía como un mundo mal conocido, amenazante, en donde se refugiaban seres que escapaban a las normas: animales fabulosos, monstruos, dioses. De esta manera, nace un verdadero bestiario fantástico del agua, fundado en las creencias, los terrores o las esperanzas no sólo de los indígenas, sino también de los españoles.

Para los mexicanos de ese entonces, las aguas interiores representaban un mayor temor, ya que el mar les representaba un mundo alejado y con el cual los contactos eran raros. Es por eso que los lagos y ríos estaban muy relacionados a historias de monstruos acuáticos, cubiertos de plumas, pelos, o bien escamas.

Para los españoles, el bestiario de los mexicanos les parecía ridículo y motivo de burlas. Sin embargo, ellos tenían en su imaginario cultural su propio mundo fantástico relacionado al agua lleno de bestias, aunque para ellos el mar era el centro de casi toda su atención. Lo monstruoso de estas criaturas viene de sus características antropomórficas. Esta búsqueda asidua de la apariencia humana, culmina en el eterno mito de la sirena o también denominado hombre-pep.

En efecto, cuando los españoles arribaron a México en 1519, sus conocimientos científicos con los cuales explicaban al mundo, provenían de manera directa de la Edad Media y del Renacimiento y, por ende, de la antigüedad grecolatina. Así, en el siglo XVI, el ciclo del agua como ahora lo conocemos (evaporación, condensación y precipitación) el cual es un ciclo aéreo y que parece lógico e irrefutable, no era de esta forma, pues se pensaba que se hacía por la vía subterránea. Y para los eruditos de la época, las “anomalías de circulación” que no concordaban exactamente con las teorías, les provocaban confusión, y no siempre lograban hacer la elección entre las teorías aristotélicas o las de Séneca. En su libro “*Historia genera*”, Sahagún aborda el tema del agua en varias ocasiones, en el cual explica que, para los antiguos mexicanos, todos los ríos salían del mismo lugar, el Tlalocan, paraíso terrestre gobernado por Tláloc, dios de la lluvia, y Chalchiutliue, diosa de las aguas terrestres. Pero las montañas también tenían un papel importante en esta hidrología mítica: eran concebidas como huecas y llenas de agua; de las cuales brotaba este líquido⁶¹.

Al igual que muchas cosas para los indígenas, la lluvia era un fenómeno sobrenatural. Para ellos la lluvia era enviada por Tláloc, aunque también había una creencia extendida de que, el dios del viento, *Ehecatl*, transformación de Quetzalcóatl, trazaba el camino de la lluvia delante de las nubes. Es por esa naturaleza sobrenatural conferida a la lluvia, que, para el pronóstico del tiempo, se desarrolló una técnica que combinaba observaciones empíricas y creencias religiosas. Y claro, para ellos este pronóstico les permitía hacer previsiones, tanto para cuando los dioses eran excesivamente avaros, y

⁶¹ Musset, A. (1992). El agua en el valle de México, siglos XVI-XVIII. CEMCA; Pórtico de la Ciudad de México. Pág. 19-27, 43.

hubiera sequías, así como para cuando los dioses eran demasiado generosos y las inundaciones destruían las cosechas.

El nivel de los lagos y la llegada de los españoles

A más de dos mil metros de altura, después de haber escalado un paso de montaña que separa dos volcanes cubiertos de nieves eternas los conquistadores encabezados por Hernán Cortés tuvieron la sorpresa de descubrir el valle de México y sus lagos. Para cuando llegaron al borde del agua, se creyeron transportados a una de esas novelas de caballería que algunos habían leído y de las que todos habían oído hablar: ante su vista se extendían lagos con aguas claras y sobre esos lagos se elevaban ciudades-jardín, unidas a tierra firme mediante calzadas de piedras blancas. En su segunda *Carta de relación* a Carlos V, Cortés abordaba ya el problema de los lagos y hacía notar que el valle de México, se hallaba rodeado de tres altas montañas que impedían la salida de las aguas al exterior; dos vastas “lagunas” lo ocupaban por entero⁶².

Los lagos que cubrían el fondo de la cuenca de México nunca fueron muy profundos (como máximo 2.5m en el lago de Texcoco), y en ello radica una de las numerosas causas mencionadas por los españoles para justificar su insalubridad. Al ser una capa de agua superficial, se secaba rápidamente durante el invierno cuando no llovía, dejando al descubierto vastas extensiones nauseabundas. En verano, en cambio, lluvias a penas un poco más fuertes de lo normal, provocaban que se saliera de su lecho e inundara todo. Según Humboldt, el suelo arcilloso presentaba una superficie en cierto punto regular, y en una superficie de una milla de largo, el nivel no era superior a dos centímetros. Lo cual, de acuerdo a sus cálculos, provocaba que cuando el viento del este soplara hacía que las aguas refluyeran 600 metros de largo. Según numerosos observadores, el agua de los lagos no cesó de bajar desde la llegada de los españoles. Evidentemente gracias a los trabajos de desagüe emprendidos por la Corona en 1607, aunque según Torquemada, López de Gamara y Motomolina las aguas comenzaron a bajar a partir del año 1524. En 1543, los lagos de Zumpango y de Xaltocan ya estaban separados de los otros de forma permanente, provocando la ruptura del comercio lacustre y el fin de una vida de comunicación utilizada por las chalupas indígenas.

Según el etnohistoriador Ángel Palerm, la destrucción del sistema de diques construido por los antiguos mexicanos había contribuido a la desecación parcial de las zonas lacustres. Cuando llegaron los españoles, destruyeron los diques que protegían la ciudad de las inundaciones, pero que además ayudaban a retener el agua durante la época de secas. De hecho, se conjugaron varios factores, el envejecimiento de los lagos, el déficit de precipitaciones, la evaporación que el agua sufre a la altitud y latitud de la ciudad de México (acentuada por la deforestación sufrida desde la conquista), como causas naturales, y la llegada de los españoles como causa antropogénica, convirtiéndolo en un proceso ineludible. Aunque también Humboldt se adelanta y propone una causa más, la filtración por la tierra debido a las fallas múltiples por las que atraviesan las rocas basálticas. Esta teoría era apoyada por el franciscano Agustín de Betancourt para quien el agua de las lagunas se consumía por los poros y las venas del subsuelo. Pero el mayor problema de esto, no es la desaparición en sí, sino la rapidez con la que ésta se dio; ya que el medio natural no pudo adaptarse con la misma velocidad a las nuevas condiciones.

Así, como generalmente pasa, la mano del hombre no hace más que acelerar los procesos naturales, que en este caso particular había iniciado desde las eras geológicas. Los depósitos lacustres

⁶² Musset, A. (1992). El agua en el valle de México, siglos XVI-XVIII. CEMCA; Pórtico de la Ciudad de México. Pág. 48-49, 58.

acumulados en la cuenca demuestran que, en el periodo cuaternario, los lagos cubrían una superficie sin comparación a la que se encontraron los españoles a su llegada en 1519.

A principios del siglo XVII, el ingeniero cosmógrafo Enrico Martínez señalaba que los conquistadores habían introducido el ganado y el arado, lo que permitía a los agricultores practicar labranzas profundas; nefastas para los suelos frágiles. Y con la necesidad de tierras nuevas, las laderas de los cerros fueron cultivadas, las cuales estaban hasta ese entonces abandonadas. El suelo se volvió más sensible a la intemperie y cada lluvia arrastraba material hacia el fondo de la cuenca, esto es, hacia los lagos. De esta manera, no sólo el nivel del lago disminuía, también el fondo se elevaba. Con esta nueva agricultura se desarrolló de la misma forma el sistema de roza, tumba y quema. Estos desmontes aceleraron la erosión del suelo, y dejaron al descubierto una capa estéril y dura: el *tepetate*.

Y la tala desmedida no contribuyó poco a este problema. La utilización masiva de leña en la construcción o para el hogar, en la Ciudad de México durante los siglos XVI al XVIII, consumía 25 000 árboles anuales, únicamente para hacer los pilotajes.

El transporte lacustre

El transporte, de todas las actividades desarrolladas, desempeñaba un papel realmente importante en el crecimiento de las ciudades de la cuenca del valle de México. Los puertos; los puntos de carga y descarga; las vías de comunicación; los canales; y las esclusas, todos ellos parte del sistema. El cual se puso en entredicho a la llegada de los españoles. Durante cuatro siglos el transporte terrestre y el transporte lacustre se enfrentaron. Dos culturas y dos sistemas económicos distintos.

El centro de esta actividad se encontraba en el puerto de la Ciudad de México donde las acequias eran surcadas por una multitud de embarcaciones, transportando los más diversos productos, las calzadas que unían la ciudad a tierra firme no eran más que una ínfima parte del tráfico. Para una sociedad que no conocía los animales de tiro o de carga, y en donde el hombre era el único medio de transporte por tierra, la navegación ofrecía ventajas incomparables.

Según estudios realizados por Gibson, se supone que, en la época de Cortés, había entre 100 mil y 200 mil canoas en actividad en la cuenca. Como señala Carlos J. Sierra en su estudio sobre la historia de la navegación en la ciudad de México, a fines del siglo XVII en épocas de cosecha, la ciudad recibía cada semana 5 000 fanegas de maíz transportado por canoas (277.5 metros cúbicos). El medio tradicional de propulsión era el remo, los españoles desarrollaron el uso de la vela, pero éste nunca dejó de ser marginal en la cuenca del valle de México.

El tráfico por las vías lacustres, involucraba una multitud de productos: comestibles (maíz, trigo, cebada); materiales de construcción (piedra, madera, arena, cal); y productos que venían de tierras más cálidas (azúcar y algodón).

Al norte y al oriente de la cuenca, el retroceso de las aguas implicó una rápida decadencia de las vías de comunicación lacustres. Desde la segunda mitad del siglo XVI, sólo las canoas más ligeras podían recorrer el lago de Texcoco de una orilla a la otra sin problemas. Pero este tipo de transporte, no sólo fue víctima de la desaparición de los lagos, también eran motivo de rivalidades y luchas entre las comunidades indígenas, que ejercían un monopolio. Y a los españoles no les parecía que los indígenas controlaran el tráfico regional; por lo cual, sucumbió ante imperativos económicos y políticos.⁶³

⁶³ *Ibíd.*, pág. 153-164.

Normatividad del agua

La información acerca de este tema es poca y los documentos que existen en este rubro son documentos de procesos o de archivos sobre herencias, o los planos que acompañan dichos documentos. Pero tales documentos tienen cierta cultura colonial, incluso cuando se trata de procesos en los que se enfrentan entre sí comunidades indígenas, el juez es español y el procedimiento se inspira en el derecho romano.

Según la ley de los conquistadores, el agua, las tierras, los campos, los bosques y los pastos pertenecían al rey. El uso del agua era comunitario y cada quien tenía derecho a él libremente, lo cual no impedía que los propietarios del agua, la vendieran a quienes la necesitaran. Y contrario a lo que podría pensarse de principio, uno de los primeros empeños de la Corona española fue proteger ciertas costumbres indígenas contra los españoles. Una real cédula del 20 de noviembre de 1536 indica que la distribución del agua debía hacerse como lo acostumbraban los indios. Algunos años más tarde, perdieron ese derecho sobre el control del agua.

El Cedulaario Indiano de Diego de Encinas señalaba que correspondía a los miembros de la Audiencia designar a los jueces del reparto del agua. En 1563 apareció una ordenanza que daba prioridad a los miembros del consejo municipal de una ciudad nueva cuando había que repartir el agua entre los habitantes⁶⁴.

Las inundaciones y el desagüe de los lagos

Para muchos habitantes de la capital, el agua es un problema crucial cotidiano. Lo cual si lo pensamos de manera detenida suena como una paradoja, pues tres siglos se requirieron para expulsar el agua que ahora se trae de los valles periféricos a precios exorbitantes. Pero el desagüe y la desecación de los lagos y lagunas del valle de México tenían una justificación importante, las inundaciones.

Las inundaciones que padeció la Ciudad de México a partir de 1555 obligaron a los españoles a hacer frente a esta realidad. En un principio se intentó utilizar los sistemas indígenas (diques y embalses) para proteger a la ciudad. Pero tal solución no fue suficiente para una ciudad que no fue concebida para existir en medio del agua. Se llegó a la conclusión que una solución más radical era necesaria, considerando los imperativos políticos y económicos del momento, esa solución era el drenaje de los lagos.

La primera gran inundación de la época colonial tomó por sorpresa a toda la comunidad de españoles. En 1555, las fuertes lluvias de verano provocaron una subida brutal del nivel del agua. Las antiguas defensas, abandonadas por los españoles, no cumplieron su cometido y el agua empezó a derramarse por las brechas y las compuertas de las esclusas. Se decidió entonces por un programa de trabajos destinados a combatir la inundación. Se trataba de la obstrucción en parte de las acequias de la ciudad, reparar las calzadas de acceso, cerrar algunas esclusas y abrir otras, embalsar o desviar los ríos más peligrosos (en especial los que corrían entre Coyoacán y Tacubaya).

Aunque para 1556 los españoles habían casi olvidado el amplio pero costoso programa de protección. Esto, hasta la gran crisis de 1607, que hizo que los españoles decidieran iniciar las obras de desagüe. En 1604 las lluvias del mes de agosto fueron tan fuertes que el lago de Texcoco se salió de sus límites, y las calles de la ciudad de México quedaron anegadas. En algunos barrios de la ciudad de México sólo podía circularse en barca. Las lluvias moderadas de 1606 permitieron que las aguas volvieran a su nivel y los ríos retomaran sus cauces. Pero el año siguiente, una inundación tan grave como la de 1555

⁶⁴ *Ibíd.*, pág. 137.

afectó a todos, iglesias, conventos, edificios públicos, palacios y casas particulares se vieron invadidos por las aguas, que se llevaron numerosos puentes y derrumbaron las construcciones más frágiles.

Sin embargo, la inundación más grave de la época colonial fue la de 1629. Ni siquiera las obras de desagüe, emprendidas bajo la dirección del ingeniero Enrico Martínez, impidieron que la ciudad estuviese cinco años bajo el agua. En la ciudad inundada la vida comenzó a organizarse. La experiencia de las catástrofes anteriores hizo la situación más soportable para los vecinos. La industria de las canoas conoció un repunte imprevisto. Pero gran parte de la ciudad había desaparecido. El padre Cobo señalaba que todos los barrios periféricos cuyas casas eran de adobe o de carrizo habían desaparecido (dos terceras partes de la superficie construida). Los pobres y los indígenas fueron los que más sufrieron. En una carta fechada el 11 de septiembre de 1629, el arzobispo de México calculaba en más de 30 000 el número de los indígenas muertos; y que de 20 000 familias de españoles, no quedaban más que 400 en la ciudad inundada. Las demás habían huido hacia otras ciudades, en especial Puebla.

Los más ricos encerraban los cadáveres de sus familiares en sarcófagos herméticos que se llenaban de cal y se depositaban en las capillas, pues era imposible hacer un entierro, mientras que los pobres y los indios se pudrían en el fondo del agua, con los caballos y los perros.

El balance: millares de muertos, dos terceras partes de la ciudad arrasadas, los edificios más macizos socavados por las filtraciones y con la actividad económica paralizada. Los recursos de la ciudad y de la Corona se habían agotado y había que reconstruir y a la vez reservar fondos para financiar los trabajos de desagüe, que ahora más que nunca eran indispensables para la supervivencia de la ciudad⁶⁵.

Desde la primera inundación, las autoridades coloniales pensaron cambiar el emplazamiento de la capital de la Nueva España. En diversas ocasiones la Corona intentó imponer tal punto de vista, que fue rechazado por los habitantes de la Ciudad de México: en 1555 los montos invertidos en los palacios, distintos monumentos, las iglesias y los conventos hacían ya imposible tomar tal decisión.

Para justificar la desecación de las lagunas, algunos incluso decían que la Ciudad de México estaba construida sobre una isla artificial, como Coatepec de los mitos aztecas. Según ellos, los diques no servían para proteger la ciudad de las inundaciones, sino para garantizar un nivel suficiente para mantener a Tenochtitlán rodeada de agua. Al drenar los lagos, se devolvería a la ciudad su paisaje original, transformado o deformado por los mexicas. A raíz del “gran miedo” de 1542, provocado por las revueltas indígenas de la Nueva Galicia, se exacerbaron los conflictos por el agua entre los españoles y los indios. Se temió que las poblaciones indígenas anegaran la ciudad manipulando las compuertas que controlaban el nivel de las aguas. Para “responder” a tal amenaza, real o imaginaria, se tomaron las medidas para unir lo más sólidamente posible la ciudad con tierra firme.

Tras la inundación de 1629, la Corona propuso de nuevo transferir la capital del reino a un sitio menos expuesto a las crecidas de las lagunas, pero los regidores y religiosos se negaron a abandonar sus casas y conventos. Según sus habitantes, más valía invertir cuatro millones de pesos (evaluación del costo del desagüe) que perder los 50 millones que representaban los edificios de la ciudad. Ante tan terca resistencia, incluso el rey debió inclinarse. Sin embargo, se buscó la solución menos onerosa. Se propusieron decenas de proyectos, pero entre los más originales estaba el de un padre jesuita, Francisco Calderón, que intentaba probar que existía una salida natural del agua de los lagos: el antiguo remolino de Pantitlán, venerado por los aztecas antes de la evangelización.

⁶⁵ *Ibíd.*, pág. 186-189

En 1609 ante una nueva inundación, se organizó un concurso para determinar cuál era el mejor sitio para el desagüe. Entre todos los candidatos se eligió a Enrico Martínez, que aconsejaba hacer un túnel entre Huehuetoca y Nochistongo. Pero tal elección no fue definitiva. Tras la inundación de 1629 se presentaron aún más proyectos que proponían pasar por el norte. En 1856 se convocó a un concurso nacional que tenía como fin reorganizar el conjunto de los sistemas hidráulicos de la cuenca. Fue el ingeniero Francisco de Garay quien lo ganó. El proponía abandonar definitivamente Huehuetoca por Tequixquiac y abrir canales secundarios que permitieran la irrigación de las tierras liberadas por los pantanos, al tiempo que facilitarían la comunicación entre el norte y el sur de la cuenca. La guerra y la intervención francesa impidieron llevar a la práctica el proyecto, pero las obras emprendidas luego bajo el régimen de Porfirio Díaz seguían las grandes líneas de su programa.

Para esta onerosa solución, se tuvo que recurrir, para vaciar las lagunas, al trabajo de los indios y la tecnología de los españoles. Durante más de tres siglos, parte de la Nueva España tuvo los ojos puestos en el poblado de Huehuetoca, que se convirtió, hasta mediados del siglo XIX, en capital del desagüe. Con la independencia, las prioridades no cambiaron y para don Porfirio fue una cuestión de honra la conclusión de una obra que ningún virrey había podido terminar. Pero el fin de los lagos no era más que el comienzo de un nuevo ciclo de enfrentamientos entre el hombre y su medio: las consecuencias desastrosas del desagüe sobre la ecología de la cuenca hacen cada vez más difícil la vida en la Ciudad de México.

Es importante señalar, que la elección del desagüe se hizo en detrimento de los campos indígenas y en beneficio de la ciudad española. Cuando las autoridades decidieron excavar el túnel de Huehuetoca, en 1607, se pensaba ante todo en la seguridad de la ciudad, amenazada con desaparecer, y muy poco en las consecuencias que la desaparición de las lagunas tendría en la vida de los indios. En efecto, las poblaciones rurales e indígenas siempre fueron sacrificadas en aras del interés de la ciudad española. En 1604, cuando se decidió impedir que las aguas de Texcoco entraran al lago de México, se cerraron los diques que los separaban. Pero los caudales provenientes de Xochimilco amenazaron entonces con anegar la ciudad. Dado que ya no podían derramarse hacia el oriente, el virrey mandó pues, cerrar el dique de Mexicaltzingo. Esta decisión provocó la ruina de las chinampas de toda la región porque el nivel de las aguas subió y se inundaron todas las parcelas. Los habitantes se vieron reducidos a la hambruna y algunos de ellos tuvieron que abandonar sus tierras para buscar que comer en otros lados⁶⁶.

La lucha por el agua

Las luchas por el agua en la colonia no sólo reflejan el enfrentamiento entre dos culturas y civilizaciones que intentaban organizar el espacio a su propia forma, la disputa por el control del agua era una cuestión tanto cultural como técnica.

Pero las problemáticas por el agua han existido siempre. La cuenca del valle de México era explotada, incluso antes de la llegada de los aztecas, mediante sistemas hidráulicos que permitían irrigar las zonas menos húmedas. Con la conquista, parte de dichos sistemas fue destruida o abandonada, para luego imponer sus propias técnicas de riego de parte de los conquistadores. Las grandes haciendas perturbaban el equilibrio que ya era difícil de mantener. Éstas como grandes consumidoras de agua, obtenían con gran facilidad mercedes⁶⁷ que pasaban por encima de los derechos de los poblados. Y aunque no tenían títulos oficiales sobre el uso del agua, los dueños de las haciendas no dudaban en desviar los ríos o construir embalses, privando del agua a las tierras aguas abajo.

⁶⁶ *Ibíd.*, pág. 190-197

⁶⁷ Reparto de agua que se hacía en algunos pueblos para el uso de cada vecino.

En el campo, los españoles quisieron apoderarse del agua que necesitaban para regar sus tierras y abreviar a su ganado. Las quejas de los indígenas eran cada vez mayores y las autoridades no dudaban en concederles la razón, aunque eso no impedía que los conquistadores siguieran abusando. En 1591, el segundo virrey De Velasco pidió al alcalde mayor de Tacuba velar porque no se robarán el agua de los naturales de Totoltepec, que dependían de su jurisdicción. Según los habitantes del poblado, unos españoles desviaban el agua que ellos utilizaban para regar sus campos de trigo. El mismo año, el virrey tuvo que intervenir en otro caso parecido, los habitantes del poblado de San Lorenzo Tecomán, se quejaban de que los españoles no les permitían el acceso a un arroyo que, desde tiempos inmemoriales, servía para regar sus tierras. Convencido del derecho de los indígenas, don Luis de Velasco ordenó al alcalde mayor prohibir a dichos españoles robar el agua del pueblo.

Pero los conflictos no sólo enfrentaban a españoles e indígenas. En muchos casos ambas comunidades debían unirse para hacer frente a los abusos de un propietario que se aprovechaba de su riqueza y sus relaciones para privar a poblados enteros de sus recursos de agua. Un ejemplo de esto, se presentó a principios del siglo XVII, entre los indígenas de Tlalnepantla y de Tenayuca, que se aliaron a numerosos agricultores españoles en contra del doctor don Marcos Guerrero, consejero de la Audiencia. Eran, en total, 1 900 indígenas y 100 españoles afectados. El doctor había fundado una hacienda en las estribaciones del cerro de “Nuestra Señora de los Remedios”, y que para regar sus tierras construyó un embalse en el mismo manantial del río que alimentaba los poblados de abajo, y luego desvió su curso para hacerlo pasar por su propiedad. Los indígenas acudieron a las autoridades, después de haber sido rechazados a mano armada al intentar oponerse al proyecto. Se les concedió la razón y las construcciones fueron desmanteladas y el río pudo retomar su curso. Pero el propietario no se dio por vencido, apeló una vez, quejándose de no disponer de volúmenes de agua para la explotación de sus tierras. Pero murió en el curso del proceso, y la hacienda pasó a manos de Gonzalo de Córdoba, regidor de México. Éste recibió del virrey el permiso de captar el agua necesaria para regar sus campos e hizo reconstruir el embalse. Pero el resultado fue realmente desastroso, en tiempo de secas los agricultores aguas abajo carecían del agua, y en temporada de lluvias dejaba que el río retomara su curso, inundando dos pueblos. Al final este conflicto se resolvió cuando los pobladores de Tlalmanalco y Tenayuca, y los dueños o arrendatarios de haciendas de menor importancia compraron, a título colectivo la hacienda en cuestión.

Pero los problemas en la periferia de la Ciudad de México no eran menos encarnizados. Todo un volumen de la sección “Agua litigios” de los archivos históricos de la Ciudad de México está dedicado únicamente a un caso, que empieza en 1609 y continua hasta principios del siglo XIX, se trata de un juicio que enfrenta a los dominicos de San Jacinto con varios propietarios de huertas cuyas parcelas eran regadas con el agua del río Tacuba. Esta serie de manuscritos refleja la historia de la crisis del agua en la zona periurbana a lo largo de más de tres siglos.

Por otra parte, hasta fines del siglo XIX, la ciudad tuvo que enfrentar un dilema muy difícil de resolver: dejar que los molinos trabajaran y renunciar a parte del agua que necesitaba, o bien medirles el agua y correr el riesgo de carecer de pan y de harina. Y este problema se resolvió según el momento de distintas formas. En 1575, se indemnizó a tres molineras cuya agua había sido tomada para llevarla a la ciudad (Acta del 13 de mayo de 1575). En 1792, se pidió a los dueños modificar sus instalaciones para evitar privar a la ciudad de su agua⁶⁸.

⁶⁸ Musset, A. (1992). El agua en el valle de México, siglos XVI-XVIII. CEMCA; Pórtico de la Ciudad de México. Pág. 183-185.

Agua potable y aguas residuales

Suministro del agua potable

A causa de la dosis de sal en una gran parte de los lagos, y a pesar de numerosas fuentes, el agua potable escaseaba a veces en las principales ciudades de la cuenca. Desde la época prehispánica, el suministro de las zonas urbanas ha justificado la construcción de acueductos que permitieran conducir el agua hasta los centros de consumo, a veces de fuentes muy alejadas. El tiempo y las acciones del hombre han hecho desaparecer en la mayoría de los casos, los restos de dichas construcciones, con lo cual, sólo los textos y las crónicas informan de la existencia de los acueductos prehispánicos. Tras la conquista, los acueductos se multiplicaron, como habían proliferado también en los países conquistados por la Roma republicana e imperial. Las nuevas actividades traídas por los españoles, como el uso de ruedas con álabes o la introducción del ganado a los campos, aumentaron las necesidades de agua. Por otro lado, las congregaciones en los nuevos pueblos, venidos de poblaciones dispersadas con el fin de controlar las masas, facilitar el cobro de tributo, y permitir la evangelización de las tierras conquistadas, hicieron que la situación de la falta de agua se agudizara. En el siglo XVI se construyeron casi tantos acueductos y fuentes como iglesias. Las fuentes conservaron su importancia hasta fines del siglo XIX, cuando se popularizaron las tomas de agua a domicilio.

Los acueductos coloniales contribuyeron a la transformación del espacio mexicano. Facilitaron la política de congregación de las comunidades indígenas y fomentaron la instalación de pueblos, ranchos, y haciendas que parecen seguir una línea invisible entre el manantial y el punto de llegada de la cañería.

Los acueductos prehispánicos

Según el Códice Ramírez, un primer acueducto fue construido bajo el reinado de Chimalpopoca, nieto de Tezozomoc, rey de Azcapotzalco. Éste había dado autorización a los habitantes de Tenochtitlán de captar los manantiales de Chapultepec, pues no eran utilizados por los tepanecas. La cañería era de tierra cocida y descansaba en una calzada formada de tierra y traída de fuera, pilotajes y gavillas de hierba. Aunque los mexicas se enfrentaron a problemas técnicos como el suelo demasiado blando. El cual no aguantaba el peso del acueducto y éste se rompía dejando escapar agua. Para remediar esos problemas, solicitaron a Tezozomoc, rey de Azcapotzalco, la autorización para emplear otros materiales: piedras, madera, cemento. Los nobles tepanecas se negaron entonces a ayudar a sus vasallos, cuyo creciente poder dependía de la construcción de esa obra. Este conflicto terminó en guerra, provocando la caída de Azcapotzalco y el comienzo de la expansión azteca. No se trataba de una cuestión territorial o una querrela religiosa, si México predominó sobre el conjunto del valle, fue gracias a una guerra cuyo punto de partida gira en torno al control del agua.

El segundo acueducto prehispánico de México tuvo una vida más efímera que el anterior. El crecimiento poblacional justificaba la presencia de un segundo acueducto que alimentara a los barrios meridionales de México. El caudal de Chapultepec solo no bastaba para surtir una ciudad tan importante, poblada por casi 100 000 habitantes. El soberano de Coyoacán, según la *“Crónica mexicana”* de Tezozomoc, declaró que los habitantes de México ya podrían contentarse con las fuentes de Chapultepec sin privar a sus vecinos de sus propios recursos acuíferos. Irritado por la respuesta del cacique local, Ahuitzotl ordenó a sus guerreros que lo mataran, dejando libres a los mexicas para hacer el acueducto. Las obras movilizaron a mucha fuerza de trabajo, venida de todas las ciudades aliadas y tributarias.

Los acueductos de la ciudad de México, 1521-1900

Durante casi tres siglos, mientras pasaba de unos cuantos millares a más de 200 000 habitantes, la ciudad de México debió contentarse con las aguas de Chapultepec y las de Santa Fe (aumentando el caudal con los manantiales de Cuajimalpa y del Desierto de los Leones).

Con el nombre de caño viejo se designó hasta fines del siglo XVII, el antiguo acueducto de Chapultepec que seguía el trazo del caño prehispánico. Se trataba más bien de un canal que de una tubería, pues descansaba directamente sobre el suelo, todo el mundo podía pasar por encima, y los animales acudían a abrevarse. Fue construido por los mismos indígenas a los que Cortés había eximido de tributo hasta terminar de reparar sus casas, las calzadas de acceso, y los caños que llevaban agua a la ciudad de México desde los manantiales de Chapultepec. Las obras comenzaron en otoño de 1527 y su objetivo consistía en llevar las aguas de Chapultepec hasta la Plaza Mayor, donde se debía construir una fuente y una pila.

Desde 1536 se comenzó a hablar de la posibilidad de llevar a la ciudad las aguas de Cuajimalpa y de Santa Fe, situadas más arriba de Chapultepec. No obstante, fue hasta 1562 que Fernando de Portugal y Luis de Castilla, ambos concejales de la ciudad, fueron designados para discutir con el virrey la posibilidad de construir un acueducto que duplicaría el aforo del de Chapultepec. Además, de que el agua de Santa Fe era considerada excelente por numerosos eruditos. Las obras no pudieron iniciarse sino hasta 1564, gracias al dinero que aportaba a la ciudad el impuesto sobre la carne de carnicería. En 1572 las obras quedaron concluidas, pero en 1591, los arcos ya construidos amenazaban con venirse debajo de un momento a otro. En el mes de diciembre, se tomó la decisión de reforzarlos o reconstruirlos, pero las cosas se prolongaron hasta 1596, fecha en la que Gerónimo López ordenó que se prosiguiese con el programa iniciado treinta y dos años antes. Si bien la puesta en marcha de los trabajos se decidió con rapidez, no fue hasta 1620 que fueron terminados. El acueducto costó 150 000 pesos, se componía de 1 000 arcos, y conservó su aspecto hasta fines del siglo XIX a pesar de las apuntaciones que sufrió a partir de 1836 cuando se comenzó a suprimir una parte de las arcadas.

Pero esta disposición de los acueductos desfavorecía a los barrios meridionales de la ciudad, que permanecían alejados de los principales caños. Por esta razón, a mediados del siglo XVIII, se decidió mejorar esa zona. A fines del siglo XVII, Gemelli Careri hacía notar que una canalización llevaba agua hasta el convento de los padres de La Merced en Belem, y que los habitantes del barrio la utilizaban. Este caño, o una de sus ramas, sufrió modificaciones en 1715⁶⁹.

El agua potable en el siglo XX

A finales del siglo XIX los manantiales que abastecían de agua a la ciudad eran los del Desierto de los Leones, Sierra de las Cruces, río Hondo, Santa Fe y Chapultepec. La cantidad que se obtenía de ellos era de 600 a 800 litros por segundo, aunque se afirmaba que su calidad no era muy recomendable. Además de los manantiales, se pensó también en los pozos brotantes para cubrir las necesidades domésticas de la población y la agricultura⁷⁰.

Dado que el agua de estos manantiales y pozos resultaba insuficiente, en 1900, el regidor de aguas Gilberto Montiel Estrada contrató al ingeniero Manuel Marroquín y Rivera para elaborar un estudio sobre el aprovechamiento de las aguas de Xochimilco. Junto con este proyecto se presentó la primera iniciativa de llevar agua de los manantiales del Alto Lerma. William Mackenzie propuso ese proyecto en 1902, pero el ayuntamiento prefirió el proyecto de Marroquín, inaugurándose las obras de

⁶⁹ *Ibíd.*, pág. 71-78.

⁷⁰ Suárez Cortez, B. (1998). Historia de los usos del agua en México: oligarquías, empresas y ayuntamientos (1840-1940). CONAGUA; CIESAS; IMTA. Pág. 273

Xochimilco en 1912. Sin embargo, los manantiales de Xochimilco no resultaron suficientes para cubrir las necesidades de una población que crecía frenéticamente.

En 1926 se perforaron nuevos pozos para captar las aguas de los ríos Cuautitlán y Tula. En 1925 el presidente Plutarco Elías Calles acordó suspender el otorgamiento de concesiones de los manantiales que daban origen al río Lerma. Este acuerdo obedecía al interés que existía por utilizar estas aguas para el abasto de la Ciudad de México.

El ejecutivo federal, en efecto, no quería ceder el abasto de agua de la ciudad de México a pesar de las solicitudes de concesiones de particulares para abastecer a la ciudad, como la de 1920 por parte de Benjamín Hill y Miguel Gómez y de 1923 de Andrew Macken.

En 1930 por conducto de la Dirección de Aguas, Tierras y Colonización, la SAyF, se concedió permiso a los ingenieros Juan D. Villarello y Rafael Orozco para que estudiaran la posibilidad de utilizar los manantiales de Almoloya del Río para el abasto de la ciudad. Con ello pretendían vender el agua para los usos domésticos, así como vender la energía eléctrica al gobierno federal y a algunos particulares. En 1931 se publicó en el *Diario Oficial* la solicitud de Villarello y Orozco para aprovechar las aguas de Almoloya del Río.

Durante el periodo de 1925-1942 el interés del gobierno federal hacia las lagunas de Lerma era el de mantener bajo su control estos recursos hidráulicos para resolver en algún momento el problema de abasto de la Ciudad de México. Esas obras iniciaron en 1942 y concluyeron diez años después, dejando una secuela doble: mayor cantidad de agua para la capital del país, pero también la desecación de las lagunas.

Para (supuestamente) compensar los daños que dejarían las obras de captación de aguas de estos manantiales, se llevaron a cabo algunas mejoras: se construyeron obras de abastecimiento de agua potable, casas habitación, escuelas, lavaderos, baños y abrevaderos. No obstante, los conflictos que dejó esta obra, subsisten en la actualidad.

Sin embargo, el agua que se extrajo de los manantiales no fue suficiente. Para 1966 la población ya había aumentado y por tanto requería mayores volúmenes de agua. Por este motivo se comenzaron a explotar los acuíferos subterráneos, lo que sería motivo de un descontento en la zona (de entre muchos): “La transferencia afectó las pequeñas norias para usos domésticos en los hogares campesinos, los manantiales destinados al regadío de sus parcelas, y el desarrollo potencial de la zona”. Finalmente, el abasto de agua a la Ciudad de México implicó enormes desventajas en la población rural de la zona del Alto Lerma. La razón era que afectaba la economía agrícola⁷¹.

La contaminación y el desalojo de las aguas residuales

Durante toda la época colonial, el municipio y los virreyes acumularon edictos y decretos para proteger las aguas de la contaminación industrial y doméstica. En 1618, el doctor Cisneros se afligía de ver el agua de Santa Fe perder todas sus cualidades al llegar a la Ciudad de México.

Los responsables de esta degradación de la calidad del agua son distintos y numerosos. La agricultura es el primero de ellos.

En el acueducto de Santa Fe, arriba de Chapultepec, se veía afectado porque el lodo se acumulaba en el canal y el agua llegaba turbia a la ciudad. El consejo municipal tuvo que confiscar los terrenos de Juan Ortiz, Gaspar Marino y Manuel Villegas por esta razón.

⁷¹ *Ibíd.*, pág. 274-279.

Los molinos también participaron en este proceso de contaminación del agua potable, situados en los altos de Tacubaya, ya que utilizaban el agua de Santa Fe para hacer girar las muelas y para lavar el grano. El agua eliminada después de esas operaciones de limpieza estaba cargada de tierra, paja y partículas diversas. Y a pesar de las condiciones en las que se encontraba el agua después de ese proceso, los propietarios de molinos no dudaban en devolverla al circuito de los acueductos. Diego de Cisneros consideraba esta fuente de contaminación como la más grave, y la causa de las enfermedades transmitidas por el agua. Un siglo más tarde, en 1898, la ciudad debía enfrentar las mismas causas de contaminación: el propietario del Molino de Valdez había instalado a lo largo del caño, toneles llenos de panes que se mantenían húmedos. El agua nauseabunda y fermentada se filtraba entre los tablones, formaba charcos al pie del acueducto y terminaba por mezclarse con las aguas potables que tomaban el camino de la Ciudad de México. El inspector enviado por el municipio propuso una multa de 500 pesos, pero para evitar pagarla, el propietario se comprometió a cubrir la canalización a todo lo largo del molino, lo cual costó 399.50 pesos, con lo cual pudo ahorrarse 100.50 pesos. Las carnicerías y tenerías constituían otro factor de contaminación, sobre todo del agua de los lagos⁷².

Por otra parte, los pobladores de la ciudad también tenían acciones reprochables; abandonaban su basura en las calles, las plazas, las acequias y las fuentes, o arrojaban sus aguas sucias por las ventanas. Esta costumbre perduró mucho tiempo. Aun hoy en día, el grito “¡Aguas!” se emplea como señal de advertencia de un peligro inminente.

Los caños al aire libre de los acueductos eran ensuciados continuamente por gente que acudía a ellos a lavar ropa, a abreviar a sus animales y arrojaba basura. En 1528 (Acta del 3 de julio de 1528), se prohibió a los habitantes bañar a sus animales en el caño que servía para llenar de agua las canoas. A los españoles se les imponía una multa de 15 pesos de oro; y a los negros, los indios y los mestizos se les castigaba con 100 azotes.

En su diario, Sedano hace de la pila de la Plaza Mayor una descripción sorprendente, que explica porque, en 1791, las autoridades decidieron tomar medidas severas:

Esta pila fue una muy grande inmundicia, el agua esta hedionda y puerca, a causa de que metían dentro para sacar agua las ollas puercas de la comida de los puestos y también las asaduras para lavarlas. Las indias y gente soez metían dentro los pañales de los niños estando sucios para lavarlos fuera con el agua que sacaban, por lo que sobre el agua había dentro de la pila grandes costras nadantes sobre zalea. El enlosado de afuera estaba lamoso y resbaloso, a causa de la jabonadura que despedía la ropa que lavaban al derredor, por lo que era peligroso andar alrededor la gente calzada y unos caían. Para sacar el agua que estaba honda, las mujeres de ropa corta se balanceaban en el brocal de la pila, alzando por acción natural una pierna, con lo que vienen en conocimiento, que descubrían.

A principios del siglo XVI, se tuvo que cambiar de lugar el hospital de leprosos, situado en las cercanías del acueducto de Chapultepec, porque los enfermos lo usaban.

En enero de 1865, una carta anónima hacía saber a la prefectura política del Departamento del Valle de México que ciertas personas de Tacubaya lavaban su ropa en el acueducto de Santa Fe, a la altura del molino de Santo Domingo. Después de esta denuncia se comenzó una investigación: el inspector se dio cuenta de que se hallaba ante un caso difícil, puesto que los contaminadores eran soldados franceses de las fuerzas de ocupación. A pesar de los exhortos del funcionario, éstos se negaron a

⁷² Musset, A. (1992). El agua en el valle de México, siglos XVI-XVIII. CEMCA; Pórtico de la Ciudad de México. Pág. 97.

cambiar sus hábitos. Para el 16 de febrero de ese año, se había construido para los soldados un lavadero de casi dos metros de largo, alimentado por el acueducto, pero aislado del caño.

Hasta fines del siglo XVIII, la ciudad no resintió la necesidad de instalar una red de canalizaciones para llevar las aguas negras fuera de las zonas habitadas. Cada quien arrojaba lo que le estorbaba en su casa y las aguas negras se vertían directamente al lago. El sistema de desagüe del agua de lluvia se metía en los caños al aire libre o subterráneos, que evacuaban el agua sobrante de las fuentes públicas y privadas, cuando no se tiraba al suelo. A partir del siglo XVI, sin embargo, los propietarios de casas que tenían una merced de agua, tuvieron que instalar tuberías de desagüe que los conectara con la acequia más cercana (Acta del 4 junio de 1535). A fines del siglo XVIII se pensó en establecer una verdadera red secundaria de desagüe de las aguas negras, aun cuando las acequias conservaban su función de colectores.

Los problemas técnicos que se oponían a la realización de una red completa de colectores de aguas negras retrasaron el avance de las obras. Era preciso garantizar una pendiente suficiente a las cañerías para que continuasen vertiendo las aguas en el lago. Por esta razón era tan incómodo hacer ramales perpendiculares, orientados de norte a sur: la escasa fuerza de la corriente no permitía la salida de las aguas. En temporada de lluvias, el nivel subía, devolviendo las aguas negras a la ciudad. Por si esto fuera poco, el hundimiento general de la ciudad volvía difícil el mantenimiento de las cañerías, cuyo nivel presentaba una tendencia a elevarse. Los ingenieros concibieron el sistema de drenaje profundo de la cuenca, a fines de la década de 1960, tuvieron que enfrentar el mismo problema.

El medio siglo agitado que siguió a la independencia del país no permitió a la ciudad desarrollar el programa de construcción emprendido por los últimos virreyes. Bajo don Porfirio, en cambio, la introducción de nuevas técnicas permitió elaborar un sistema de drenaje digno de las más grandes ciudades europeas de la época. En la ideología “civilizadora” que presidía la reorganización de las estructuras urbanas, la lucha por el drenaje reemplazó la de la construcción de caños de agua potable. En el siglo XIX, se volteó la atención más al desalojo de las aguas que a su aprovisionamiento. Los higienistas pedían la expulsión de los focos de infección fuera de la ciudad. De este modo, el gran canal de desagüe, previsto para regular las aguas de la cuenca, se encontró convertido en una gigantesca alcantarilla al aire libre, que arrastraba las aguas negras y pestilentes en medio de zonas urbanizadas. El canal de desagüe, en el que se vertían las alcantarillas para llevarse todo hasta la costa del Golfo, tenía una capacidad de 5 m³/s. Sin embargo, en caso de lluvias violentas, las cañerías debían tener una capacidad tres o cuatro veces superior. La expulsión de las aguas negras debía hacerse gracias a bombas capaces de inyectar en las cañerías, para lavarlas, una cantidad de agua equivalente a mil litros por segundo. La construcción de la máquina de vapor capaz de dar una presión tal, se confió a la compañía norteamericana *Holly Manufacturing Company*, y la de la red de tuberías a Eugene Tellier y Charles Vezin.

Con la elaboración de un sistema moderno de desagüe, que correspondía a la desaparición de las antiguas acequias de la ciudad, Porfirio Díaz quería completar las obras de desecación de la cuenca de México. Pero era imposible separar los dos aspectos de un mismo problema, que no se resolvió con la perforación del túnel de Tequixquiac. Al igual que con el aprovisionamiento del agua, el desalojo de ésta se hizo en detrimento de las ciudades y del campo vecino, aun cuando los campesinos comenzaron a utilizar las aguas negras de la capital para regar los campos. Con el fin de dominar el ciclo completo del agua, la ciudad de México tuvo que dotarse de numerosas herramientas humanas,

materiales, y financieras que le permitieran ejercer su influencia en una región cada vez más extendida⁷³.

2.1.13 El tratamiento del agua residual en México

El tratamiento de las aguas residuales en México comenzó en la localidad de San Nicolás de los Garza, perteneciente al municipio del mismo nombre del estado de Nuevo León. En 1905 se construyó la primera planta de tratamiento de aguas residuales municipales mediante un Tanque Imhoff, con una capacidad de 10 l/s; el efluente fue utilizado para riego agrícola en el Ejido San Nicolás de los Garza.

En la década de los 40 se presentaron los primeros problemas internacionales de contaminación de aguas entre México y los Estados Unidos de Norte América, lo que originó en 1944 la firma del Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales de los Ríos Colorado, Tijuana y Bravo para evitar las descargas transfronterizas.

En la Ciudad de México se inició formalmente el tratamiento de aguas residuales con la entrada en operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Chapultepec en 1954, con la aplicación de un proceso biológico novedoso en ese momento, consistente en un proceso de lodos activados, con desinfección y tratamiento del lodo mediante digestión anaerobia. El agua tratada, desde ese entonces ha sido reusada en el riego de áreas verdes y llenado de lagos, liberando el agua potable que se utilizaba para tal fin.

El crecimiento de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales fue paulatino, hasta finalizar la década de 1980, cuando se tenían registradas 256 plantas de tratamiento de agua residual. Es a partir de la creación de la Comisión Nacional del Agua, por decreto presidencial del 16 de enero de 1989, cuando inicia realmente la construcción sostenida de la infraestructura de saneamiento, llegando en 1992 a 546 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales registradas⁷⁴.

2.1.14 El uso de los humedales como sistema de tratamiento

El aprovechamiento de los humedales como sistema de tratamiento no es una práctica nueva ya que este tipo de ecosistemas han sido usados como sitios de descarga, probablemente desde que el agua ha sido colectada (por lo menos 100 años en algunas comunidades). Con descargas documentadas que datan de 1912, en los humedales de Great Meadows cerca del río Concord en Lexington, Massachusetts; sin embargo, los humedales construidos por el hombre, humedales artificiales, son más recientes⁷⁵.

El desarrollo de esta tecnología comenzó en 1952 con la primera planta de tratamiento que usaba humedales construidos por el hombre en el Instituto Max Planck en Alemania. Aunque algunos autores afirman que hay incluso reportes más antiguos del uso de los humedales artificiales que iniciaron en 1904, está mayormente aceptado que los estudios científicos y la evolución de estos sistemas inicia en los años de la década de 1950.

En Europa el primer sistema construido fue en Holanda en los años 60 y fue un humedal de flujo superficial, mientras que las primeras actividades de investigación en los Estados Unidos empezaron entre 1970 y 1980. No obstante, la implementación de los humedales se aceleró en el mundo entero desde 1985 de acuerdo con Robert Kadlec .

⁷³ *Ibíd.*, pág. 198-102.

⁷⁴ SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, edición 2016. CONAGUA. Pág. 73

⁷⁵ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 11.

En comparación a otros sistemas de tratamiento, esta tecnología es relativamente reciente, ya que tiene entre 30 y 40 años de desarrollo aproximadamente, mientras que otros sistemas más comúnmente utilizados pueden tener incluso más de 80 años de uso. Y aun así, de los 40 años durante los cuales ha sido utilizada, solamente entre los últimos 15 a 20 años ha habido realmente investigación a gran escala acerca de la operación y diseño para mejorar el conocimiento fundamental y el entendimiento básico de los procesos que se llevan a cabo dentro del sistema.

Las primeras instalaciones en Alemania y Dinamarca demostraron la eficiencia de los sistemas, pero pronto se encontrarían problemas gracias a la baja permeabilidad del suelo. Además de esos, problemas presentados por un diseño falso o pobre fueron observados en varias instalaciones durante los años 1970. Por lo cual la necesidad de investigación profunda para mejorar el desempeño de los sistemas se volvió imperante.

El resultado de dichas investigaciones puede verse reflejado en el número de artículos y reportes científicos publicados durante el periodo de 2000 a 2010, ya que hubo más del doble de publicaciones comparado al periodo de 1990 a 2000⁷⁶.

El desarrollo de los humedales como sistemas de tratamiento siguió dos caminos, los cuales de forma paralela se fueron desarrollando poco a poco. El primero, fue el uso y reconocimiento del potencial de los humedales naturales para mejorar la calidad del agua, y se desarrolló a través de los estudios de proyectos en los cuales, intencionalmente se descargaba el agua residual a humedales existentes. El segundo fue la implementación de los humedales construidos por el hombre, los cuales iniciaron algunos años más tarde, pero que, sin embargo, se desarrollaron más ampliamente a finales del siglo XX debido a la protección que se le comenzó a dar a los humedales naturales⁷⁷.

2.2 Situación actual del agua en México

2.2.1 Situación ambiental

Estado de los recursos hídricos

Cuencas y acuíferos en el país

En México hay 653 acuíferos bajo la administración de aguas subterráneas los cuales aportan el 38.9% del volumen para usos consuntivos, de esos, 105 se encuentran en sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre, y 18 con intrusión marina. Existen 731 cuencas bajo la administración de aguas superficiales, 8 de ellas son cuencas fronterizas. Son 51 los ríos principales, y éstos representan el 87% del escurrimiento total. Además, 65% del territorio nacional es ocupado por sus cuencas⁷⁸. Para la medición de distintos parámetros se cuentan con distintas estaciones climatológicas e hidrométricas como la muestra la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Número de estaciones climatológicas e hidrométricas. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 28

| Tipo de estación | Número de estaciones |
|------------------|----------------------|
| Climatológica | 3 160 |
| Hidrométrica | 861 |

⁷⁶ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 7 – 9.

⁷⁷ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 13-14.

⁷⁸ SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 27

En México, al año, se recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de precipitación. De los cuales, se estima que el 72.5% de ese volumen se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos y arroyos, y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, el país cuenta al año con 446 777 millones de metros cúbicos de agua dulce⁷⁹.

La figura 2-1 ilustra los valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México para el año 2015.

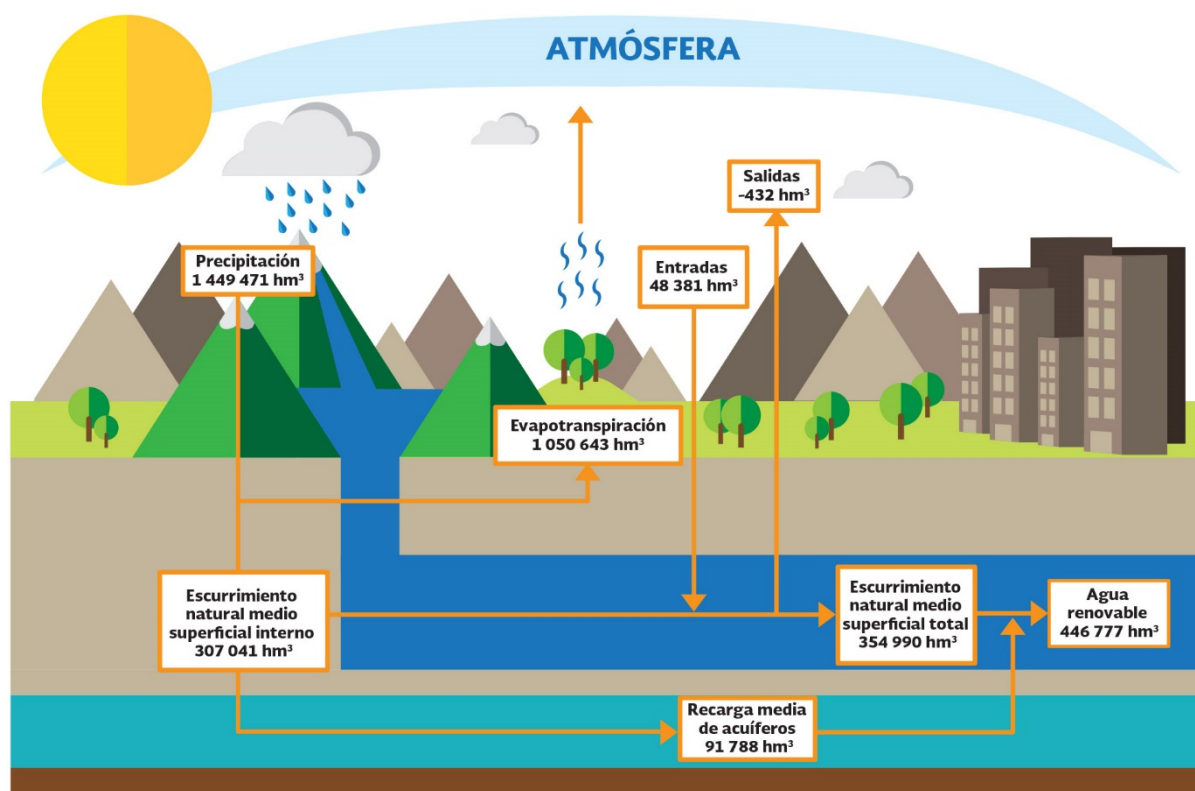


Figura 2-1. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2015. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 31

Calidad del agua

La calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con estándares preestablecidos. Estas normas se basan principalmente en los niveles de toxicidad científicamente aceptables tanto para los humanos como para los organismos acuáticos⁸⁰ y el deterioro de ésta, se debe a factores naturales o antropogénicos. De la figura y tabla 2-2 a la figura y tabla 2-5 se muestran los 3 principales parámetros (demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales) en el territorio nacional, los cuales se utilizan para determinar la calidad del agua superficial. Además, también se muestra para la calidad de aguas subterráneas: la cantidad de sólidos disueltos totales.

⁷⁹ *Ibid.*, pág. 31

⁸⁰ Calidad del Agua, ONU, <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>. Consultada el 29 de mayo de 2017

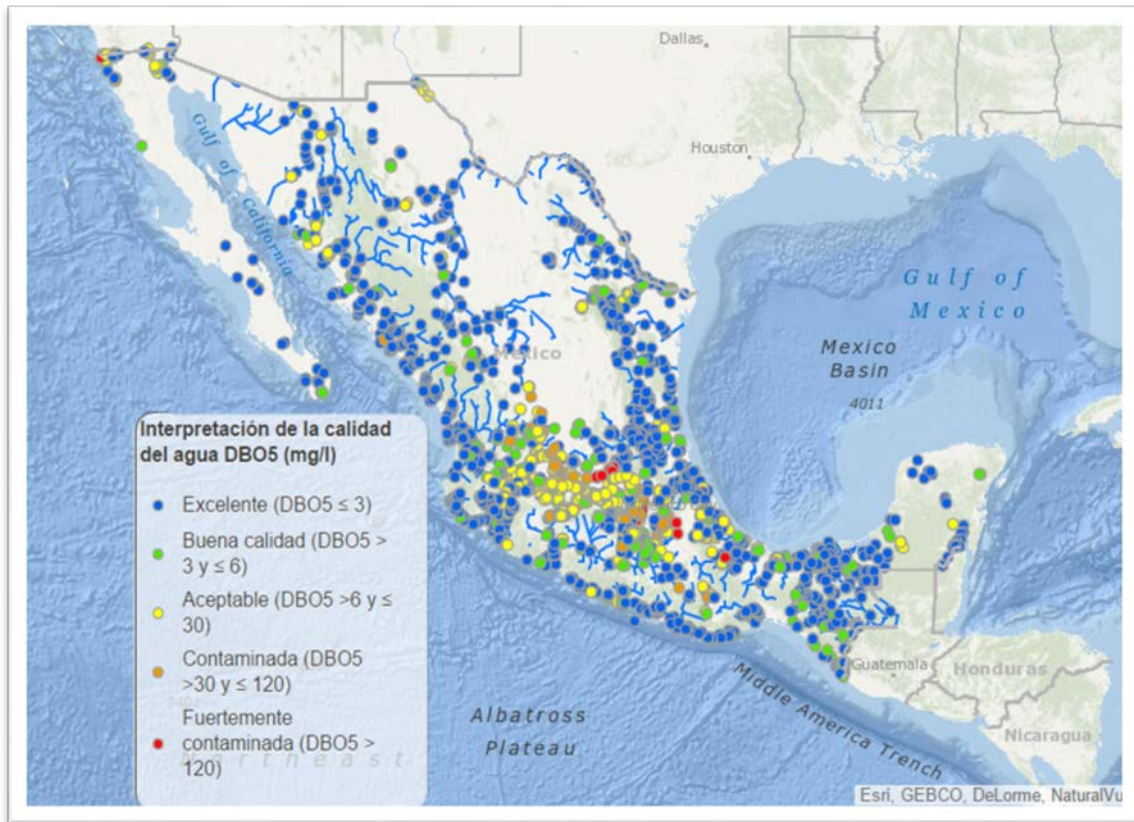


Figura 2-2. Calidad del Agua, DBO5. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

Tabla 2-2. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador DBO5 en 2015. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

| | Región hidrológico-administrativa | Excelente | Buena Calidad | Aceptable | Contaminada | Fuertemente Contaminada |
|-------------|-----------------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------------------|
| I | Península de Baja California | 48.8 | 9.5 | 31.0 | 9.5 | 1.2 |
| II | Noroeste | 73.8 | 13.1 | 11.9 | 0.0 | 1.2 |
| III | Pacífico Norte | 86.0 | 8.4 | 4.7 | 0.9 | 0.0 |
| IV | Balsas | 40.0 | 18.8 | 19.6 | 14.2 | 7.4 |
| V | Pacífico Sur | 76.8 | 13.4 | 6.3 | 3.5 | 0.0 |
| VI | Río Bravo | 68.0 | 15.1 | 15.5 | 1.4 | 0.0 |
| VII | Cuencas Centrales del Norte | 75.5 | 18.4 | 2.0 | 4.1 | 0.0 |
| VIII | Lerma Santiago Pacífico | 32.3 | 15.1 | 41.7 | 8.3 | 2.6 |
| IX | Golfo Norte | 73.0 | 9.9 | 12.7 | 1.2 | 3.2 |
| X | Golfo Centro | 54.9 | 17.2 | 19.8 | 5.0 | 3.1 |
| XI | Frontera Sur | 72.0 | 21.5 | 4.2 | 2.3 | 0.0 |
| XII | Península de Yucatán | 81.1 | 7.5 | 11.4 | 0.0 | 0.0 |
| XIII | Aguas del Valle de México | 13.3 | 17.3 | 36.0 | 24.0 | 9.4 |
| | Nacional | 55.9 | 15.0 | 20.6 | 6.0 | 2.5 |

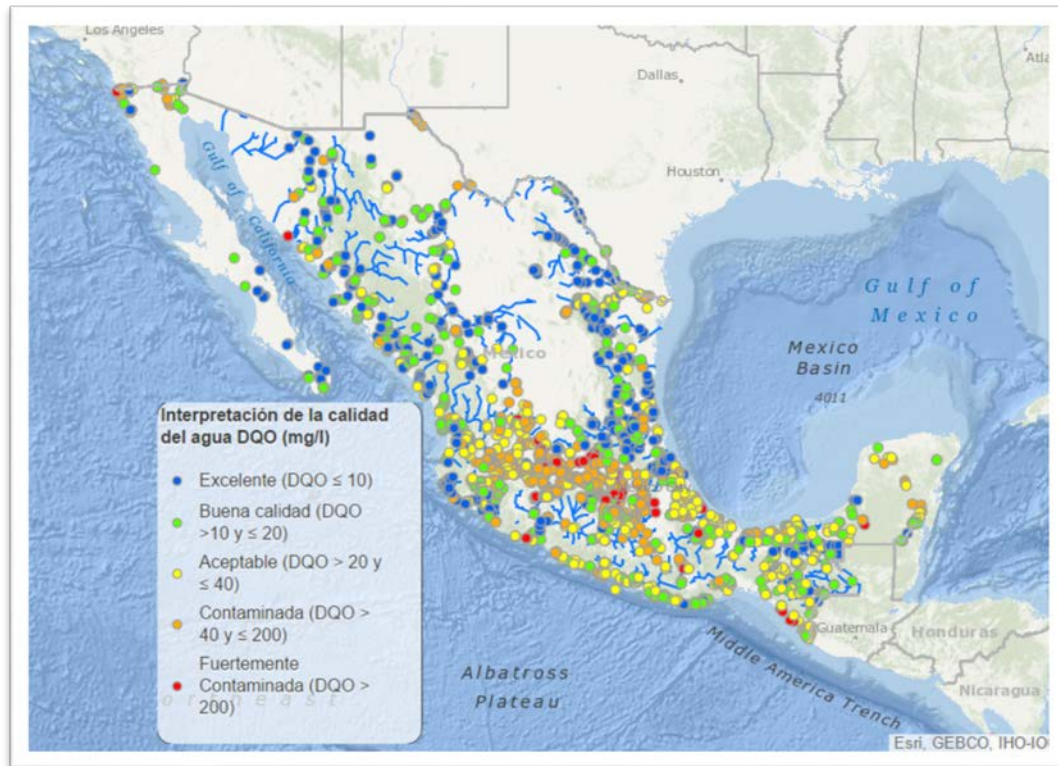


Figura 2-3. Calidad del Agua, DQO. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAqua. Consultada el 29 de mayo de 2017

Tabla 2-3. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador DQO en 2015. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAqua. Consultada el 29 de mayo de 2017

| | Región hidrológico-administrativa | Excelente | Buena Calidad | Aceptable | Contaminada | Fuertemente Contaminada |
|------|-----------------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------------------|
| I | Península de Baja California | 48.8 | 9.5 | 31.0 | 9.5 | 1.2 |
| II | Noroeste | 73.8 | 13.1 | 11.9 | 0.0 | 1.2 |
| III | Pacífico Norte | 86.0 | 8.4 | 4.7 | 0.9 | 0.0 |
| IV | Balsas | 40.0 | 18.8 | 19.6 | 14.2 | 7.4 |
| V | Pacífico Sur | 76.8 | 13.4 | 6.3 | 3.5 | 0.0 |
| VI | Río Bravo | 68.0 | 15.1 | 15.5 | 1.4 | 0.0 |
| VII | Cuencas Centrales del Norte | 75.5 | 18.4 | 2.0 | 4.1 | 0.0 |
| VIII | Lerma Santiago Pacífico | 32.3 | 15.1 | 41.7 | 8.3 | 2.6 |
| IX | Golfo Norte | 73.0 | 9.9 | 12.7 | 1.2 | 3.2 |
| X | Golfo Centro | 54.9 | 17.2 | 19.8 | 5.0 | 3.1 |
| XI | Frontera Sur | 72.0 | 21.5 | 4.2 | 2.3 | 0.0 |
| XII | Península de Yucatán | 81.1 | 7.5 | 11.4 | 0.0 | 0.0 |
| XIII | Aguas del Valle de México | 13.3 | 17.3 | 36.0 | 24.0 | 9.4 |
| | Nacional | 55.9 | 15.0 | 20.6 | 6.0 | 2.5 |

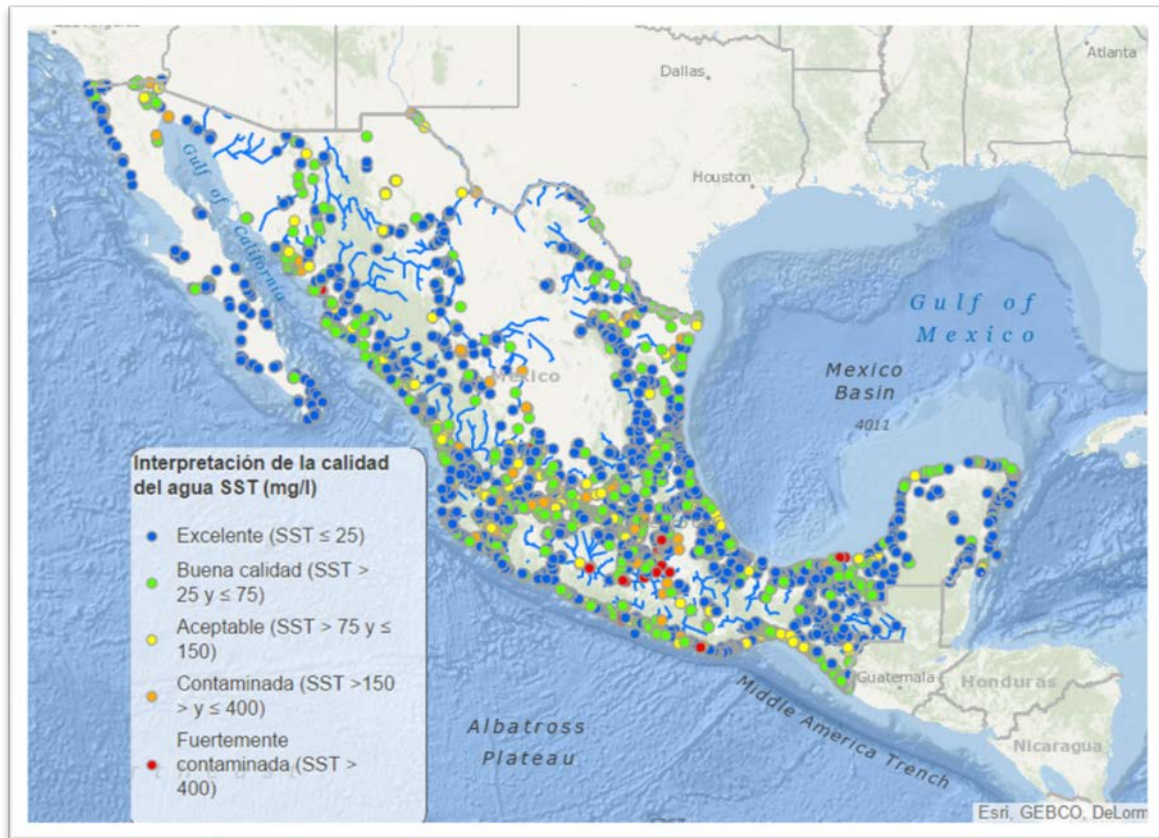


Figura 2-4. Calidad del Agua, SST. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

Tabla 2-4. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua de acuerdo al indicador SST en 2015. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

| | Región hidrológico-administrativa | Excelente | Buena Calidad | Aceptable | Contaminada | Fuertemente Contaminada |
|------|-----------------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------------------|
| I | Península de Baja California | 48.8 | 9.5 | 31.0 | 9.5 | 1.2 |
| II | Noroeste | 73.8 | 13.1 | 11.9 | 0.0 | 1.2 |
| III | Pacífico Norte | 86.0 | 8.4 | 4.7 | 0.9 | 0.0 |
| IV | Balsas | 40.0 | 18.8 | 19.6 | 14.2 | 7.4 |
| V | Pacífico Sur | 76.8 | 13.4 | 6.3 | 3.5 | 0.0 |
| VI | Río Bravo | 68.0 | 15.1 | 15.5 | 1.4 | 0.0 |
| VII | Cuencas Centrales del Norte | 75.5 | 18.4 | 2.0 | 4.1 | 0.0 |
| VIII | Lerma Santiago Pacífico | 32.3 | 15.1 | 41.7 | 8.3 | 2.6 |
| IX | Golfo Norte | 73.0 | 9.9 | 12.7 | 1.2 | 3.2 |
| X | Golfo Centro | 54.9 | 17.2 | 19.8 | 5.0 | 3.1 |
| XI | Frontera Sur | 72.0 | 21.5 | 4.2 | 2.3 | 0.0 |
| XII | Península de Yucatán | 81.1 | 7.5 | 11.4 | 0.0 | 0.0 |
| XIII | Aguas del Valle de México | 13.3 | 17.3 | 36.0 | 24.0 | 9.4 |
| | Nacional | 55.9 | 15.0 | 20.6 | 6.0 | 2.5 |



Figura 2-5. Calidad del Agua, SDT. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

Tabla 2-5. No. de sitios por clasificación de calidad de agua subterránea, salinidad en SDT, 2015. Fuente: Conagua, SINA http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua. Consultada el 29 de mayo de 2017

| | Región hidrológico-administrativa | Dulce | Ligeramente Salobre | Salina | Salobre | Total |
|-------------|-----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|------------|------------|
| I | Península de Baja California | 41 | 22 | 1 | 24 | 88 |
| II | Noroeste | 82 | 10 | 1 | 4 | 97 |
| III | Pacífico Norte | 60 | 2 | 0 | 1 | 63 |
| IV | Balsas | 53 | 2 | 0 | 0 | 55 |
| V | Pacífico Sur | 11 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| VI | Río Bravo | 63 | 17 | 1 | 11 | 92 |
| VII | Cuencas Centrales del Norte | 182 | 37 | 0 | 15 | 234 |
| VIII | Lerma Santiago Pacífico | 184 | 5 | 0 | 3 | 192 |
| IX | Golfo Norte | 40 | 10 | 0 | 6 | 56 |
| X | Golfo Centro | 16 | 3 | 0 | 2 | 21 |
| XI | Frontera Sur | 30 | 1 | 0 | 0 | 31 |
| XII | Península de Yucatán | 34 | 20 | 0 | 5 | 59 |
| XIII | Aguas del Valle de México | 21 | 19 | 0 | 1 | 41 |
| | Total | 55.9 | 15.0 | 20.6 | 6.0 | 2.5 |

Uso del agua

El agua se emplea para diversos usos, desde el consumo hasta la producción de bienes o servicios. El Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) es el encargado de proporcionar información y seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes a través de la inscripción de los títulos de concesión, asignación, y permisos de descarga, haciendo constar la titularidad de los derechos inscritos y los cambios en sus características⁸¹.

En la tabla 2-6 se presentan los volúmenes de agua concesionados de acuerdo al REPGA, 2015.

Tabla 2-6. Usos de acuerdo a la clasificación del REPGA. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 70

| Clave | Rubro de Clasificación | Vol. Concesionado (hm ³) |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A | Agrícola (Inscrito + pendiente) | 58 450 |
| B | Agroindustrial | 4 |
| C | Doméstico | 39 |
| D | Acuacultura | 1 136 |
| E | Servicios | 1 474 |
| F | Industria | 6 347 |
| F1 | Industria excluyendo termoeléctricas | 2 198 |
| F2 | Termoeléctricas | 4 149 |
| G | Pecuario | 207 |
| H | Público urbano | 12 441 |
| I | Múltiples | 5 566 |
| K | Comercio | 0.1 |
| L | Otros | 0.5 |
| Subtotal consuntivo | | 85 664 |
| J | Hidroeléctricas | 180 895 |
| Subtotal no consuntivo | | 180 895 |
| Total | | 266 559 |

Como puede observarse, de la tabla anterior, el volumen de agua que se utiliza para el uso no consuntivo es de más del doble del que se utiliza para uso consuntivo, aunque cabe aclarar que es posible que esa misma agua ocupada en las hidroeléctricas sea empleada varias veces en distintas centrales del país. Además, de todo el uso consuntivo el que mayor consumo tiene es el agrícola con aproximadamente el 75%; seguido después por el público urbano el cual representa aproximadamente el 15%, lo cual nos da una visión clara de cuáles son las prioridades de concesión, aunque, aun así, a veces es insuficiente.

La figura 2-6 muestra la evolución del volumen concesionado para usos consuntivos del 2006 al 2015.

⁸¹ <http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/acerca-del-repga>. Consultada el 30 de mayo de 2017

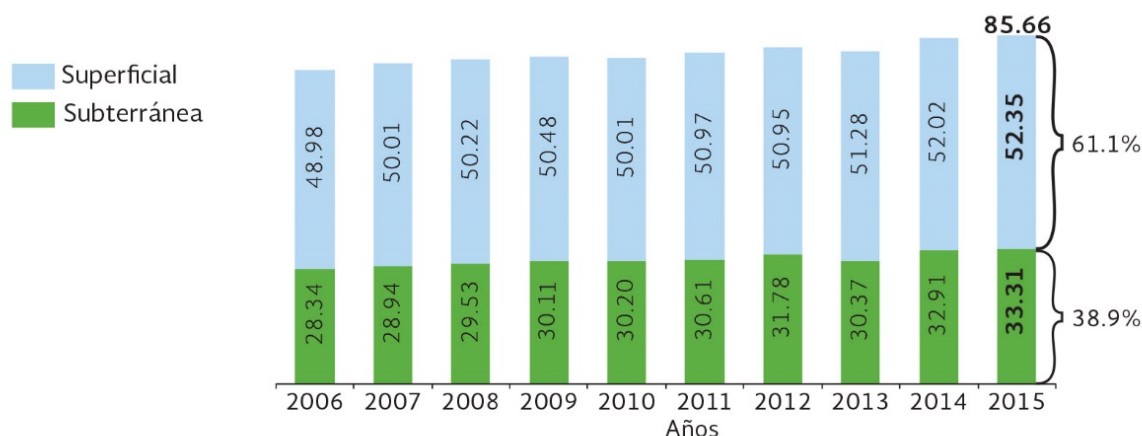


Figura 2-6. Volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2006-2015. (en miles de hm³). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 71

Puede verse claramente que poco más del 60% del agua que se ocupa para usos consuntivos proviene de fuentes superficiales, aun así, lo que se obtiene de fuentes subterráneas no es poco, y como ya se ha mencionado, muchos acuíferos están sobreexplotados. Esto seguramente provocará problemas en el futuro si esta situación no cambia. También puede verse que la variación de los volúmenes concesionados realmente no ha sido grande, aumentando solamente un 10% de 2006 a 2015.

La tabla 2-7 muestra una comparativa más clara de los usos principales y sus fuentes.

Tabla 2-7. Usos consuntivos por tipo de fuente, 2015. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 71

| Uso | Origen | | Volumen total (Miles de hm³) | Porcentaje de extracción |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | Superficial (Miles de hm³) | Subterráneo (Miles de hm³) | | |
| Agrícola | 41.89 | 23.47 | 65.36 | 76.3 |
| Abastecimiento público | 5.16 | 7.32 | 12.48 | 14.6 |
| Industria autoabastecida | 1.61 | 2.07 | 3.68 | 4.3 |
| Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad | 3.70 | 0.45 | 4.15 | 4.8 |
| Total | 52.35 | 33.31 | 85.66 | 100.0 |

El mayor uso consuntivo del agua es agrícola. La superficie agrícola del país en 2007 fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales el 42 por ciento estuvo ocupada por cultivos anuales; 29% correspondió a cultivos perennes y el restante 25% de la superficie no fue sembrada. Aproximadamente el 18% de la superficie agrícola registrada 18% era de riego y el resto estaba bajo un régimen temporal. 630 313 unidades de producción utilizaron sistema de riego, 405 851 lo hacen por canales de tierra; 159 876 unidades de producción por canales cubiertos; 56 836 por aspersión y

microaspersión; 20 881 por goteo; y 64 112 por algún otro tipo. Algunas unidades utilizaron más de un sistema⁸².

En cuanto al mayor uso no consuntivo (el de las hidroeléctricas), a nivel nacional las regiones hidrológico-administrativas XI Frontera Sur y IV Balsas tienen la concesión de agua más importante en este uso ya que en ellas se localizan los ríos más caudalosos y las centrales hidroeléctricas más grandes del país. En 2015 las plantas hidroeléctricas emplearon un volumen de agua de 138 662 hectómetros cúbicos, lo que permitió la generación de 30.1 TWh de energía eléctrica, que correspondía al 11.5% del total nacional en ese momento. La capacidad instalada en las centrales hidroeléctricas al 2015 fue de 12 028 MW, que correspondía al 21.9% de la instalada en el país⁸³.

Infraestructura hidráulica

Presas y bordos

En México, aunque se tiene un registro incompleto de los bordos, se estima que existen más de 5 mil presas y bordos. La capacidad de las presas en el país es de aproximadamente 150 mil hm³, pero 180 presas representan el 80% del almacenamiento nacional; aunque este volumen varía dependiendo de las precipitaciones y escurrimientos⁸⁴. A continuación se presentan la gráfica del volumen almacenado en estas 180 presas del 2006 al 2015 (figura 2-7) y el mapa de ubicación de éstas (figura 2-8).

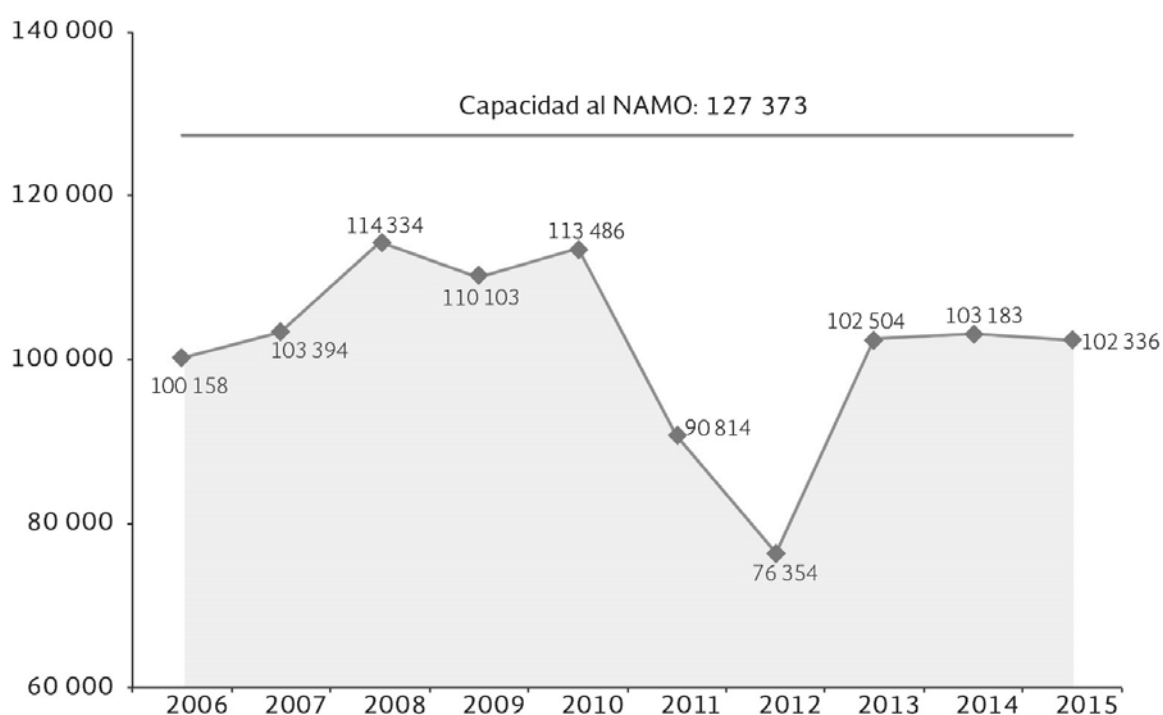


Figura 2-7. Volumen en las 180 presas principales en (hm³). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 99

⁸² Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007). Así hicimos el VIII censo agrícola, ganadero y forestal 2007: Aspectos metodológicos y principales resultados. Revista del VIII Censo Agropecuario.

⁸³ SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 84

⁸⁴ *Ibid.*, pág. 100

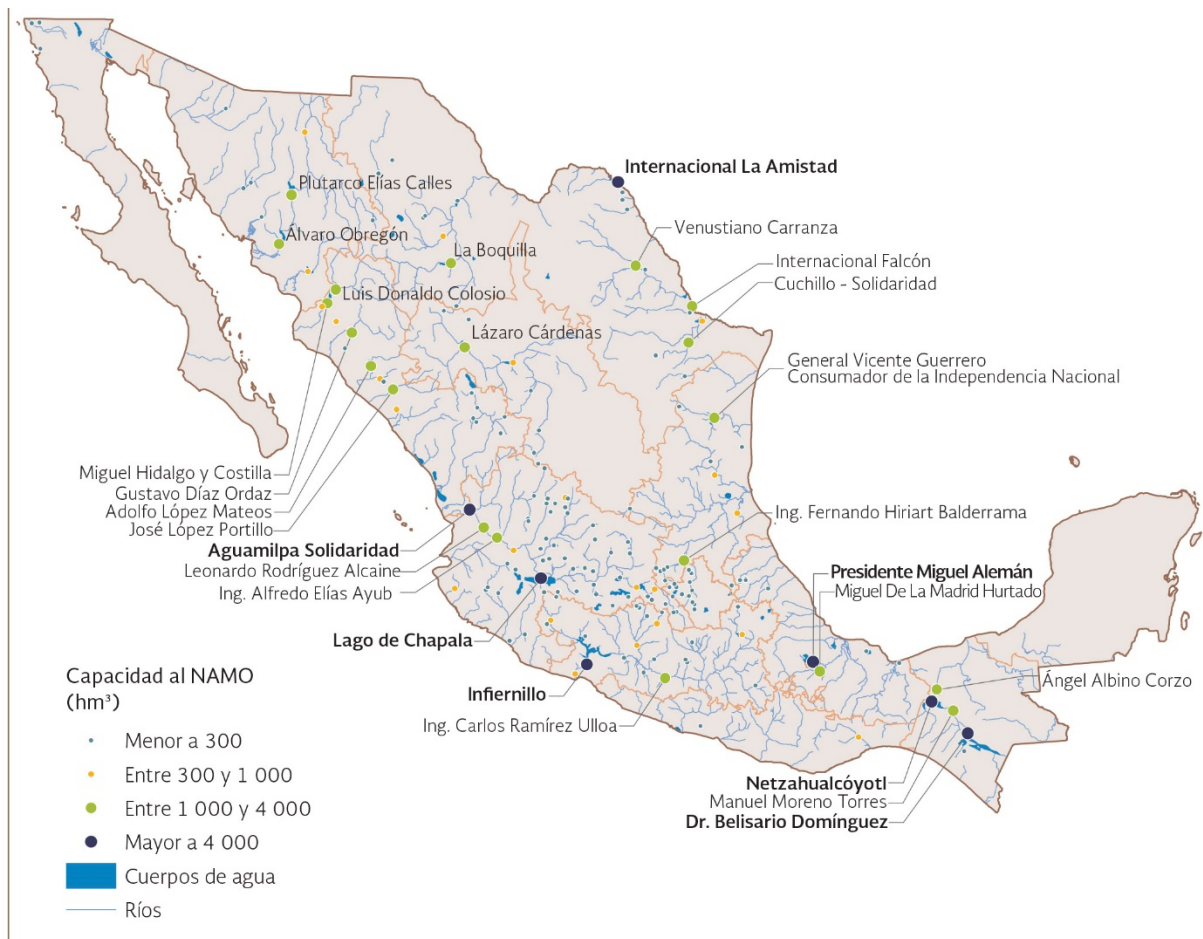


Figura 2-8. Mapa, principales presas en México. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 100

Infraestructura hidroagrícola

En el territorio nacional, el área con infraestructura que permite el riego, es de aproximadamente 6.5 millones de hectáreas de las cuales 3.3 millones corresponden a 86 distritos de riego (DR) y los 3.2 restantes a más de 40 mil unidades de Riego (UR).

En 2014 se estimaba una producción con un valor total de 159 979 millones de pesos, a partir de 3 480 159 hectáreas cosechadas. En la figura 2-9 se presenta la productividad física del agua. La cual es una medida en kilogramos de la producción agrícola por metro cúbico de agua empleado en el riego.

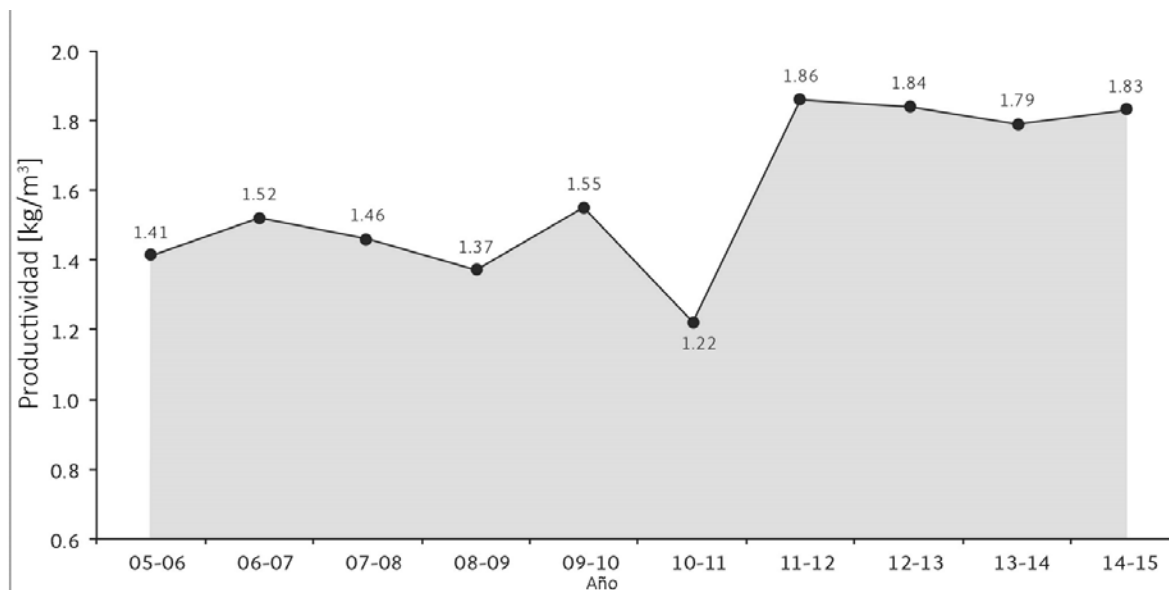


Figura 2-9. Productividad del agua en los DR por año. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 109

Infraestructura de agua potable y alcantarillado

La CONAGUA calcula que el 92.5% de la población nacional (95.7% urbana y 81.6%) tienen cobertura de agua potable, esto, ya sea a través del agua entubada en vivienda o terreno, proveniente del servicio público de agua, pozo comunitario o pozo particular, o a través de acarreo de llave comunitaria⁸⁵.

Al 2015, la cobertura nacional de acceso al servicio de alcantarillado era de 92.8% (97.4% urbana y 77.5% rural), mientras que la cobertura nacional de alcantarillado a red pública o fosa séptica era de 91.4% (96.6% urbana y 74.2% rural).

En las figuras 2-10 y 2-11 se muestra la evolución de estos dos servicios.

Además, existen más de 3 000 kilómetros de acueductos en México, con una capacidad total de 112 metros cúbicos por segundo. Con respecto a la potabilización del agua, en 2015 en las 874 plantas que operan, se potabilizó 97.9 (m³/s), y en la tabla 2-8 se muestran los principales procesos de potabilización aplicados al 2015⁸⁶.

⁸⁵ *Ibid.*, pág. 105, 110, 112.

⁸⁶ *Ibid.* pág. 96-97

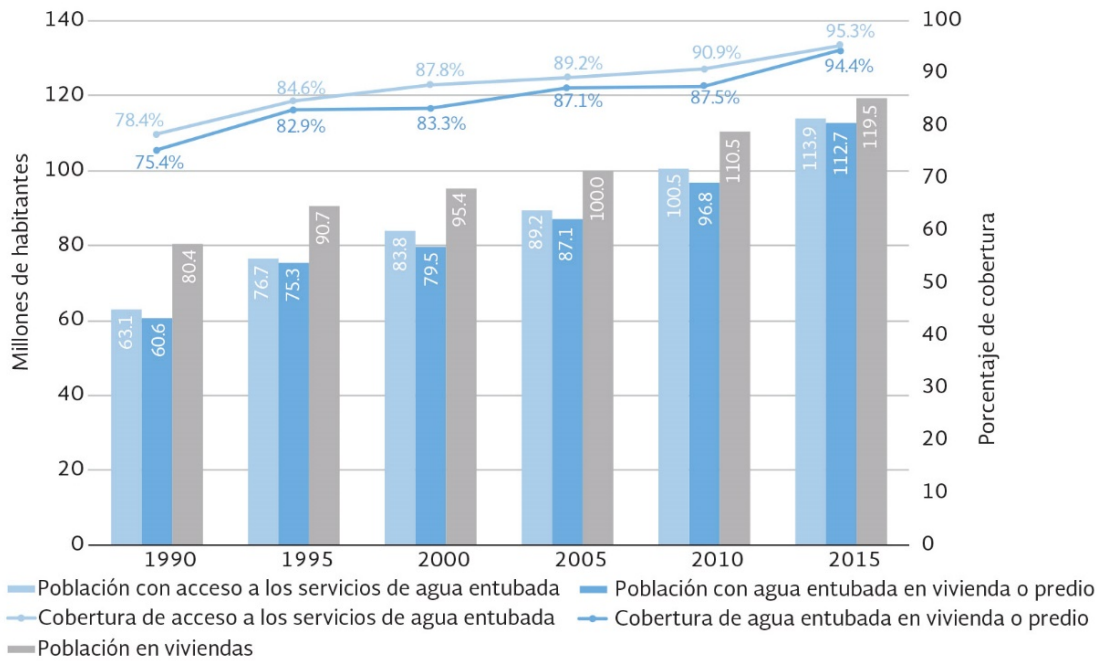


Figura 2-10. Población nacional con cobertura de agua potable entubada. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 113

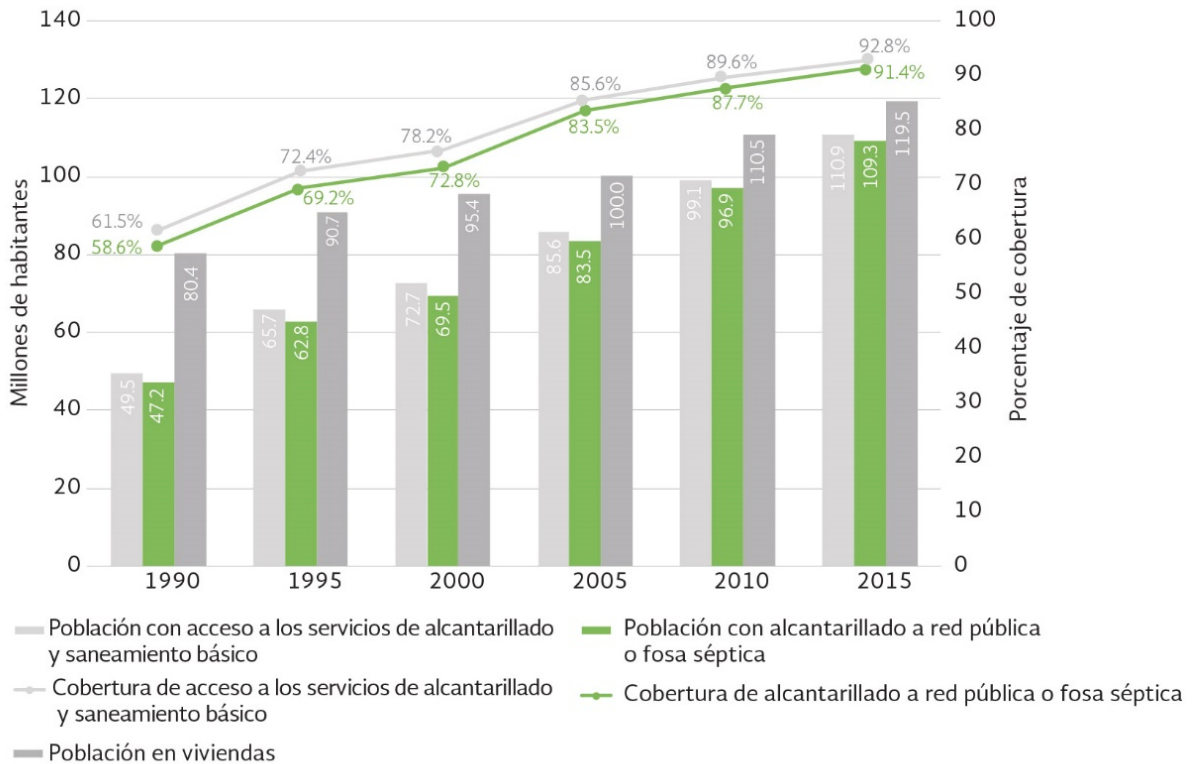


Figura 2-11. Población nacional con cobertura de alcantarillado. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 115

Tabla 2-8. Procesos principales de potabilización, 2015. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 123

| Proceso Central | Propósito | Plantas | | Gasto Potabilizado | |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------|-------|---------------------|-------|
| | | No. | % | (m ³ /s) | % |
| Ablandamiento | Eliminación de Dureza | 18 | 2.1 | 0.47 | 0.48 |
| Adsorción | Eliminación de trazas de orgánicos | 3 | 0.3 | 0.06 | 0.07 |
| Clarificación Convencional | Eliminación de sólidos suspendidos | 215 | 24.6 | 69.53 | 71.02 |
| Clarificación de Patente | Eliminación de sólidos suspendidos | 154 | 17.6 | 5.06 | 5.17 |
| Filtración Directa | Eliminación de sólidos suspendidos | 101 | 11.6 | 16.22 | 16.57 |
| Filtración Lenta | Eliminación de sólidos suspendidos | 10 | 1.1 | 0.06 | 0.06 |
| Filtros de Carbón Activado | Eliminación de sólidos suspendidos | 35 | 4.0 | 0.03 | 0.03 |
| Osmosis Inversa | Eliminación de sólidos disueltos | 301 | 34.4 | 1.87 | 1.91 |
| Remoción de Hierro y Manganeso | | 21 | 2.4 | 4.39 | 4.48 |
| Otro | | 16 | 1.8 | 0.22 | 0.22 |
| Total | | 874 | 100.0 | 97.90 | 100.0 |

Tratamiento y reúso del agua

Durante el 2015, en las 2 477 plantas en operación, se trató tan sólo al 57.0% del agua municipal recolectada a través de los sistemas de alcantarillado. En ese mismo año, la industria trató el 67% en las 2 832 plantas en operación a nivel nacional.

A continuación, se presenta un resumen en datos. En la tabla 2-9 se muestran los volúmenes de agua generados y tratados, así como las cantidades de DBO₅ generadas y tratadas.

Tabla 2-9. Descargas de aguas municipales y no municipales. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 124

| Descargas Municipales | | | | |
|---------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|-------|-------------------|
| Volumen | | | | |
| Se generan | 7.23 | Miles de hm ³ /año | 229.1 | m ³ /s |
| Se recolectan en alcantarillado | 6.69 | Miles de hm ³ /año | 212.0 | m ³ /s |
| Se tratan | 3.81 | Miles de hm ³ /año | 120.9 | m ³ /s |
| Carga Contaminante | | | | |
| Se generan | 1.95 | Millones de toneladas de DBO ₅ al año | | |
| Se recolectan en alcantarillado | 1.81 | Millones de toneladas de DBO ₅ al año | | |
| Se remueven en los sistemas de tratamiento | 0.84 | Millones de toneladas de DBO ₅ al año | | |
| Usos no municipales, Incluyendo a la industria | | | | |
| Volumen | | | | |
| Se generan | 6.77 | Miles de hm ³ /año | 214.6 | m ³ /s |
| Se tratan | 2.22 | Miles de hm ³ /año | 70.5 | m ³ /s |
| Carga Contaminante | | | | |
| Se generan | 10.15 | Millones de toneladas de DBO ₅ al año | | |
| Se remueven | 1.49 | Millones de toneladas de DBO ₅ al año | | |

La figura 2-12 muestra los principales procesos de tratamiento, y el porcentaje de las plantas de tratamiento en México que utilizan cada uno. Se puede observar que los lodos activados son el principal sistema de tratamiento seguido por las lagunas de estabilización.

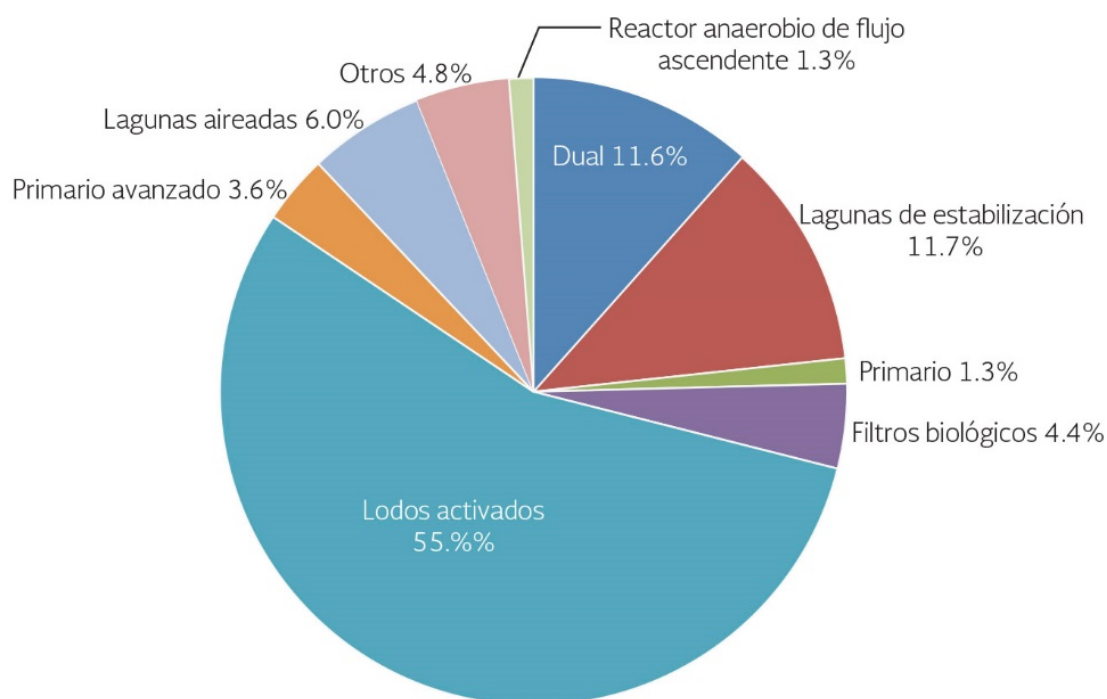


Figura 2-12. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2015. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. pág. 126

La tabla 2-10 muestra el número y porcentaje de plantas de tratamiento en México, su gasto de operación y el nivel de tratamiento obtenido. Puede observarse que a pesar de que 1 de cada 2 plantas que operaban en 2015 obtenía tratamiento secundario, casi el 80% de las plantas restantes solo reciben tratamiento primario, una situación preocupante.

Tabla 2-10. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales 2015. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 127

| Tipo de tratamiento | Propósito | Número de plantas | Gasto de operación (m ³ /s) | Porcentaje |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|------------|
| Primario | Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1mm | 913 | 27.65 | 39.2 |
| Secundario | Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos. | 1 660 | 35.37 | 50.2 |
| Terciario | Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus. | 85 | 1.47 | 2.1 |
| No especificado | | 174 | 6.02 | 8.5 |
| Total | | 2 832 | 70.50 | 100.0 |

La CONAGUA estima que al 2015 se reusaban directamente (antes de su descarga) 19.8 (m³/s) de aguas residuales tratadas, mientras que en el mismo año se reusaban indirectamente (después de su

descarga) 88.1 (m³/s). Y el gasto del intercambio por aguas residuales de agua de primer uso es era de 5.1 (m³/s) ⁸⁷.

Con respecto a los sistemas de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales, en el territorio nacional al finalizar el 2015, existían 68 como sistemas individuales, y 151 como sistemas en donde se combinan los humedales artificiales con algún otro tipo de tratamiento (Tanque Imhoff; Sedimentación; Rafa, Uasb; o Fosa Séptica). Lo cual representa un 2.75% para sistemas individuales y un 6.09% para sistemas conjuntos del total de plantas a nivel nacional.

Los humedales artificiales como sistemas individuales, tratan 488.9 (L/s), representando 0.4% del caudal tratado a nivel nacional, y con una capacidad instalada de 623.6 (L/s) lo cual es 0.35% de la capacidad instalada en cuestión de tratamiento de aguas residuales del país⁸⁸.

2.2.2 Situación social

El Programa Nacional de Infraestructura 2014- 2018 (PNI) tiene como objetivo incrementar la infraestructura hidráulica, para asegurar el abastecimiento de agua destinada al consumo humano y riego agrícola, y para el saneamiento y protección contra inundaciones. Para lograrlo plantea las siguientes estrategias:

- Construir infraestructura para incrementar la oferta de agua potable, y la capacidad de drenaje y saneamiento.
- Modernizar y construir infraestructura para incrementar la oferta de agua destinada a la agricultura.
- Construir infraestructura para protección contra inundaciones.

Algunos programas que logran que las estrategias se lleven a cabo son: Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas (Apazu), Programa para la Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales (Prossapys), Programa de Tratamiento de Aguas Residuales (Protar) y Programa de Agua Limpia (PAL).

Durante el siglo pasado, México transitó de ser un país predominantemente rural a uno urbano, en donde la migración del campo a las ciudades ha sido un aspecto determinante en la redistribución de la población. Las principales causas que han propiciado el crecimiento urbano en nuestro país son: un importante desarrollo industrial; registro de una tasa de natalidad de las más altas del mundo; registro de una disminución en la tasa de mortalidad debido a los progresos en la higiene y la medicina, adelantos en la cirugía, campañas de saneamiento, introducción de agua potable, etc. Lo anterior ha traído como consecuencia una disminución de las enfermedades de origen hídrico y del aparato respiratorio, que son las que causan mayor número de defunciones en nuestro país⁸⁹. Hasta la década de 1950 poco más de la mitad de la población nacional residía en localidades menores de 2 500 habitantes y para el año 2000 dos de cada tres mexicanos vivían en alguna de las 364 ciudades urbanas del país⁹⁰.

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, en el país existían 3 651 localidades con más de 2 500 habitantes, con una población total de 86.9 millones, que equivalen al 76.8 por ciento de la

⁸⁷ *Ibíd.*, pág. 128

⁸⁸ SEMARNAT, CONAGUA. (2015). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA. Pág. 81, 85.

⁸⁹ SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, edición 2016. CONAGUA. Pág. 18

⁹⁰ Consejo Nacional de Población. (2003). La Situación Demográfica en México 2003. CONAPO.

población nacional. Para 2015, este porcentaje se incrementó al 78.8 por ciento. Es decir, en los últimos cinco años la población urbana nacional se incrementó en 7.2 millones; habitantes que demandan más servicios de todo tipo, entre ellos agua potable y drenaje.

En el mismo Censo de Población y Vivienda 2010, se identificaron 193 503 localidades de menos de 2 500 habitantes, con una población total de 26.2 millones de habitantes, equivalente al 23.2 por ciento de la población nacional.

De acuerdo al índice de marginación de CONAPO del 2005, tres de cada cuatro localidades rurales tienen un alto o muy alto grado de marginación y en ellas reside 61 por ciento de la población rural. La marginación en los asentamientos rurales tiende a aumentar conforme se alejan de asentamientos humanos mayores y de las vías de comunicación⁹¹.

Las coberturas de agua potable al 2015 son de, 92.5% en cobertura nacional, 95.7% en cobertura nacional de población urbana y 81.6% en cobertura nacional de población, mientras que las coberturas de alcantarillado al mismo año son de, 91.4% en cobertura nacional, 96.6% en cobertura nacional de población urbana y 74.2% en cobertura nacional de población rural. Y aunque estas cifras parezcan realmente altas, estas no se traducen en acceso al agua de manera continua; ya que, en palabras del relator especial de Naciones Unidas sobre los Derechos Humanos al Agua y al Saneamiento, Leo Heller, el cual visitó el país en mayo de 2017, “Tan sólo en la ciudad de México 70% de la población recibe agua menos de 12 horas al día y en Filomeno Mata, Veracruz, la población de 13 mil habitantes sólo tiene acceso a agua potable durante tres horas al día”.

Y el incremento poblacional no hace más que agravar la situación, y para el 2030 se espera que la población ascienda a 137.5 millones.

La crisis del agua en México no es una amenaza futura sino un proceso que ya se hace sentir y que podría alcanzar niveles críticos en el primer cuarto de este siglo. Si el manejo del agua no experimenta un cambio radical en nuestro país, en 25 años México verá frenado su desarrollo por falta del recurso en varias ciudades, insuficiencia agro productiva, colapso de varios ecosistemas y agravamiento de los problemas de salud pública⁹².

2.2.3 Situación económica

Uno de los principios que sustenta la política hídrica nacional es: “La gestión del agua debe generar recursos económicos y financieros necesarios para realizar sus tareas inherentes, bajo el principio de que ‘el agua paga el agua’, conforme a las Leyes en la materia”⁹³.

Las personas físicas y morales están obligadas al pago del derecho sobre las aguas nacionales que usen, exploten o aprovechen, bien sea de hecho o al amparo de títulos de asignación, concesión, autorización o permisos otorgados por el Gobierno Federal. También aquéllas que descarguen en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, así como en los suelos o las infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos. Asimismo, están las que usen, gocen, o aprovechen bienes del dominio público de la federación en los puertos, terminales e

⁹¹ Consejo Nacional de Población. (2005). Índices de Marginación 2005. CONAPO.

⁹²Carabias Julia [y otros]. (2005). Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. UNAM; El Colegio de México; Fundación Gonzalo Río Arronte. Pág. 11.

⁹³ Ley de Aguas Nacionales, TÍTULO TERCERO: Política y Programación Hídricas, Capítulo Único, Sección Primera: Política Hídrica Nacional. (2016). Artículo 14 BIS 5.

instalaciones portuarias, la zona federal marítima, los diques, cauces, vasos, zonas de corrientes y depósitos de propiedad nacional⁹⁴.

En ese contexto a continuación se presenta una gráfica (figura 2-13), la cual muestra la recaudación de contribuciones y aprovechamientos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes y el monto de programas presupuestarios para el gobierno y gobernanza del agua. Además, existe un indicador el cual es el cociente del monto de los programas entre la recaudación, si éste es menor a la unidad, se dice que la recaudación brinda los recursos suficientes para financiar las actividades de gobierno y gobernanza del agua.

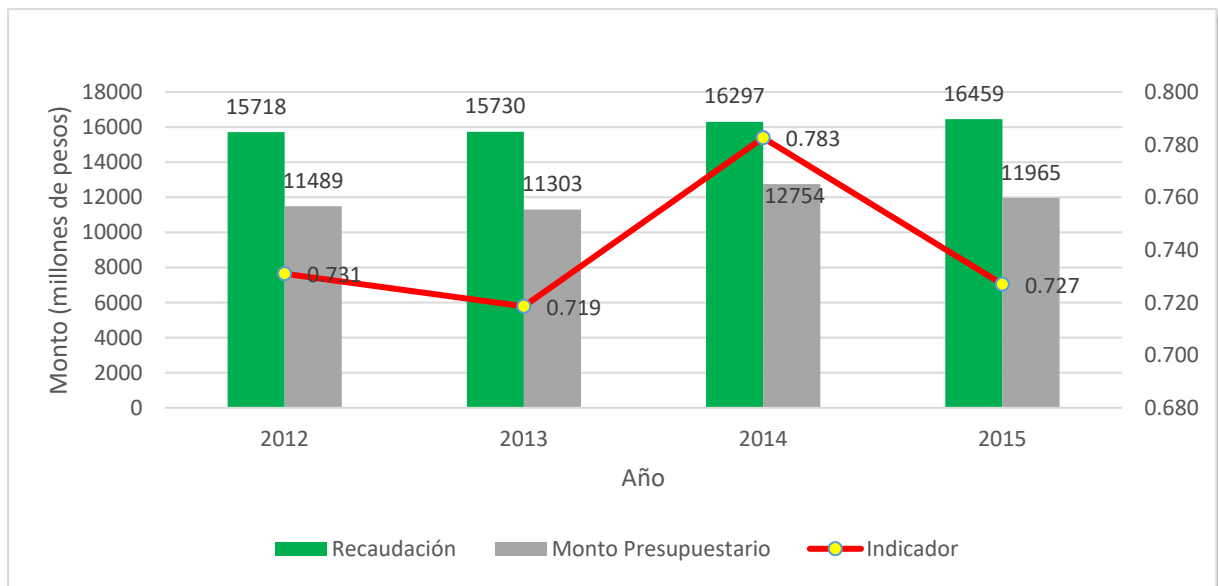


Figura 2-13. Comparativo Recaudación - Monto Presupuestario. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 153

A diciembre de 2015, se contaba con 486 896 títulos de concesión o asignación de aguas nacionales inscritos en el REPDA. La tabla 2-11, a continuación, muestra la distribución para distintos usos consuntivos y no consuntivos.

Tabla 2-11. Títulos de concesión o asignación inscritos en el REPDA. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 138

| Usos agrupados | Títulos inscritos en el REPDA | Número Porcentaje |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Agrícola | 312 053 | 64.09 |
| Abastecimiento público | 144 832 | 29.75 |
| Industria autoabastecida | 29 804 | 6.12 |
| Termoeléctricas | 55 | 0.01 |
| Subtotal usos consuntivos | 486 744 | 99.97 |
| Conservación ecológica (uso no consuntivo) | 1 | 0 |
| Hidroeléctricas (uso no consuntivo) | 151 | 0.03 |
| Total | 486 896 | 100 |

Respecto a las tarifas de agua potable y saneamiento generalmente comprenden:

⁹⁴ SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 144

- Cargos Fijos, independientes del volumen empleado
- Cargos variables por concepto de abastecimiento de agua, en función del volumen empleado
- Cargos variables por concepto de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. Generalmente aplicados como un porcentaje de los cargos por concepto de abastecimiento de agua.

Aunque también es necesario mencionar que las tarifas varían de acuerdo a la disponibilidad. A menor disponibilidad mayor costo. En nuestro país, las tarifas se actualizan mensualmente. Esto basado en algún índice como lo es el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) o bien el salario mínimo del municipio en cuestión. Estas tarifas deben de estar diseñadas con base en cuestiones técnicas y económicas, relacionadas a la operación, administración y mantenimiento, y deben ser justas para propiciar un uso responsable por parte de la sociedad, pero también para ampliar la cobertura y calidad de los servicios.

La gráfica (figura 2-14) y tablas (2-12 y 2-13) que se presentan a continuación son un resumen de las tarifas del agua para los 3 usos principales y de las tarifas por derechos de explotación.

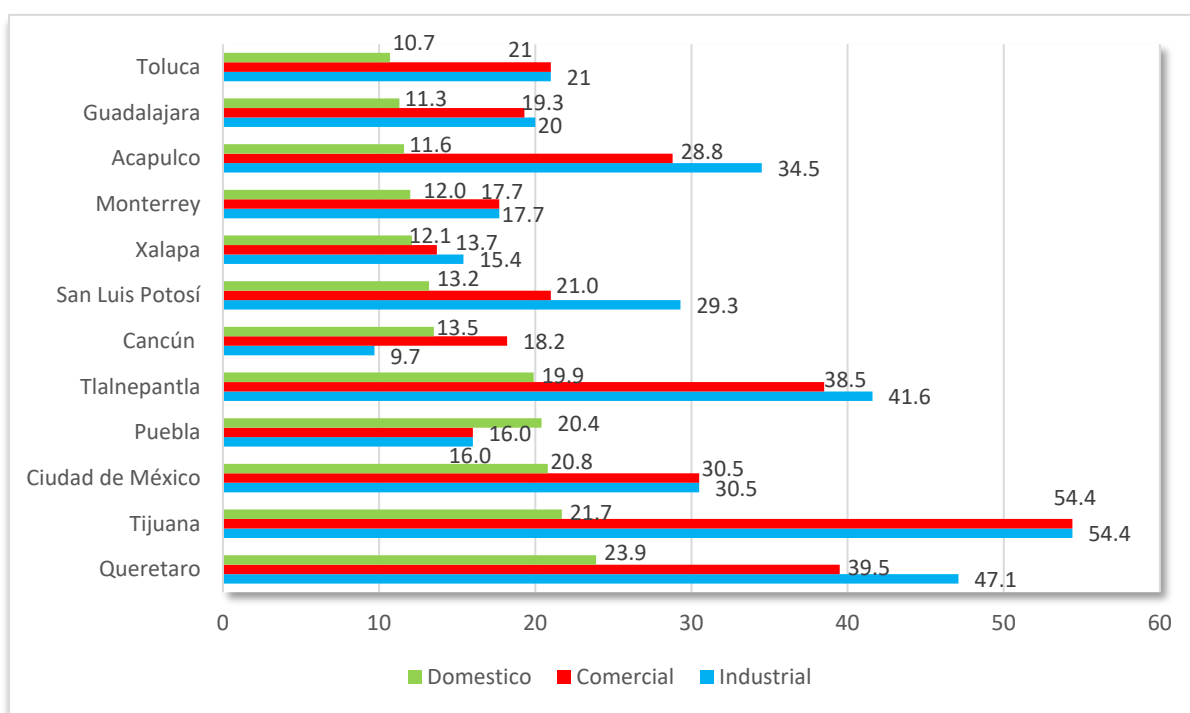


Figura 2-14. Tarifas del Agua para los 3 usos en las principales ciudades de México en 2015 (Pesos por metro cúbico). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 156

Tabla 2-12. Derechos por explotación, uso o aprovechamiento de aguas superficiales, 2015 (pesos por metro cúbico). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 145

| Uso | Zona | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Régimen general | 14.391000 | 6.6252000 | 2.1723000 | 1.6611000 |
| Agua potable, consumo mayor a 300 l/hab-día (sobre el excedente) | 0.8554000 | 0.4102700 | 0.2048800 | 0.1019900 |
| Agua potable, consumo igual o inferior a 300 l/hab-día | 0.4277000 | 0.2051300 | 0.1024400 | 0.0510000 |
| Agropecuario, sin exceder concesión | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 |
| Agropecuario, por cada m3 que exceda del concesionario | 0.1632000 | 0.1632000 | 0.1632000 | 0.1632000 |
| Balnearios y centros recreativos | 0.0105976 | 0.0059144 | 0.0027587 | 0.0011378 |
| Generación hidroeléctrica y geotérmica | 0.0049444 | 0.0049444 | 0.0049444 | 0.0049444 |
| Acuicultura | 0.0035555 | 0.0017739 | 0.0008146 | 0.0003778 |

Tabla 2-13. Derechos por explotación, uso o aprovechamiento de aguas subterráneas, 2015 (pesos por metro cúbico). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 145

| Uso | Zona | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Régimen general | 19.391400 | 7.5060000 | 2.6135000 | 1.8998000 |
| Agua potable, consumo mayor a 300 l/hab-día (sobre el excedente) | 0.8929200 | 0.4117200 | 0.2321100 | 0.1082000 |
| Agua potable, consumo igual o inferior a 300 l/hab-día | 0.4464600 | 0.2058600 | 0.1160600 | 0.0541000 |
| Agropecuario, sin exceder concesión | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 |
| Agropecuario, por cada m3 que exceda del concesionario | 0.1632000 | 0.1632000 | 0.1632000 | 0.1632000 |
| Balnearios y centros recreativos | 0.0125539 | 0.0061847 | 0.0030336 | 0.0013546 |
| Generación hidroeléctrica y geotérmica | 0.0049444 | 0.0049444 | 0.0049444 | 0.0049444 |
| Acuicultura | 0.0039041 | 0.0018085 | 0.0008983 | 0.0004118 |

La CONAGUA, es la autoridad que interviene en el cobro de los derechos por uso, aprovechamiento o explotación de las aguas nacionales y sus bienes inherentes. Mientras que para el cobro de las tarifas por agua potable y alcantarillado se encargan los administradores del sistema.

Las siguientes tablas (2-14, 2-15, y 2-16) muestran la recaudación y las inversiones por origen del recurso y por rubro de aplicación, hechas por la CONAGUA e instituciones como SEDESOL, CDI, BANOBRAS y otras.

Tabla 2-14. Recaudación por el cobro de derechos y conceptos (En millones de pesos a precios del 2015). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 147

| Concepto | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Uso o aprovechamiento de aguas nacionales | 9954.60 | 9873.50 | 9419.40 | 9930.00 | 10506.50 | 9894.00 | 10990.10 | 10552.60 |
| Suministro de agua en bloque a centros urbanos e industriales | 2672.20 | 2580.30 | 2886.40 | 3210.20 | 3125.90 | 3001.90 | 3544.80 | 3725.50 |
| Servicio de riego | 254.80 | 280.70 | 262.70 | 316.80 | 231.50 | 207.00 | 226.50 | 244.50 |
| Extracción de materiales | 55.80 | 56.80 | 58.60 | 34.80 | 41.20 | 23.20 | 24.50 | 24.60 |
| Usos de cuerpos receptores | 76.10 | 223.20 | 265.10 | 309.20 | 332.30 | 417.00 | 667.40 | 1153.90 |
| Uso de zonas federales | 41.00 | 47.50 | 43.90 | 45.30 | 51.30 | 45.00 | 53.80 | 60.90 |
| Diversos (servicio de trámite, regularización y multas, entre otros) | 433.60 | 266.00 | 246.70 | 250.60 | 783.40 | 458.80 | 565.40 | 545.10 |
| Recaudación por créditos fiscales | 1246.50 | 94.20 | 92.10 | 505.40 | 645.60 | 508.80 | 213.70 | 97.30 |
| Recaudación por "Programa Ponte al Corriente" | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1174.00 | 0.00 | 0.00 |
| Trasvase de aguas nacionales | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 10.40 | 55.00 |
| Total | 14734.5 | 13422.1 | 13274.9 | 14602.3 | 15717.7 | 15729.9 | 16296.6 | 16459.3 |

Tabla 2-15. Inversiones por sector de origen del recurso (En millones de pesos). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, edición 2016. CONAGUA. Pág. 8

| Año | Federal | Estatal | Municipal | Otros | Total |
|------|----------|---------|-----------|---------|----------|
| 2002 | 2 293.0 | 1 146.0 | 695.0 | 6 285.0 | 10 419.0 |
| 2003 | 4 237.7 | 2 147.5 | 1 926.8 | 4 121.5 | 12 433.5 |
| 2004 | 4 071.4 | 3 035.4 | 1 386.5 | 4 996.0 | 13 489.4 |
| 2005 | 7 085.3 | 4 988.4 | 2 917.8 | 6 615.9 | 21 607.3 |
| 2006 | 5 771.4 | 2 699.2 | 2 817.4 | 4 440.5 | 15 728.5 |
| 2007 | 9 432.6 | 4 140.4 | 2 714.2 | 5 230.2 | 21 517.4 |
| 2008 | 12 318.7 | 6 279.2 | 3 237.2 | 4 484.7 | 26 319.8 |
| 2009 | 14 815.3 | 5 596.3 | 3 642.6 | 6 192.8 | 30 247.0 |
| 2010 | 16 965.9 | 5 318.1 | 3 729.2 | 5 487.8 | 31 501.0 |
| 2011 | 20 197.8 | 7 187.7 | 3 975.3 | 6 114.2 | 37 474.9 |
| 2012 | 24 661.6 | 6 861.9 | 2 913.7 | 6 065.1 | 40 502.2 |
| 2013 | 22 984.4 | 5 880.5 | 3 296.1 | 4 952.0 | 37 113.1 |
| 2014 | 20 512.4 | 5 620.3 | 3 248.4 | 4 825.1 | 34 206.2 |
| 2015 | 23 993.2 | 4 247.9 | 3 066.9 | 3 795.5 | 35 103.5 |

Tabla 2-16. Inversiones por rubro de aplicación (En millones de pesos). Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, edición 2016. CONAGUA. Pág. 11

| Año | Agua potable | Alcantarillado | Saneamiento | Mejoramiento de eficiencia | Otros | Total |
|------|--------------|----------------|-------------|----------------------------|---------|----------|
| 2002 | 3 567.5 | 4 041.6 | 1 531.6 | 1 196.7 | 81.8 | 10 419.2 |
| 2003 | 5 180.6 | 4 932.5 | 1 209.3 | 935.200 | 175.8 | 12 433.5 |
| 2004 | 5 352.8 | 5 442.5 | 1 539.0 | 1 084.4 | 70.7 | 13 489.4 |
| 2005 | 8 392.2 | 8 237.8 | 3 266.8 | 1 592.9 | 117.7 | 21 607.3 |
| 2006 | 5 445.0 | 5 823.2 | 1 821.3 | 2 392.7 | 246.4 | 15 728.5 |
| 2007 | 9 345.3 | 7 420.7 | 1 735.2 | 2 449.5 | 566.6 | 21 517.4 |
| 2008 | 10 497.0 | 9 356.9 | 2 312.2 | 3 050.1 | 1 103.6 | 26 319.8 |
| 2009 | 9 960.9 | 10 847.9 | 2 277.6 | 5 427.7 | 1 732.8 | 30 247.0 |
| 2010 | 9 159.0 | 12 373.2 | 2 855.4 | 4 863.3 | 2 250.1 | 31 501.0 |
| 2011 | 9 044.1 | 13 961.4 | 7 707.2 | 4 587.5 | 2 174.6 | 37 474.9 |
| 2012 | 10 880.9 | 7 401.3 | 15 913.2 | 3 777.9 | 2 529.0 | 40 502.2 |
| 2013 | 10 624.3 | 12 785.1 | 7 421.0 | 4 606.8 | 1 675.9 | 37 113.1 |
| 2014 | 10 355.9 | 10 018.4 | 5 576.3 | 6 335.1 | 1 920.5 | 34 206.2 |
| 2015 | 9 499.7 | 12 987.7 | 5 615.6 | 5 416.7 | 1 583.8 | 35 103.5 |

De toda la inversión realizada en estos sectores, el 78.8% se ha realizado en comunidades urbanas, mientras que tan sólo el 21.2% ha sido en comunidades rurales.

2.3 Desarrollo sustentable

2.3.1 El desarrollo sustentable

Desde 1958 cuando se realizó en Atenas el 1^{er} Congreso sobre “La Conservación de la Naturaleza y su Medio Ambiente”, ha tenido lugar una amplia discusión y debate dentro de la comunidad internacional sobre la importancia del ambiente para el desarrollo de la vida en todas sus manifestaciones. Y dados los problemas a los que se enfrenta la humanidad y el ambiente hoy en día, hay necesidad urgente de evitar la catástrofe y la barbarie a la que le encamina un Capital enajenado en su producción ilimitada, alienado en el productivismo y consumismo que arrasa con los recursos naturales, enloquecido por su sed de ganancias.

El desarrollo sustentable tiene como antecedente conceptual la preocupación por la escasez de recursos naturales y sus consecuencias sobre el crecimiento económico, expresadas desde 1798 por Malthus en su ensayo sobre población. Cabe destacar que los factores limitantes en su tiempo se restringían a la tierra y la capacidad de crecimiento de la oferta de alimentos, por encima de un crecimiento desmedido de la población. Ricardo, contemporáneo de Malthus, compartía su pesimismo con respecto a que la disminución de la rentabilidad de la tierra imponía límites al crecimiento tanto económico como poblacional.

La situación se mantuvo sin cambio hasta 1968 cuando el Club de Roma, organización formada por políticos, científicos e intelectuales, preocupados por solucionar los principales problemas del mundo, convocó a reunión donde se discutieron y analizaron problemas presentes y futuros de la humanidad y los límites del crecimiento económico frente al uso cada vez más extendido de los recursos naturales. De entre los temas a discusión destacaron: crecimiento de la población, desempleo, pobreza, contaminación, concentración urbana, enajenación de la juventud, inflación, rechazo de valores

tradicionales, pérdida de fe en las instituciones; siendo el objetivo primordial entender los orígenes de los problemas y encontrar respuestas a ellos. El resultado de dicha gestión fue el libro de Dennis Meadows, Donella Meadows y Jørgen Randers “Los límites del crecimiento”, donde se retomaba la demografía como variable importante a controlar por parte de los países pobres, desde el punto de vista de los ricos. El argumento fundamental del modelo fue la necesidad de establecer límites para el crecimiento exponencial de las actividades económicas, la población, la contaminación, debido a que el mundo se consideraba, como hoy, finito en tierras cultivables, yacimientos minerales, recursos energéticos y en la capacidad de soportar la contaminación.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano de 1972, en Estocolmo, Suecia, fue la respuesta a los debates sobre los riesgos de la degradación ambiental. En dicho foro se discutieron por primera vez temas como crecimiento, desarrollo y protección ambiental de manera globalizada. Los temas más relevantes fueron: la vinculación de los mayores problemas que afectaban el bienestar de la población y el desarrollo económico del mundo. Las conclusiones incluyen: el deterioro del ambiente se relacionó con la presión ejercida por el crecimiento de la población, los problemas ambientales de los países ricos resultan de la contaminación industrial, en tanto que los correspondientes a los países pobres son resultado del mal uso de los recursos naturales y su consiguiente agotamiento.

Fue hasta 1987 que, bajo la tutela de la entonces Primera Ministra de Noruega, Gro Harlem Brundtland, y el auspicio de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, se elaboró el informe titulado “Nuestro Futuro Común” (1988), también conocido como el “Informe Brundtland”, donde se propusieron acciones y directrices tendientes a reducir las amenazas a la sobrevivencia y dar certidumbre al desarrollo. Se señalaba al desarrollo sustentable como aquel desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro, para atender sus propias necesidades. Pero es en 1992, con la celebración en Río de Janeiro de La Cumbre de la Tierra, donde se constituyó la principal plataforma de difusión política del concepto de desarrollo sustentable. Esto desencadenó toda una serie de definiciones cuyo factor común fue el consenso de que el mundo está padeciendo una crisis ambiental que implica un cambio de conciencia y de estrategias para confrontarla y superarla⁹⁵.

Una de las definiciones más significativas del desarrollo sustentable es la del Consejo Internacional de Iniciativas Locales que lo definen textualmente como “aquel que ofrece servicios ambientales, sociales y económicos básicos a todos los miembros de una comunidad sin poner en peligro la viabilidad de los entornos naturales, construidos y sociales de los que depende el ofrecimiento de estos servicios”.

2.3.2 Las dimensiones del desarrollo sustentable

En la medida que el tiempo pasa, mayor es el número de voces que claman por políticas y estrategias que promuevan el desarrollo de procesos industriales ecológicos, agrícolas y urbanos; así como de nuevos patrones de producción y consumo que reduzcan el flujo de materiales y de energía por unidad de la actividad económica.

Todas estas manifestaciones obligan a abordar el tema desde una perspectiva con múltiples enfoques, para de esta forma poder manejar la situación de una mejor manera. Por otro lado, las soluciones poco sistemáticas tienden a crear grupos de opuestos. A menudo se escucha el siguiente argumento: “Si los ambientalistas ganan, la economía sufrirá”. El punto de vista opuesto es: “Si las empresas

⁹⁵ Misión Ribas Técnica. (s.f.). Ambiente y Desarrollo Sustentable. Pág. 232-233.

ganan, el medio ambiente será destruido". Por lo cual se debe encontrar un equilibrio entre las tres dimensiones (figura -15) que se presentan a continuación.

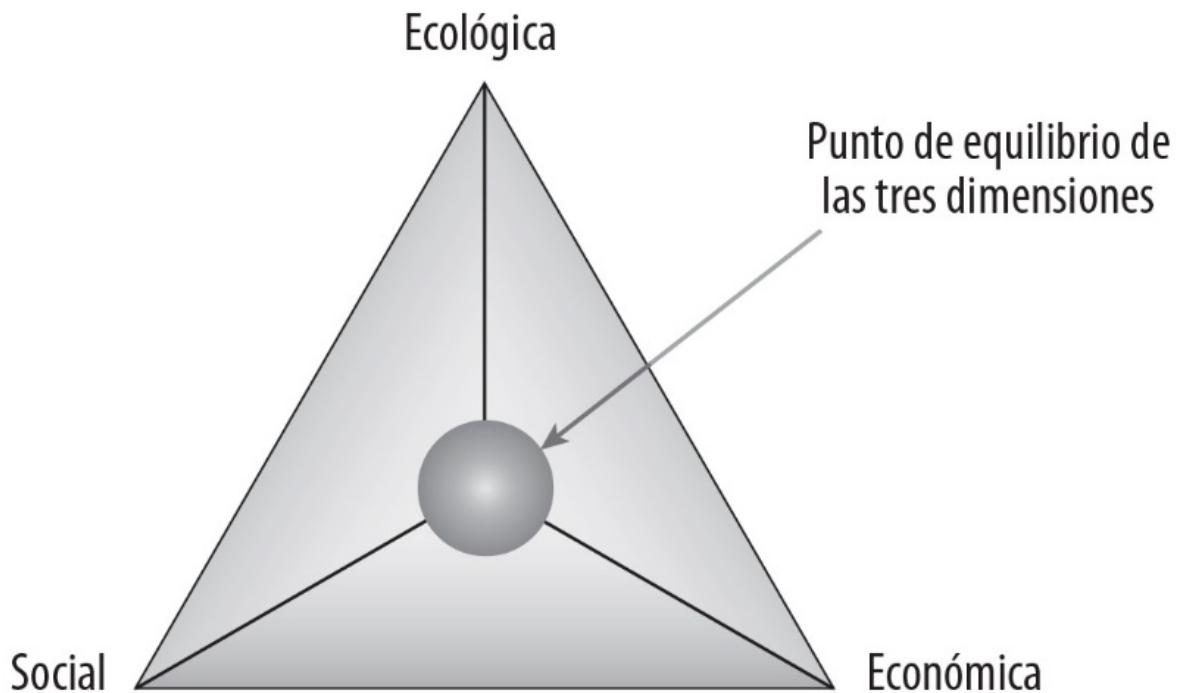


Figura 2-15. Dimensiones del concepto sustentabilidad. Fuente: Díaz Coutiño, R., & Escárcega Castilla, S. (2009). *Desarrollo sustentable: oportunidad para la vida*. McGraw-Hill. Pág. 109

La dimensión económica

La dimensión económica del desarrollo sustentable se centra en mantener el proceso de desarrollo económico por vías óptimas hacia la maximización del bienestar humano, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la disponibilidad del capital natural. En esta perspectiva económica se piensa en los factores como aspectos complementarios, más que como sustitutos. Apelar a la complementariedad se hace en el sentido de un factor limitante. Un factor se vuelve limitante cuando un incremento en el (los) otro(s) factor(es) no incrementa el producto, pero un incremento en el factor en cuestión (el limitante) va incrementar el producto. La naturaleza complementaria del capital natural y el capital hecho por el hombre se ve de manera obvia al preguntar de qué sirve un buen aserradero sin un bosque, o una refinería sin petróleo o un barco pesquero sin peces⁹⁶.

La dimensión social

La dimensión social del desarrollo sustentable consiste en reconocer el derecho a un acceso equitativo a los bienes comunes para todos los seres humanos, en términos intrageneracionales e intergeneracionales, tanto entre géneros como entre culturas. La dimensión social no sólo se refiere a la distribución espacial y de edad de la población, sino que remite, de manera especial, al conjunto de relaciones sociales y económicas que se establecen en cualquier sociedad y que tienen como base

⁹⁶ Díaz Coutiño, R., & Escárcega Castilla, S. (2009). *Desarrollo sustentable: oportunidad para la vida*. McGraw-Hill. Pág. 105-16, 108-109.

la religión, la ética y la propia cultura. Así mismo, esta dimensión tiene como referente obligatorio a la población, y presta especial atención a sus formas de organización y de participación en la toma de decisiones. También se refiere a las interacciones entre la sociedad civil y el sector público.

La dimensión ambiental

Esta dimensión surge del postulado que afirma que el futuro del desarrollo depende de la capacidad que tengan los actores institucionales y los agentes económicos para conocer y manejar, según una perspectiva de largo plazo, su stock de recursos naturales renovables y su medio ambiente. En esta dimensión se presta especial atención a la biodiversidad y, principalmente, a los recursos como el suelo, el agua y la cobertura vegetal, que son los factores que en un plazo menor determinan la capacidad productiva de determinados espacios.

En términos ecológicos, el desarrollo sustentable supone que la economía sea circular, que se produzca un cierre de los ciclos, tratando de imitar a la naturaleza. Es decir, los sistemas productivos son diseñados para utilizar únicamente recursos y energías renovables, para no producir residuos, ya que éstos vuelven a la naturaleza o se convierten en aportación de otro producto manufacturado. Este modelo opera considerando el ciclo vital del producto completo, desde su extracción hasta la disposición final del residuo cuando su vida útil termina. Este intervalo se divide en tres etapas: la primera consiste en aplicar el principio de “quien contamina paga” a la hora de fijar los precios. La segunda es la elección informada del consumidor mediante el etiquetado, y la tercera se refiere al diseño ecológico del producto, para lo cual se aplican las herramientas Inventarios del Ciclo de Vida (ICV) y el Análisis del Ciclo de Vida (ACV)⁹⁷.

2.3.3 Educación ambiental

El Principio 19 de la Declaración de Estocolmo señala que:

Es indispensable una educación en labores ambientales, dirigida tanto a las generaciones jóvenes como a los adultos, y que preste la debida atención al sector de la población menos privilegiada, para ensanchar las bases de una opinión pública bien informada y de una conducta de los individuos, de las empresas y de las colectividades, inspirada en el sentido de su responsabilidad en cuanto a la protección y mejoramiento del medio en toda su dimensión humana. También es esencial que los medios de comunicación de masas eviten contribuir al deterioro del medio humano y difundan, por el contrario, información de carácter educativo sobre la necesidad de protegerlo y mejorarlo, a fin de que el hombre pueda desarrollarse en todos los aspectos⁹⁸.

Este principio dice que la educación es un proceso que involucra a las generaciones de jóvenes y adultos, la opinión pública, los individuos, las empresas y las colectividades en un afán de construir una nueva conciencia y responsabilidad frente a los problemas ambientales. La educación apela a la sensibilización de la sociedad e incorpora el saber ambiental como una cuestión esencial.

La Declaración de Tbilisi expresa los acuerdos de incorporar a la educación ambiental a los sistemas de educación. Subraya que la educación ambiental debe:

Preparar al individuo mediante la comprensión de los principales problemas del mundo contemporáneo, proporcionándole conocimientos técnicos y las cualidades necesarias

⁹⁷ *Ibíd.*, pág. 110

⁹⁸ Naciones Unidas. (1972). DECLARACIÓN DE ESTOCOLMO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE HUMANO. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano.

para desempeñar una función productiva con miras a mejorar la vida y proteger el medio ambiente, prestando la debida atención a los valores éticos. Al adoptar un enfoque global, enraizado en una amplia base interdisciplinaria, la educación ambiental crea de nuevo una perspectiva general dentro de la cual se reconoce la existencia de una profunda interdependencia entre el medio natural y el medio artificial. Esa educación contribuye a poner de manifiesto la continuidad permanente que vincula los actos del presente a las consecuencias del futuro; demuestra, además, la interdependencia entre las comunidades nacionales y la necesaria solidaridad entre todo el género humano⁹⁹.

Lo que es importante recalcar es que la educación ambiental no se debe reducir a una materia más en la escuela, o en los currículos, lo cual significa que no debe quedarse en un ámbito académico, ni en ciertas edades, ya que debe entenderse como un proyecto de ética para todos los ciudadanos, en todos los estratos sociales y económicos, de todas las edades y escolaridades. Para que de esta manera, toda la sociedad pueda incidir en la mejora al medio ambiente y no sólo un cierto sector.

Por último, para tener una mejor idea de este concepto, el Congreso Internacional de Educación y Formación sobre Medio Ambiente, realizado en Moscú en 1987, propuso la siguiente definición:

La educación ambiental es un proceso permanente en el cual los individuos y las comunidades adquieren conciencia de su medio y aprenden los conocimientos, los valores, las destrezas, la experiencia y también la determinación que les capacite para actuar, individual y colectivamente, en la resolución de los problemas ambientales presentes y futuros¹⁰⁰.

⁹⁹ UNESCO. (1977). Conferencia Intergubernamental de Tbilisi sobre Educación ambiental.

¹⁰⁰ UNESCO Congreso internacional UNESCO-PNUMA sobre la educación y formación ambientales [Conferencia] // Elementos para una estrategia internacional de acción en materia de educación y formación ambientales para el decenio de 1990. - 1987.

Capítulo 3: Marco jurídico y normativo

Entre los instrumentos legales que se utilizan para regular el uso de los recursos naturales existe una jerarquía. En México el máximo instrumento legal es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, después le siguen los convenios o tratados internacionales, en seguida las leyes federales, los reglamentos y al final las normas. Esto se ilustra en la pirámide invertida mostrada en la figura 3-1.



Figura 3-1. Nivel jerárquico de los instrumentos legales que regulan el uso de los recursos naturales. Editado de Fuente: CONABIO. (1998). *La diversidad biológica de México: Estudio de país, 1998*. CONABIO. Pág. 238.

3.1 La constitución política de los Estados Unidos Mexicanos

El marco legal del agua en México se fundamenta en La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos por arriba de cualquier otra ley. Refiere en la fracción quinta del Artículo 27 que la propiedad de las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la Nación, menciona los tipos de cuerpos de agua y las condiciones para que las aguas sean consideradas como federales; fuera de estos casos, podrán ser de jurisdicción estatal o privadas.

Castelán (2001), señala que el Marco Legal Hidráulico en México se fundamenta en el Artículo 115 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, la cual faculta a los municipios para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento y deja en manos del nivel federal lo relacionado con la explotación, uso, aprovechamiento distribución y control de las aguas consideradas nacionales.

3.2 Ley de aguas nacionales

La Ley de Aguas Nacionales es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social. Tiene por objeto regular la

explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Las disposiciones de esta Ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que la Ley señala. También son aplicables a las aguas de zonas marinas mexicanas en tanto a la conservación y control de su calidad, sin disminuir la jurisdicción o concesión que las pudiere regir.

3.3 Reglamentos

Entre los reglamentos importantes para el tema se encuentran los siguientes, los cuales en mayor o menor medida contienen reglas referentes al agua:

- Reglamento de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Autorregulación y Auditorías Ambientales
- Reglamento del Código Fiscal de la Federación
- Reglamento de la Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público
- Reglamento de la Ley Agraria en Materia de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
- Reglamento de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización
- Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico
- Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas
- Reglamento de la Ley del Servicio Profesional de Carrera en la Administración Pública Federal
- Reglamento Determinación y Pago de la Cuota de Garantía de no Caducidad
- Reglamento Interior SEMARNAT
- Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias
- Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar
- Reglamento de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente en el Trabajo del Sector Público Federal¹⁰¹

3.4 Normas

Debido a que el tema del agua es muy amplio y tiene muchas vertientes, existen muchas normas aplicables, a continuación se presentan las principales normas relacionadas al sector hídrico y el tema principal de éstas.

¹⁰¹ <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/11273>. Consultada el 14 de julio de 2017.

Dado que el tema principal del presente trabajo son los humedales artificiales y las aguas residuales solamente se expondrán de manera resumida las normas relacionadas, dejando las otras solamente como presentación del tema del cual tratan. Por lo cual la norma NOM-022-SEMARNAT-2003, no se expondrá ya que a pesar de tratar sobre humedales costeros, no contiene información relevante para nuestro caso; ni algunas normas de la CONAGUA ya que versan sobre el alcantarillado y drenaje mas no del tratamiento de las aguas residuales; y excluyendo también las normas mexicanas, las cuales tratan temas de economía y administración de empresas públicas o privadas dedicadas al saneamiento de aguas residuales, el cual no es el principal objetivo de este trabajo.

Tabla 3-1. Normas mexicanas relacionadas al sector agua. Fuente: SEMARNAT, CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. CONAGUA. Pág. 160.

| No. | Grupo: SEMARNAT |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | NOM-001-SEMARNAT-1996 - Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. |
| 2 | NOM-002-SEMARNAT-1996 - Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. |
| 3 | NOM-003-SEMARNAT-1997 - Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. |
| 4 | NOM-004-SEMARNAT-2002 - Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. |
| 5 | NOM-022-SEMARNAT-2003 - Preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. |
| 6 | NOM-060-SEMARNAT-1994 - Especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal. |
| Grupo: CONAGUA | |
| 1 | NOM-001-CONAGUA-2011 - Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba |
| 2 | NOM-003-CONAGUA-1996 - Requisitos para construcción de pozos para prevención de contaminación de acuíferos. |
| 3 | NOM-004-CONAGUA-1996 - Requisitos para la protección de acuíferos durante mantenimiento y rehabilitación de pozos de agua y cierre de pozos en general. |
| 4 | NOM-006-CONAGUA-1997 - Especificaciones y métodos de prueba para fosas sépticas prefabricadas. |
| 5 | NOM-008-CONAGUA-1998 - Especificaciones y métodos de prueba para regaderas. |
| 6 | NOM-009-CONAGUA-2001 - Especificaciones y métodos de prueba para inodoros. |
| 7 | NOM-010-CONAGUA-2000 - Especificaciones y métodos de prueba para válvulas de inodoros. |
| 8 | NOM-011-CONAGUA-2015 - Conservación del recurso agua. Especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. |
| 9 | NOM-014-CONAGUA-2003 - Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. |
| 10 | NOM-015-CONAGUA-2007 - Características y especificaciones de las obras y del agua para infiltración artificial a acuíferos. |
| Grupo: Energía | |
| 1 | NOM-006-ENER-2015 - Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y métodos de prueba. |
| Grupo: SALUD | |
| 1 | NOM-117-SSA1-1994 - Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. |
| 2 | NOM-127-SSA1-1994 - Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. |
| 3 | NOM-179-SSA1-1998 - Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua potable en redes. |
| 4 | NOM-201-SSA1-2002 - Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. |
| 5 | NOM-230-SSA1-2002 - Requisitos sanitarios para manejo del agua en las redes de agua potable. |
| 6 | NOM-244-SSA1-2008 - Equipos y sustancias germicidas para tratamiento doméstico de agua. Requisitos sanitarios |
| Grupo: NORMAS MEXICANAS | |
| 1 | NMX-AA-120-SCFI-2006 - Requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas. |
| 2 | NMX-AA-147-SCFI-2008 - Metodología de evaluación de las tarifas de agua potable, drenaje y saneamiento. |
| 3 | NMX-AA-148-SCFI-2008 - Metodología para evaluar la calidad de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. Directrices para la evaluación y la mejora del servicio a los usuarios. |
| 4 | NMX-AA-149/1-SCFI-2008 - Metodología para evaluar la eficiencia de los prestadores de servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. Directrices para la prestación y evaluación de los servicios de agua residual. |
| 5 | NMX-AA-149/2-SCFI-2008 - Metodología para evaluar la eficiencia de los prestadores de servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. Directrices para la prestación y evaluación de los servicios de agua potable. |

3.4.1 Las NOM y NMX

Según la Secretaría de Economía, las definiciones de ambos términos son:

Norma Oficial Mexicana (NOM): es la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias normalizadoras competentes a través de los Comités Consultivos Nacionales de Normalización, conforme al artículo 40 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN). La cual establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se le refieran a su cumplimiento o aplicación.

Norma Mexicana (NMX): es la regulación técnica que elabore un organismo nacional de normalización, o la Secretaría correspondiente, conforme el artículo 54 de la Ley Federal Sobre Metodología y Normalización, la cual prevé para uso común y repetido reglas, especificaciones, atributos métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje marcado o etiquetado¹⁰². Su aplicación es voluntaria, con excepción de los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas; cuando en una NOM se requiera la observancia de una NMX para fines determinados¹⁰³.

Lo anterior, de forma resumida significa que las NOM se tienen que cumplir por todos aquellos a las que estas puedan aplicar, mientras que las NMX son voluntarias, pero que una vez que algún regulado se compromete a cumplirla debe hacerlo en todo momento conforme a las disposiciones de éstas. Y también se convierten en obligatorias cuando estén contenidas en alguna NOM como parte de los lineamientos de ésta.

3.4.2 Las normas oficiales mexicanas

NOM-001-SEMANARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana establece 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 NOM no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales. Los límites son los siguientes:

- El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.
- 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.
- 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

¹⁰² <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/competitividad-y-normatividad-normalizacion>. Consultada el 15 de julio de 2017.

¹⁰³ <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/catalogo-mexicano-de-normas>. Consultada el 15 de julio de 2017.

agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos por litro para riego no restringido¹⁰⁴.

¹⁰⁴ Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 06-01-1997.

Tabla 3-2. Límites Máximos Permisibles para Contaminantes Básicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 06-01-1997.

| Parámetros | Ríos | | | | | | Embalses Naturales y Artificiales | | | | | | Aguas Costeras | | | | | | Suelo | |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|---------|--------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------------|---------|--------------------|---------|----------------------------------------------|---------|----------------|---------|-----------|---------|-----------------------|---------|---------------------|---------|
| | Uso en riego agrícola | | Uso público urbano | | Protección de vida acuática | | Uso en riego agrícola | | Uso público urbano | | Explotación pesquera navegación y otros usos | | Recreación | | Estuarios | | Uso en riego agrícola | | Humedales naturales | |
| (Miligramos por litro, excepto cuando se especifique) | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. |
| Temperatura (°C) | N.A. | N.A. | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | N.A. | N.A. | P.M. | P.D. |
| Grasas y aceites | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 |
| Materia flotante | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | 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. |

Tabla 3-3. Límites Máximos Permisibles para Metales Pesados y Cianuros en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 06-01-1997.

| Parámetros (*) | Ríos | | | | | | Embalses Naturales y Artificiales | | | | Aguas Costeras | | | | | | Suelo | | |
|----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------|---------------------|----------------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | Uso en riego agrícola | Uso público urbano | Protección de vida acuática | Uso en riego agrícola | Uso público urbano | Explotación pesquera navegación y otros usos | Recreación | Estuarios | Uso en riego agrícola | Humedales naturales | | | | | | | | | |
| Arsénico | 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. | | | |
| | 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 | 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. | | | |
| | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| Cianuro | 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. | | | |
| | 1.0 | 3.0 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 3.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 |
| Cobre | 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. | | | |
| | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 | 6.0 | 4.0 |
| Cromo | 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. | | | |
| | 1.0 | 1.5 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 |
| Mercurio | 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. | | | |
| | 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 | 0.005 | 0.01 | 0.005 | 0.01 | 0.005 |
| Níquel | 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. | | | |
| | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Plomo | 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. | | | |
| | 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 |
| Zinc | 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. | | | |
| | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 |

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

NOM-002-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana 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.

Los límites son los siguientes:

- El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 y 5.5 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.
- El límite máximo permisible de la temperatura es de 40°C. 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 dañe al sistema del mismo.
- La materia flotante debe estar ausente en las descargas de aguas residuales.

Tabla 3-4. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 03/06/1998.

| Límites Máximos Permisibles | | | |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra) | Promedio Mensual | Promedio Diario | Instantáneo |
| Grasas y aceites | 50 | 75 | 100 |
| Sólidos sedimentables (mililitros por litro) | 5 | 75 | 10 |
| Arsénico total | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Cadmio total | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Cianuro total | 1 | 15 | 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 |

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna 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 respaldan¹⁰⁵.

¹⁰⁵ Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 03/06/1998.

NOM-003-SEMARNAT-1997

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen 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 reúso. En el caso de que el servicio al público se realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su reúso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma.

Los límites son los siguientes:

- La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada.
- 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 3-3 del presente documento, en el apartado de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996¹⁰⁶.

Tabla 3-5. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 21-09-1998.

| Límites Máximos Permisibles | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| Tipo de Reúso | 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. | 1000 | ≤ 5 | 15 | 30 | 30 |

NOM-004-SEMARNAT-2002

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos¹⁰⁷.

¹⁰⁶ Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 21-09-1998.

¹⁰⁷ Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 15/08/2003.

Tabla 3-6. Clasificación de lodos en función de su contenido de metales pesados. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 15/08/2003.

| Contaminante (determinados en forma total) | Excelentes (mg/kg) (en base seca) | Buenos (mg/kg) (en base seca) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Arsénico | 41 | 75 |
| Cadmio | 39 | 85 |
| Cromo | 1 200 | 3 000 |
| Cobre | 1 500 | 4 300 |
| Plomo | 300 | 840 |
| Mercurio | 17 | 57 |
| Níquel | 420 | 420 |
| Zinc | 2 800 | 7 500 |

Tabla 3-7. Clasificación de lodos en función de su contenido de patógenos y parásitos. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 15/08/2003.

| Clase | Indicador Bacteriológico de contaminación | Patógenos | Parásitos |
|----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| | Coliformes fecales (NMP/g) (en base seca) | <i>Salmonella spp.</i> (NMP/g) (en base seca) | Huevos de helmintos (huevos/g) (en base seca) |
| A | Menor de 1 000 | Menor de 3 | Menor de 1 (a) |
| B | Menor de 1 000 | Menor de 3 | Menor de 10 |
| C | Menor de 2 000 000 | Menor de 300 | Menor de 35 |

(a) Huevos de helmintos viables
NMP número más probable

Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben cumplir con que:

- Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores
- Sólo pueden ser aprovechables los lodos clasificados como excelentes y buenos, cualquier contenido de metales pesados mayor a los indicados en la tabla 3-6 del presente documento no es aprovechable.
- Sólo pueden ser aprovechables los lodos clasificados como A, B, C; cualquier contenido de patógenos y parásitos mayor a los indicados en la tabla 3-7 del presente documento no es aprovechable.
- El aprovechamiento de los lodos será como sigue, en la tabla 3-8.

Tabla 3-8. Aprovechamiento de Biosólidos. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 15/08/2003.

| Tipo | Clase | Aprovechamiento |
|--------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Excelente | A | <ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase B y C en esta tabla |
| Excelente o Bueno | B | <ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase C en esta tabla |
| Excelente o Bueno | C | <ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramientos de suelos • Usos agrícolas |

Capítulo 4: Los humedales artificiales

4.1 Generalidades

4.1.1 ¿Qué son los humedales artificiales?

Los humedales son porciones de terreno en los que la superficie libre del agua se encuentra cerca o justo en la superficie del terreno. Estas porciones de terreno se encuentran húmedas durante todo el año o una parte de éste, esto gracias a su posición geográfica. Históricamente los humedales han sido llamados pantanos, marismas, turberas, ciénagas, marjales o cenagales; los cuales dependen de la existencia y condiciones de las plantas y el agua, además de características geográficas adecuadas. Los humedales son frecuentemente zonas de transición entre las tierras altas y áreas inundadas con gran profundidad, se localizan en áreas topográficamente bajas, con pendientes pronunciadas o con suelos de baja permeabilidad. En cualquiera de los casos la característica en común entre ellos es que, por las condiciones de humedad, es decir, suelos saturados; las plantas que habitan en ellos son aquellas que pueden crecer en dichas condiciones¹⁰⁸.

Los humedales tienen propiedades que los hacen únicos de entre todos los grupos de ecosistemas en la Tierra. Una gran cantidad de agua es importante para la mayoría de las formas de productividad biológica, y las plantas que crecen en los humedales se han adaptado para aprovechar la abundancia de agua, pero también ha generado mecanismos para superar las temporadas de escases de otros elementos esenciales como lo es el oxígeno.

Por otra parte, los humedales artificiales comenzaron a utilizarse gracias a que los humedales naturales tienen un alto nivel de productividad biológica, pues éstos pueden transformar muchos de los contaminantes más comunes contenidos en las aguas residuales convencionales en nutrientes que pueden ser usados en el propio ecosistema o en productos secundarios no peligrosos. Estas transformaciones pueden realizarse gracias a la energía que proviene directamente de la naturaleza: el sol, el viento, el suelo, las plantas y los animales. Es por eso que el tratamiento por humedales puede conseguirse a un costo relativamente bajo en movimiento de tierras, conductos, bombeo, y pocas estructuras¹⁰⁹.

Los humedales artificiales son sistemas ingenieriles diseñados de tal manera que se aprovechan los procesos (físicos, químicos y biológicos) que se dan en los humedales naturales, pero bajo condiciones controladas. Un claro ejemplo de esta diferencia de condiciones es el caudal, que en los humedales artificiales para tratamiento de agua es relativamente estable, proviniendo en su mayoría del agua descargada en el sistema de alcantarillado, mientras que en los humedales naturales éste es totalmente variable ya que la fuente es el escurrimiento natural y la precipitación¹¹⁰. En la literatura acerca de estos sistemas muchas veces se ve la discusión de si los humedales tienen plantas o no. Robert Kadlec y Scott Wallace afirman que los humedales sin plantas no serían más que filtros de suelo, arena o grava, o incluso simplemente lagunas¹¹¹.

¹⁰⁸ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 1; Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 3.

¹⁰⁹ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. pág. 4.

¹¹⁰ Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters US EPA pag 23.

¹¹¹ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Sección xxi.

4.1.2 Clasificación de los humedales artificiales

Habiendo visto ya lo que son los humedales naturales y artificiales, el siguiente paso es clasificarlos. En este caso pueden llegar a destacarse tres tipos de humedales artificiales de acuerdo a la función que desempeñan o la intención con la que fueron construidos:

1. Humedales artificiales para la creación de hábitats: Como su nombre lo indica el objetivo principal de este tipo de humedales artificiales es el de crear nuevos hábitats para distintas especies de flora y fauna. Las cuáles serán atraídos por el área verde.
2. Humedales artificiales para control de inundaciones: La función principal de este tipo de humedales artificiales es la de regular la escorrentía durante lluvias extraordinarias que causen o puedan causar inundaciones. Su uso incrementa la infiltración de agua al subsuelo, aumenta el volumen de almacenamiento de agua de lluvia, y reduce el gasto que llega al alcantarillado y a las plantas de tratamiento¹¹².
3. Humedales artificiales para el tratamiento de agua residual: El propósito de estos humedales es el de dar tratamiento al agua utilizando los procesos naturales de este ecosistema. Este tipo de humedales puede dividirse en más categorías dependiendo de las características del sistema como los patrones de flujo, el medio utilizado como sustrato, la vegetación o el patrón de capas¹¹³.

Es importante decir que en algunos casos los humedales artificiales pueden llegar a pertenecer a tener más de una función. Por ejemplo, se pueden construir humedales para el tratamiento de agua que sirvan como hábitats para ciertas especies, o un humedal para control de inundaciones y como hábitat.

Tipos de humedales artificiales para el tratamiento de agua residual

Los humedales artificiales para el tratamiento de agua residual pueden dividirse en dos grandes categorías de acuerdo a su patrón de flujo:

1. Humedales de flujo subsuperficial
2. Humedales artificiales de flujo de superficie libre

La característica diferencial de los humedales artificiales de flujo subsuperficial es que el agua fluye por debajo de la superficie libre del sustrato permitiendo una mayor superficie de contacto entre el sustrato, existiendo así una mayor carga orgánica¹¹⁴. Esta categoría se divide en dos categorías menores: Los de flujo horizontal, en los cuales el flujo se recorre el humedal de forma horizontal de la entrada a la salida; y los de flujo vertical, en los cuales el agua se filtra en la zona de raíces de las plantas, lo cual significa que entre la salida y la entrada del agua hay una diferencia de cotas considerable¹¹⁵.

¹¹² Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 17.

¹¹³ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 5; Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 17-18.

¹¹⁴ Tousignant, E., Fankhauser, O., & Hurd, S. (1999). Guidance Manual for the Design, Construction and Operations of Constructed Wetlands for Rural Applications in Ontario. Stantec Consulting Ltd R&TT, Alfred College (University of Guelph), South Nation Conservation. Pág. 3

¹¹⁵ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 5.

Los humedales artificiales de flujo a superficie libre se caracterizan porque el agua fluye por encima del sustrato, es decir el agua está expuesta a la atmósfera.

Ambos tipos de humedales se pueden sub-clasificar por el tipo de vegetación con la cuentan, siendo éstas: plantas emergentes, plantas sumergidas, plantas flotantes y plantas de hojas flotantes¹¹⁶ (las características de estos tipos de plantas se discutirán más adelante en el siguiente apartado de componentes de los humedales artificiales).

En la figura 4-1 se muestra un esquema con la clasificación de los humedales para mayor claridad.

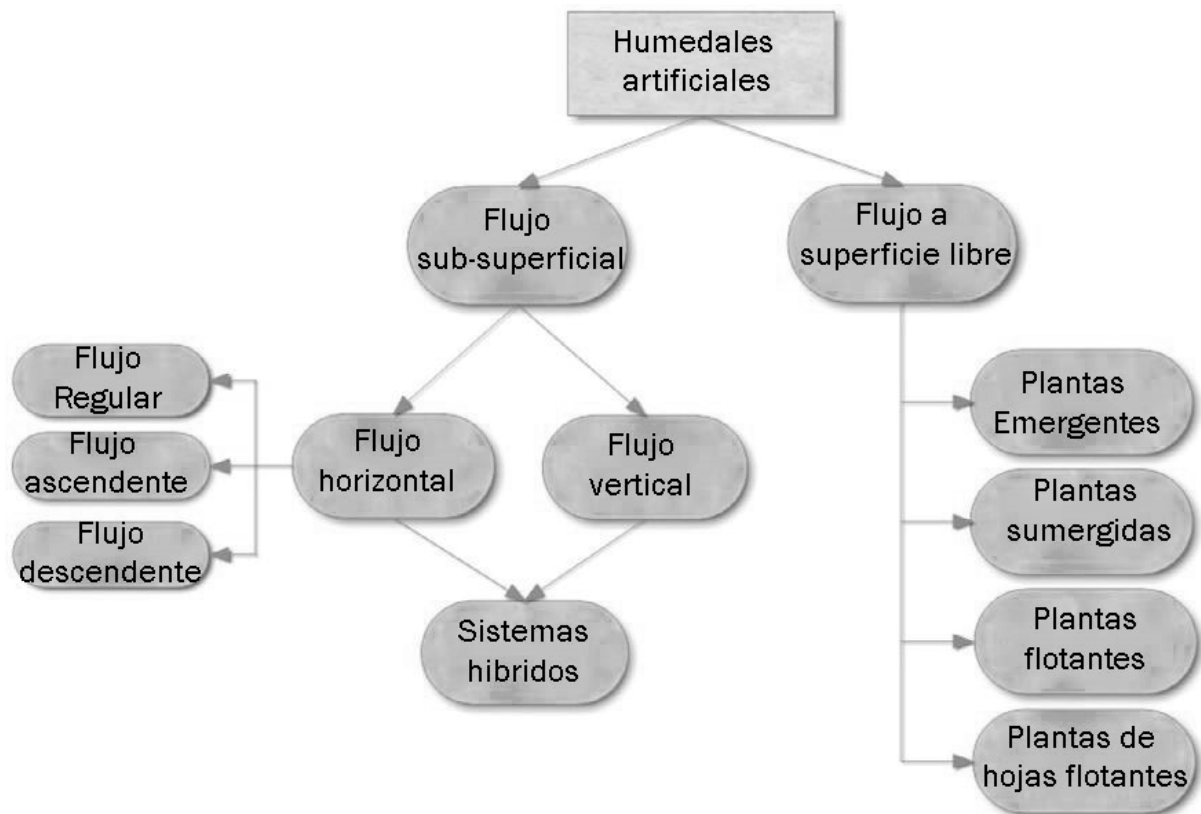


Figura 4-1. Clasificación de los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales. Editado de fuente: Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 18.

Humedales de flujo a superficie libre

En este tipo de humedales, el agua es tratada conforme pasa por el sistema gracias a los procesos de sedimentación, oxidación, reducción, filtración, adsorción, y precipitación. Y dado que contienen áreas de agua expuesta a la atmósfera, vegetación (generalmente vegetación emergente y flotante), y que además se asemejan de manera muy cercana al ecosistema natural, es muy común que atraigan vida silvestre como peces, anfibios, insectos (especialmente mosquitos), moluscos, reptiles, aves y mamíferos. La configuración más común de este tipo de humedales se muestra en la figura 4-2.

¹¹⁶ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 1.; Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 18.

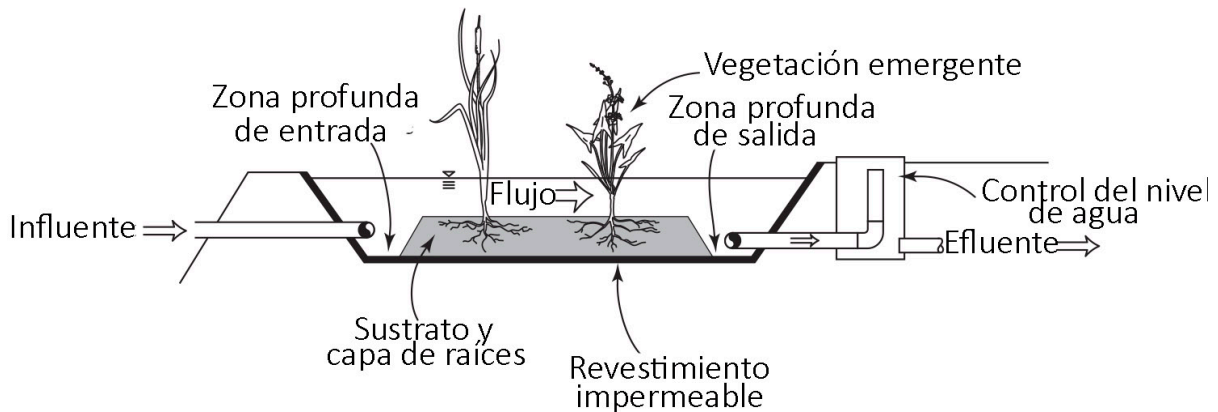


Figura 4-2. Configuración de un humedal de flujo a superficie libre. Editado de fuente: Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 5.

Este tipo de humedales es compatible con todo tipo de climas. Sin embargo, climas demasiado fríos podrían causar la formación de hielo en la superficie del agua, lo cual podría ocasionar interferencias en el flujo o disminución de la eficiencia en los procesos de conversión del nitrógeno. También podrían impedir o dificultar la transferencia de oxígeno de la atmósfera al agua, afectando así los procesos que dependen del oxígeno. Y aunque el proceso de remoción de los sólidos suspendidos es mejor en invierno, la mayor eficiencia en términos generales se obtiene al tratar el agua en épocas más cálidas. La figura 4-3 muestra un esquema del sistema típico para estos humedales.

En adelante se hará referencia a este tipo de humedales con las siglas FWS (por sus iniciales en inglés Free Water Surface, que es como comúnmente se conocen).

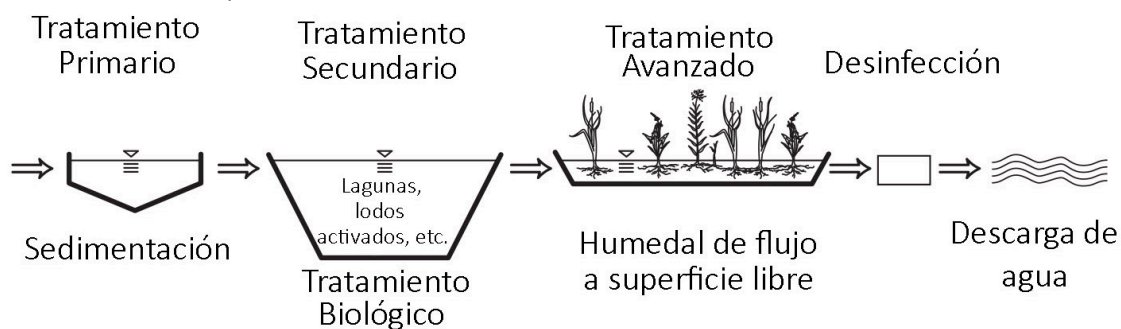


Figura 4-3. Arreglo de sistema más común en humedales de flujo a superficie libre. Editado de fuente: Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 6.

Humedales de flujo subsuperficial

En los humedales de flujo subsuperficial el agua fluye a través del sustrato, y no por el encima de él como en los de flujo a superficie libre. Es decir, en el flujo subsuperficial el caudal no tiene contacto directo con la atmósfera mientras pasa a través del material filtro. En adelante se hará referencia a este tipo de humedales con las siglas SSF (por sus iniciales en inglés | Sub-Surface Flow, que es como comúnmente se conoce).

Humedales de flujo horizontal

En los humedales de flujo subsuperficial horizontal, el agua fluye por debajo de la superficie libre del sustrato por lo que el agua pasa alrededor de las raíces y los rizomas de las plantas, la cual es la principal diferencia con los humedales de flujo a superficie libre. Sin embargo, hay más diferencias: como el hecho de que hay un menor riesgo de que patógenos entren en contacto con los humanos o la vida silvestre; tampoco permite la cría de mosquitos; y el sistema es capaz de operar bajo

condiciones climáticas de frío intenso. Por otro lado, este tipo de sistemas no provee de beneficios secundarios (como el poder albergar vida silvestre con gran similitud a un hábitat natural); trabajan con flujos menores a los que pueden trabajar los humedales FWS; y aunque el costo de mantenimiento es siempre menor al de otras alternativas de tratamiento, el de los humedales FWS es mucho menor al de los humedales de flujo subsuperficial horizontal¹¹⁷. La figura 4-4 muestra la configuración básica de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para climas cálidos.

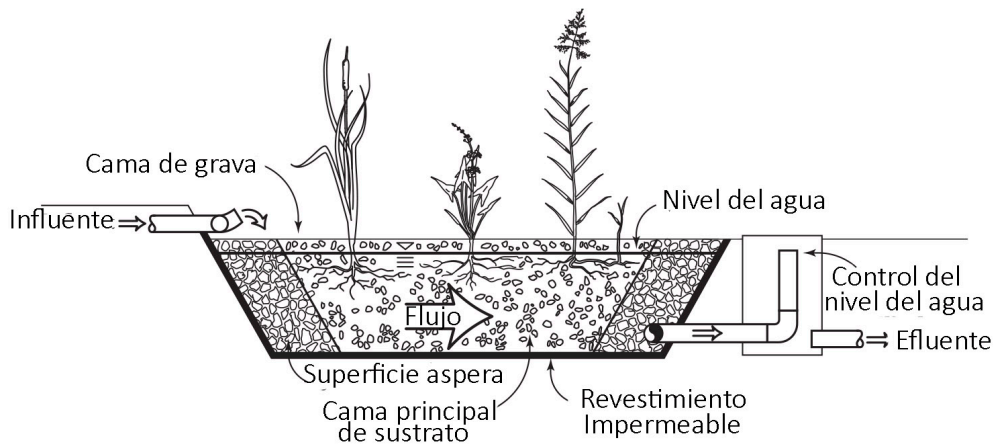


Figura 4-4. Configuración de un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Editado de fuente: Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 6.

La aplicación más común de los humedales de flujo horizontal es recibir el efluente del tratamiento primario, para después descargarla en un cuerpo de agua o dispersarla en el suelo. La figura número 4-5 muestra un arreglo de humedal horizontal con dispersión en el suelo.

En adelante se hará referencia a este tipo de humedales con las siglas HSF (por sus iniciales en inglés Horizontal Sub-Surface Flow, que es como comúnmente se conoce).

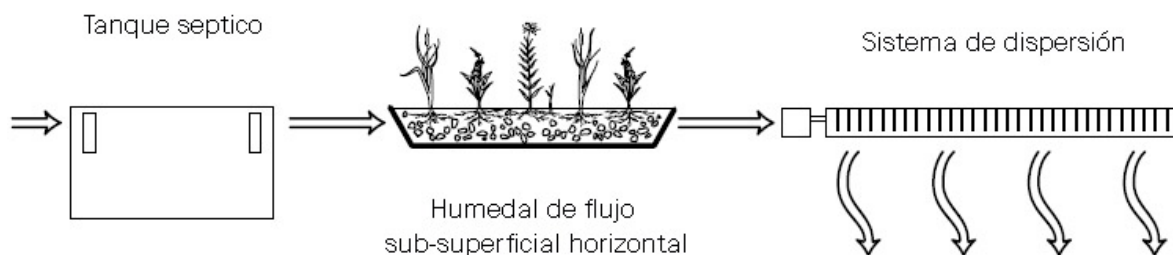


Figura 4-5. Arreglo de sistema más común en humedales de flujo subsuperficial horizontal. Editado de fuente: Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 7.

Humedales de flujo Vertical

En este tipo de humedal hay dos grandes diferencias en relación a los otros humedales: la más obvia es que el flujo tiene una dirección vertical, y la segunda es que el flujo no es continuo sino más bien se suministra el agua por lapsos de tiempo, lo que permite que el medio no esté siempre saturado y el oxígeno pueda ser transferido de la atmósfera¹¹⁸.

¹¹⁷ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 5-6.

¹¹⁸ Tousignant, E., Fankhauser, O., & Hurd, S. (1999). *Guidance Manual for the Design, Construction and Operations of Constructed Wetlands for Rural Applications in Ontario*. Stantec Consulting Ltd R&TT, Alfred College (University of Guelph), South Nation Conservation. Pág. 4.

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal tienen problemas para oxidar amoníaco, por lo que los humedales de flujo vertical surgieron en Europa como una respuesta a estas deficiencias. Los humedales de flujo vertical tienen mayores niveles de transferencia de oxígeno, que en consecuencia produce un efluente nitrificado. Por esta capacidad de oxidar amoníaco es que estos humedales son usados para tratar más agua que proviene de lixiviados de rellenos sanitarios o de la industria de procesamiento de alimentos¹¹⁹.

Existen tres principales variaciones de humedales de flujo vertical: de flujo ascendente, de flujo descendente y de flujo de regular.

En los humedales de flujo ascendente la entrada del agua residual es en el fondo del filtro de la cama y se suministra a través de una red de tubería adecuada que permite que el agua tenga mayor tiempo de contacto con el filtro, lo que aumenta la eficiencia de tratamiento. El agua se colecta en la superficie del sustrato en unos centímetros abajo¹²⁰. La figura 4-6 muestra dicho arreglo.

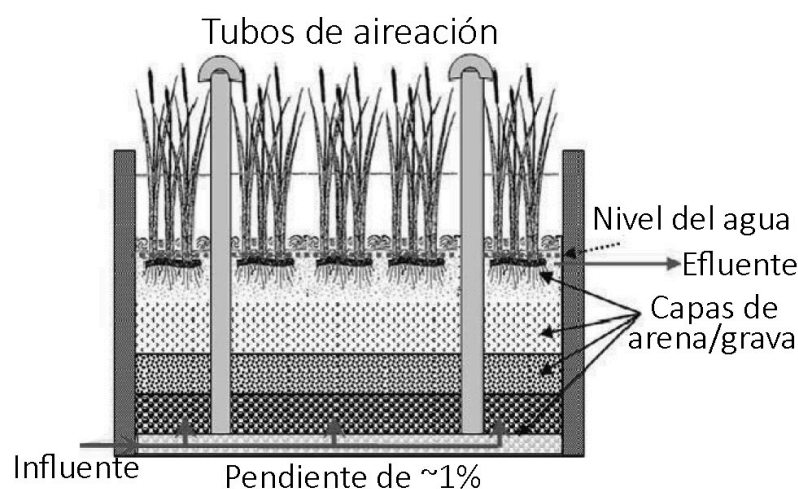


Figura 4-6. Configuración usual de los humedales verticales de flujo ascendente. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 31.

En los humedales de flujo descendente, como su nombre lo dice, la dirección de flujo es de una cota superior a una inferior por medio del suministro intermitente, creando una pequeña laguna temporal de 3-5 cm de altura, para que después el agua descienda y sea tenga contacto con el medio filtro¹²¹. Una variación es la de saturar completamente el sustrato con un suministro constante de agua, lo cual bloquearía el suministro de oxígeno creando condiciones anaeróbicas en el fondo de la cama del medio filtro, lo cual a su vez produce condiciones químicas apropiadas para que el sulfuro inmovilice metales pesados¹²².

La última variación son los humedales de flujo regular, en los cuales también por periodos de tiempo se suministra el agua, pero en este caso se crea una condición de saturación por cierto tiempo, para después dejar que el mismo sistema por gravedad comience a drenar el agua al fondo del filtro donde

¹¹⁹ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 7.

¹²⁰ Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 31.

¹²¹ *Ibid.* pág. 27.

¹²² Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 7.

está la salida para el efluente. En el momento en el que el filtro se encuentra completamente en una condición insaturada se reinicia el ciclo (saturar, esperar a que se desature, y volver a saturar)¹²³.

La figura 4-7 muestra el arreglo para los humedales verticales de flujo descendente y de flujo regular.

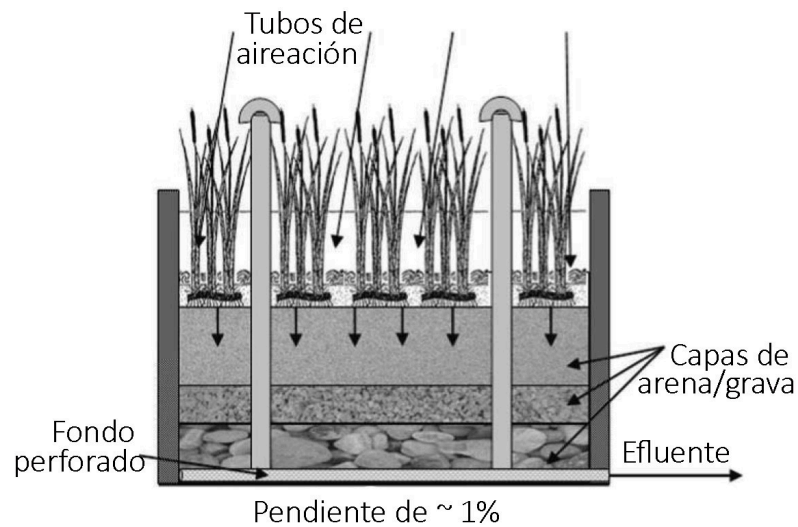


Figura 4-7. Configuración usual de los humedales verticales de flujo descendente. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 22.

En adelante se hará referencia a este tipo de humedales con las siglas VF (por sus iniciales en inglés Vertical Flow, que es como comúnmente se conocen).

Humedales híbridos o combinados

Los humedales híbridos son una combinación de humedales, que generalmente son HSF y VF. El objetivo es mejorar la eficiencia de tratamiento, y el concepto general es combinar las ventajas de uno para contrarrestar las desventajas del otro. La figura 30 muestra distintas combinaciones que se pueden lograr. Aunque la mayoría de estas se encuentran en investigación.

La primera combinación (A) incluye un humedal VF al inicio para remover materia orgánica y sólidos suspendidos, también para proveer de buenas condiciones oxidantes para el nitrógeno amoniacal. La siguiente etapa es un humedal HSF, en el cual las formas oxidadas de nitrógeno son transformadas a través de la nitrificación, mientras que sigue removiéndose materia orgánica y sólidos suspendidos.

De acuerdo al modelo de Seidel las primeras dos etapas son varios humedales VF en paralelo, seguidos en la tercera etapa de dos o tres unidades de humedales HSF.

En la segunda combinación (B) el humedal HSF está al inicio para remover materia orgánica, sólidos suspendidos y para que la nitrificación ocurra. Después le sigue un humedal VF para remover aún más materia orgánica y sólidos suspendidos. Dado que la concentración de nitratos ha aumentado gracias a la oxidación del nitrógeno amoniacal, el efluente de esta etapa tiene que ser recirculado al humedal HSF o a la etapa de pretratamiento (tanque de sedimentación) para obtener una alta remoción de nitrógeno total.

¹²³ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 29.

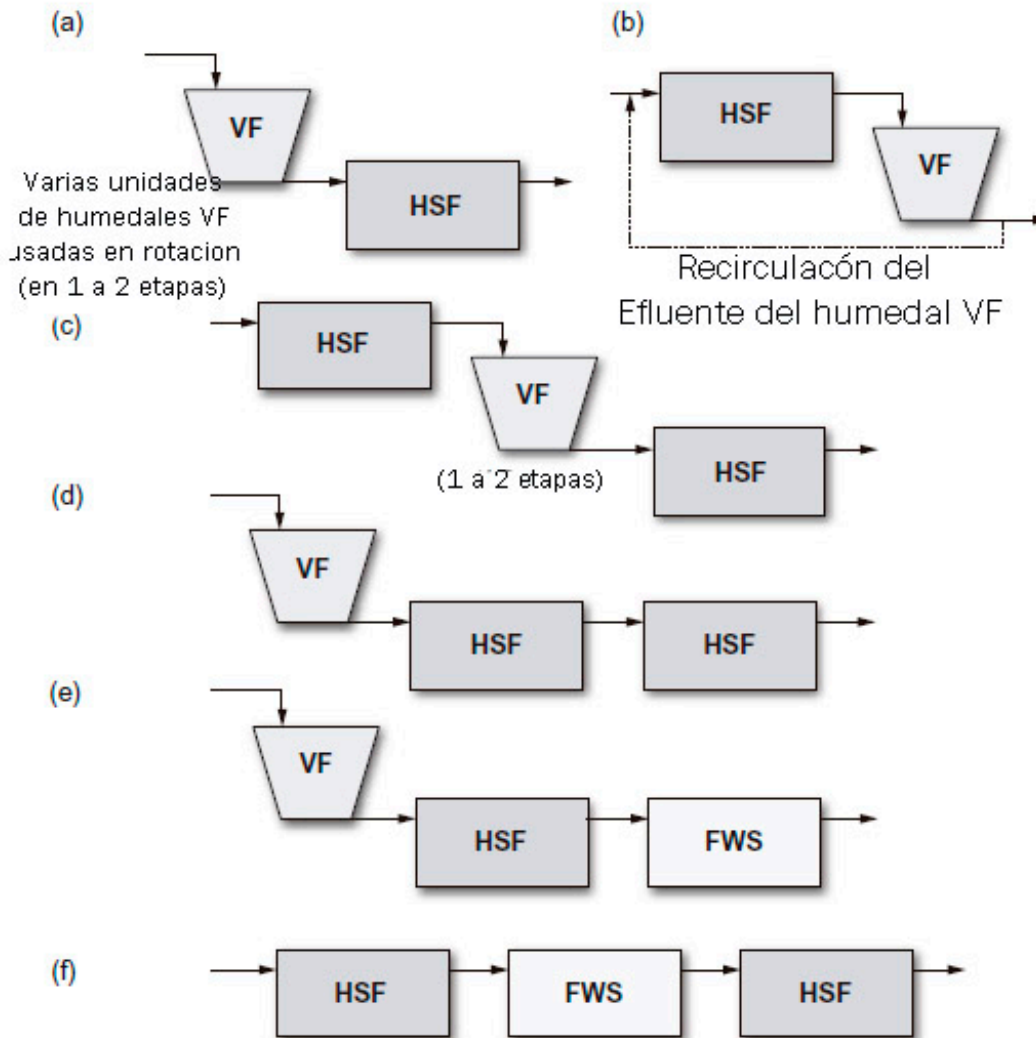


Figura 4-8. Diferentes combinaciones para sistemas de humedales artificiales híbridos o combinados. Fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 23.

Humedales de sistemas flotantes

La característica principal de estos sistemas son los elementos flotantes, hechos de plástico (que ayuda a resistir las condiciones ambientales e hidráulicas) y que flotan sobre la superficie libre del agua. La vegetación plantada en los elementos son generalmente plantas macrófitas emergentes, éstas desarrollan un sistema de raíces complejo y muy extenso. Estos sistemas combinan las características de los humedales y las lagunas, y por lo tanto usan los mecanismos ya mencionados anteriormente para dar tratamiento al agua. Estos sistemas aún se encuentran en una fase de investigación temprana por lo cual se tiene poca información de su rendimiento¹²⁴. La figura 4-9 nos muestra la estructura de los humedales de sistemas flotantes.

¹²⁴ *Ibíd.* pág. 22-25.

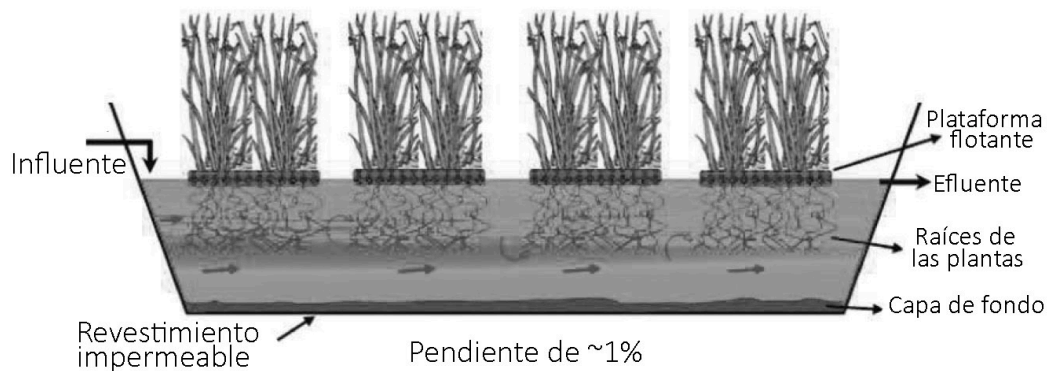


Figura 4-9. Esquema de los humedales de sistemas flotantes. Modificado de Fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 24.

4.1.3 Componentes de los humedales artificiales

Los componentes principales para el buen funcionamiento de un humedal artificial incluyen el agua residual, plantas, el sustrato, bacterias, protozoos, animales, y los desechos de todos los elementos ya mencionados. Estos, a su vez, están influenciados por la temperatura, el pH, la profundidad del agua, el oxígeno disuelto y el potencial de óxido-reducción¹²⁵.

Vegetación

Las plantas y el sustrato son los elementos más importantes en los sistemas de humedales como tratamiento de agua residual, y es por ello que se les debe poner especial atención. Es más, el uso de las plantas es lo que le vale a los humedales ser llamados “una tecnología verde”.

Las plantas que se utilizan en los humedales artificiales son las que se encuentran habitualmente en los humedales (ecosistemas) naturales; estas son, plantas macrófitas¹²⁶. Es importante mencionar que se deben preferir siempre las plantas endémicas del lugar en donde se instalará el humedal, por los riesgos ecológicos que podría suponer introducir especies exóticas al territorio. Y no solo eso, también existe el riesgo de que dichas especies no se adapten a las condiciones físicas y climatológicas.

Dicho lo anterior, las especies elegidas deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Deben estar adaptadas a las condiciones ecológicas locales. De esta forma se asegura que no exista la posibilidad de desarrollar enfermedades en la flora local y los ecosistemas adyacentes.
- Deben tener la capacidad de adaptarse o resistir las condiciones climáticas locales, y el posible surgimiento de plagas, insectos o enfermedades.
- Deben poder ajustarse fácilmente al ambiente de un humedal artificial, y presentar un crecimiento y esparcimiento rápido.
- Deben estar disponibles en la localidad para su rápido plantado.

¹²⁵ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 245.

¹²⁶ Plantas que pueden vivir en terrenos inundados o encharcados durante toda su vida o durante largos períodos de tiempo.

En los humedales SSF, las plantas usadas son emergentes, mientras que en los de flujo a superficie libre se puede usar cualquiera de los tipos. En América las plantas más utilizadas son el carrizo común, las totoras, y la *Typha Latifolia*.

Clasificaciones de las plantas de humedales

- Plantas emergentes. El sistema de raíces y los brotes de estas plantas se desarrollan por debajo de la superficie del sustrato, mientras que su tallo y hojas lo hacen por arriba de éste. Este tipo de plantas crecen en el suelo o sustratos porosos, es en estos últimos y el agua de donde obtienen su alimento. Y comparadas con otros tipos de plantas son muy competitivas. Entre las especies más comunes se encuentran la familia de las monocotiledóneas. Ejemplos de esta familia son: las phragmites (como el carrizo), las tifáceas (como las totoras), las juncáceas (como los juncales), las ciperáceas (como el junco de laguna), las glycerias (como las esteba), las iridáceas (como el lirio amarillo), las zizaniacáceas (conocidas como arroz salvaje) y las Cyperaceae (como el carex o el cyperus).
- Plantas sumergidas. Estas plantas pueden tener raíces plantadas en el sustrato, las cuales obtienen su alimento primeramente del sustrato y después del agua; aunque estas plantas también pueden no tener raíces y flotar en la superficie del agua. Se considera que esta categoría de plantas tiene una gran sensibilidad a las condiciones anaerobias, que el día tiene un gran efecto sobre ellas, y además que pueden ser afectadas en su rendimiento por las algas. Esta categoría incluye las familias de: las plantagináceas (como el Callitriche), las ceratofiláceas (como el milhojas de agua, bejuquillo o cola de zorro), las haloragaceae (como el *Myriophyllum spicatum*), las potamogetonáceas (como el potamogeton o espiga de agua), las lentibulariaceae (como las utrículas), y las hidrocaritáceas (como el *limnobium laevigatum*).
- Plantas de hojas flotantes. Esta categoría de plantas tiene su sistema de raíces plantado en el sustrato, el cual se conecta a las hojas a través de los tallos y los pecíolos. Esta planta puede llegar a acaparar la luz de sol y ensombrecer el fondo; de esta forma podría prevalecer sobre las especies de plantas sumergidas. Esta categoría incluye plantas de distintos géneros como: las nymphaea, las nuphars (como los nenúfares), las nelumbo (como el loto de agua), y la *Hydrocotyle vulgaris*.
- Plantas flotantes. En esta categoría no hay mucho que agregar, las plantas flotan sobre la superficie y no tienen contacto alguno con el sustrato. Esta categoría incluye: la *Eichhornia crassipes* (conocido como Jacinto de agua), la *Pistia stratiotes* (conocida como lechuga de agua), y las lemnas y spiroidelas (mejor conocidas como lentejas de agua)¹²⁷.

Sustrato

El sustrato como ya se dijo es de los elementos más importantes a seleccionar en el diseño de los humedales. Una buena elección del sustrato puede evitar problemas de congestionamiento o de baja eficiencia de tratamiento. Este tema es de especial atención en los humedales SSF ya que por la naturaleza del flujo, estos juegan un papel mucho más importante que el de solo ayudar a la vegetación a desarrollarse.

Anteriormente el suelo se utilizaba como sustrato o filtro, lo cual de inicio creó muchos problemas de congestionamiento¹²⁸. Después de mucha investigación se determinó que el suelo no era muy eficiente como filtro, en cambio era bueno cuando se trataba de remoción de fósforo, esto, por su

¹²⁷ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrantzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 39-41.

¹²⁸ *Ibid.*, pág. 52.

contenido de arcillas¹²⁹. Hoy la mayoría de camas de material son de grava de diferentes tipos y orígenes, con una capa superior de arena.

Valores comunes para tamaños eficaces (d_{50}) para el sustrato en la literatura son: arena 0.2 - 0.6 mm, grava fina 6 - 16 mm, grava mediana 24 - 32 mm, y grava gruesa 60 - 130 mm. Por otro lado, los materiales ya probados pueden clasificarse como sigue:

- Materiales naturales: Suelo, rocas, y sedimentos del fondo marino.
- Materiales sintéticos: Producidos en laboratorios, o son una mezcla de materiales naturales.
- Productos secundarios industriales: Estos productos generalmente son residuos del proceso de las industrias¹³⁰.

La tabla 4-1 muestra los materiales que se han llegado a utilizar en distintos humedales alrededor del mundo.

¹²⁹ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 251.

¹³⁰ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrantzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 52-55.

Tabla 4-1. Materiales filtro usados en humedales artificiales. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 54.

| Materiales naturales | |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Gravas de origen ígneo | Grava de carbonato |
| Dolomita | Zeolita natural |
| Bauxita | Calizas (rocas sedimentarias) |
| Opoka (sedimento marino) | Rodolitos (sedimentos marinos) |
| Laterita | Wollastonita |
| Apatita (sedimentaria) | Apatita (roca ígnea) |
| Alunita calcinada | Marga |
| Concha de ostra | Spodosoles |
| Turbera | Polonita |
| Arenas | Polvo de conchas |
| Mármol triturado | Hornblenda |
| Bentonita | Arcillas |
| Pizarra | Suelos |
| Materiales sintéticos | |
| Zeolitas sintéticas | Filtralite® |
| LECA (Agregado ligero de arcilla expandido) | Filtralite-P |
| LWA (Agregados ligeros) | Calcita |
| vermiculita | Arena para gatos (tierra de diatomeas incinerada) |
| Carbón activado | LESA (Agregados ligeros de esquisto expandido) |
| Productos secundarios industriales | |
| Escoria (de la industria del acero) | Escorias de alto horno |
| Cenizas volantes | Ceniza de carbón |
| Mineral ferruginoso | Pizarra bituminosa incinerada |
| Arena Cuarzosa | Ocre |
| Carbón vegetal | Lodo de alumbre deshidratado |

Las capas comunes para los distintos tipos de humedales son:

- Para los humedales FWS. Un revestimiento impermeable que evite que la infiltración afecte los acuíferos, y una capa de hasta 40 cm de suelo de grosor, donde las macrófitas pueden estar plantadas (generalmente son plantas emergentes, pero también puede usarse las plantas sumergidas o flotantes).
- Para los humedales HSF. Un revestimiento impermeable, seguido por un grosor de sustrato de 30 hasta 80 cm, que se compone de grava o una mezcla de grava y arena.
- Para los humedales VF. Un revestimiento impermeable, seguido por una cama del sustrato que varía de 0.45 a 1.2 m ¹³¹.

¹³¹ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 19-21.

Fauna y microorganismos

Una gran cantidad de organismos que se encuentran en los humedales artificiales pueden ser benéficos para éste, desde bacterias o protozoos hasta animales de gran tamaño. En el caso de las plantas emergentes, un elemento importante en el tratamiento de la materia orgánica, la biomasa bacteriana se puede encontrar en la parte sumergida de éstas o directamente en el sustrato¹³². A pesar de que todos los tipos de humedales albergan una gran cantidad de especies animales, son los humedales de flujo a superficie libre los que tienen una mayor variedad.

Por tanto, dichas especies son una consideración importante para el correcto diseño y operación de un humedal artificial. Además, aunque no representan una gran cantidad de biomasa (contrario a la vegetación que sí lo hace), dicha fauna puede modificar los flujos de energía y de masa del sistema. Un ejemplo claro son las plagas de insectos que deshojan a las plantas, interrumpiendo así los ciclos minerales y afectando el tratamiento de la materia orgánica. Otro ejemplo son los peces que se alimentan en el fondo ya que pueden re suspender los sólidos o arrancar las plantas¹³³.

La tabla 4-2 muestra los organismos más comunes, y sus funciones o afectaciones.

¹³² Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 251-252.

¹³³ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 16.

Tabla 4-2. Características de los animales encontrados en los humedales artificiales. Modificado de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 16.

| Grupo animal | Miembros del grupo encontrados en los humedales artificiales. | Función o importancia en el proceso de tratamiento. | Consideraciones de diseño y operación. |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Invertebrados, incluyendo protozoos, insectos, arañas y crustáceos. | Una gran diversidad puede presentarse, pero esto dependiendo de la estación. | Aunque juegan un rol importante en los ciclos químicos y biológicos, las funciones exactas aún están por determinarse. | Se debe de considerar el control de la población de mosquitos. El monocultivo es muy susceptible a la destrucción por plagas de insectos. |
| Peces | Especies adaptadas a vivir en o cerca de la superficie del agua (mosquitos, charales, pececillos de lodo). Especies adaptadas a vivir en agua residual (Carpas, peces gato, Amia Calva, o el Aphanis Iberus) | Consumidores insectos o de material de desecho (como la hojarasca o larva de mosquito) | Condiciones anaeróbicas limitan las poblaciones. Se requieren zonas de anidación. Peces que se alimentan en el fondo pueden arrancar las plantas o re suspender los sedimentos. |
| Anfibios reptiles. | Y Ranas, Caimanes, serpientes, Y tortugas. | Consumidores de organismos más pequeños. | Las tortugas tienen una extraña habilidad de entrar a las estructuras de control de flujo y de quedar atrapadas en la tubería; por lo tanto, se requieren dispositivos de exclusión de tortugas. Se requiere monitoreo de las estructuras de control y diques, para evitar daño y obstrucción. |
| Aves | Puede llegar a haber 63 especies, tales como aves de bosque, praderas, anátidas. Igualmente varían de acuerdo a la estación. | Consumidores de organismos más pequeños. | Aves anátidas, especialmente migratorias, pueden contribuir a la carga de contaminantes por temporadas. |
| Mamíferos | Pequeños roedores (musarañas, ratones, topillos). Roedores grandes (conejos, nutria, rata almizclera o castores). Herbívoros (Ciervos, venados). Grandes carnívoros (Zorros, mapaches, zarigüeyas, comadrejas). | Consumidores de plantas o de organismos más pequeños. | Las nutrias y las comadrejas pueden llegar a remover vegetación o destruir los diques; por lo tanto se requiere un control y/o remoción de estas especies. |

4.1.4 Mecanismos de remoción

Los humedales artificiales tienen una eficiencia comprobada al remover distintos contaminantes del agua como son la materia orgánica (medido indirectamente a través de BOD₅ y la COD), sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, metales pesados, microorganismos patógenos y microcontaminantes orgánicos. Los procesos por los cuales se puede llevar a cabo la remoción de estos contaminantes son físicos, químicos o biológicos; además de que, estos procesos pueden llevarse de al mismo tiempo o de forma secuenciada. Dichos procesos dependen de la interacción de tres factores: los componentes del humedal (el material de sustrato, la vegetación, los microorganismos, y los desechos de los anteriores), las características del humedal (medidas, tipos de plantas, tipo y altura del o los sustratos, etc.), y la calidad y cantidad del influente¹³⁴.

Hay dos grandes categorías de remoción de contaminantes. La primera de ellas es la separación de sólidos y líquidos, lo cual puede ser mediante: filtración, absorción, adsorción, intercambio de iones, o lixiviación. La segunda de las grandes categorías es la transformación, la cual puede ser química (como las reacciones de óxido-reducción, floculación, reacciones ácido-base o precipitación química), o bioquímica (a través de reacciones bajo condiciones aerobias, anóxicas, o anaerobias). Todos los mecanismos pueden resultar en la remoción de los contaminantes, aunque en la mayoría de los casos resultan en la retención de dichos contaminantes en el humedal.

La tabla 4-3 muestra los principales contaminantes y los mecanismos por los cuales son removidos del agua.

Tabla 4-3. Mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales artificiales. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 58.

| Contaminantes | Procesos de remoción o transformación | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| | Físicos | Químicos | Biológicos |
| Materia orgánica | Filtración y asentamiento | Oxidación | Degradación bacteriana y consumo microbiano |
| Sólidos suspendidos | Filtración y sedimentación | | Descomposición bacteriana |
| Nitrógeno | Volatilización | Intercambio de iones | Nitrificación/desnitrificación, consumo microbiano, consumo por las plantas |
| Fósforo | Filtración | Adsorción y precipitación química | Consumo por las plantas, consumo microbiano |
| Organismos Patógenos | Filtración | Degradación UV y adsorción | Depredación y mortalidad natural |
| Metales pesados | Asentamiento | Adsorción y precipitación química | Biodegradación, Fito degradación, Fito volatilización, consumo por las plantas. |

¹³⁴ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 41.; Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 57.

Sólidos suspendidos

Humedales de flujo a superficie libre

Asentamiento discreto y floculante

Comúnmente el asentamiento de partículas suspendidas se da por la gravedad, la cual es la principal característica de estos dos tipos de asentamiento. Esto significa que ambos procesos aprovechan el tamaño de la partícula, su forma, y gravedad específica, así como la viscosidad y la gravedad específica del agua residual.

El asentamiento discreto implica que las partículas se asientan sin interacción o reacción al comportamiento de otras partículas, mientras que el asentamiento floculante ocurre por el crecimiento y por el posible cambio de características conforme pasa el tiempo; siendo también promovido por el movimiento relativamente lento, lo que provoca una colisión entre partículas.

El asentamiento discreto puede determinarse derivado de la segunda ley de Newton. Bajo condiciones de flujo laminar (caso de los humedales FWS y VF), la velocidad de una partícula esférica puede ser estimada por la ley de Stokes. Por el contrario, el asentamiento floculante no puede determinarse de forma teórica sino de forma experimental.

Filtración e intercepción

La filtración de forma estricta (usando el sustrato como medio filtrador) es realmente poco importante en la remoción de sólidos suspendidos en los humedales FWS. Sin embargo, dicha filtración existe. Con respecto a la intercepción, ésta es mucho más significativa en términos cuantitativos, esto a la adhesión de partículas a las superficies de las plantas y a los desechos de estas como la hojarasca. Esta adhesión depende de las partículas, su tamaño y velocidad, y de las características de las plantas. Después, esta materia puede ser metabolizada y convertida en compuestos solubles, gases o biomasa, esto dependiendo de las características de dichos sólidos.

Humedales de flujo subsuperficial

Filtración e intercepción

La remoción de los sólidos suspendidos en este tipo de flujo se lleva a cabo solamente a través de la filtración e intercepción. Consecuentemente, la remoción es mucho mayor en este tipo de humedales debido al contacto del agua con el sustrato y el sistema de raíces. Lo anterior presenta dos ventajas principales en comparación a los humedales FWS: primero, el efecto de filtro que supone el sustrato al hacer que el agua fluya a través de él y no por encima; y segundo, el tiempo de contacto que tiene el agua con el sustrato, lo cual da mayor oportunidad de adhesión y filtración. Hay una tercera ventaja, la no-resuspensión de los sólidos. Esto debido a que el flujo pasa por debajo de la superficie del sustrato. Esta última ventaja puede no ser tan significativa para los humedales SSF en comparación a los humedales FWS si estos últimos tienen buenas condiciones de flujo y no hay perturbación por parte de la fauna. No obstante, hay una desventaja a considerar que es el atascamiento, lo cual puede llegar a solucionarse con un buen mantenimiento o la aplicación de un mayor tratamiento anterior al humedal.

Materia orgánica

Procesos físicos

Los procesos físicos por los cuales se remueve la materia orgánica son los mismos que los de la remoción de sólidos suspendidos en ambos casos, en humedales FWS y SSF¹³⁵.

Procesos biológicos

La parte soluble de la materia orgánica puede ser descompuesta de forma aerobia y anaerobia en ambos tipos de flujo FWS y SSF. La degradación aerobia se da gracias a los organismos heterótrofos y autótrofos como se muestra en la tabla 4-4. La remoción aerobia de materia orgánica (glucosa, proteínas y lípidos) requiere un gran suministro de oxígeno, lo cual hace a los humedales VF los predilectos para el agua residual con altas cantidades de materia orgánica.

Tabla 4-4. Grupos de bacterias responsables por la descomposición de varios contaminantes. Editado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 59.

| Microorganismos | | Fuente de energía | Fuente de carbono | Contaminante removido |
|-----------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Autótrofos | Foto- autótrofos | Energía solar | CO ₂ | NH ₄ ⁺ -N |
| | Quimio-autótrofos | Energía inorgánica de óxido-reducción | CO ₂ | |
| Heterótrofos | Foto- heterótrofos | Energía solar | Carbono orgánico | BOD ₅ |
| | Quimio- heterótrofos | Energía inorgánica de óxido-reducción | Carbono orgánico | |

Nitrógeno

La remoción del nitrógeno es de gran importancia ya que afecta la concentración de oxígeno disuelto, además de que contribuye a la aparición del fenómeno de eutrofización (del cual ya se ha hablado en el apartado del agua residual en el marco teórico). Las formas más comunes del nitrógeno son las siguientes:

- Formas orgánicas: la urea [CO(NH₂)₂], aminoácidos (-NH₂ y -COOH), ácido úrico (C₅H₄N₄O₃), purina, y pirimidinas.
- Formas inorgánicas: Amoníaco tipo iones (NH₄⁺), nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻), y gases como óxido nitroso (N₂O), nitrógeno (N₂), óxido nítrico (NO₂), y amoníaco libre (NH₃)¹³⁶.

La figura 4-10 muestra los procesos de transformación y remoción del nitrógeno, y como pueden interactuar entre ellos.

¹³⁵ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 41-47.

¹³⁶ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 59-61.

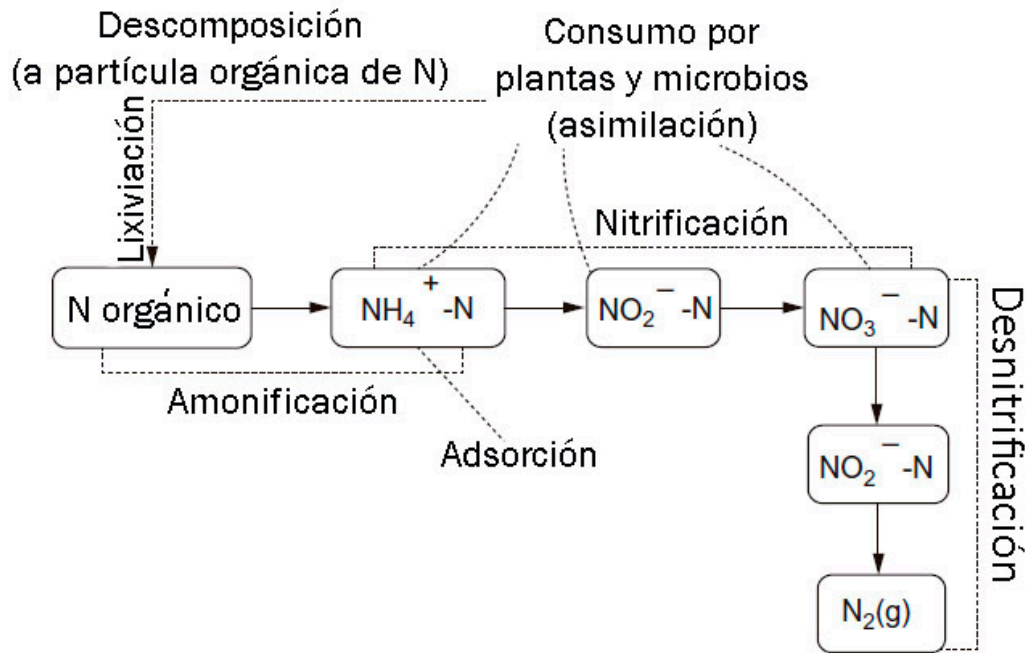


Figura 4-10. Procesos de transformación y remoción del nitrógeno. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 62.

Los procesos físicos asociados a la remoción de nitrógeno son los mismos a los que suceden en la remoción de los sólidos disueltos, que en ambos tipos de flujo de humedales ya se han expuesto. Dado lo cual solamente se expondrán los procesos biológicos por los cuales se lleva a cabo la remoción de nitrógeno (los cuales aplican para ambos tipos de flujo en los humedales).

Procesos biológicos

El proceso de remoción del nitrógeno se lleva a cabo por transformaciones de éste o por asimilación de otros organismos. Este proceso tiene una secuencia que podría dividirse en dos o tres etapas dependiendo del camino que tome el amoníaco. La primera es la amonificación. En la segunda entran la asimilación por parte de las plantas; la inmovilización por intercambio iónico en los sedimentos; la solubilización y retorno a la columna de agua; la volatilización como gas amoníaco; la conversión anaerobia a materia orgánica por los microbios; la absorción por fitoplancton o por macrófitas flotantes; o la nitrificación aerobia por microorganismos. La tercera etapa es la desnitrificación y ésta solamente sucede si el amoníaco pasa por el proceso de nitrificación. La figura 4-11 muestra de forma esquemática la secuencia de la transformación del nitrógeno, mientras que la figura 4-12 muestra cómo se llevan a cabo los procesos de transformación del nitrógeno en un humedal FWS¹³⁷.

¹³⁷ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 54.

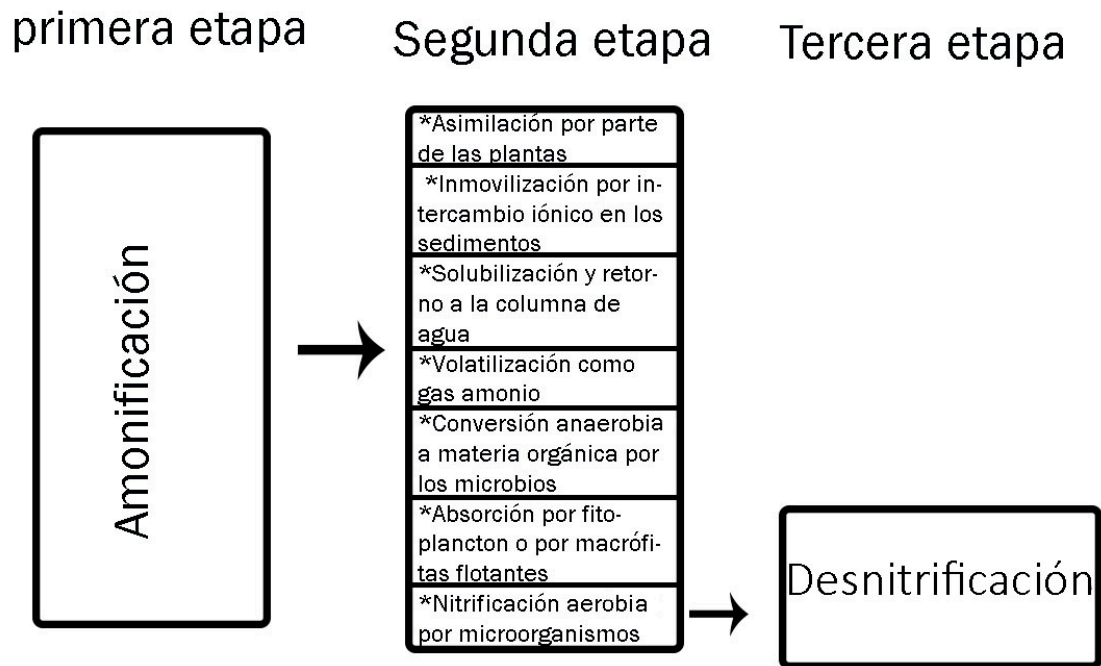


Figura 4-11. Secuencia de transformación del nitrógeno. Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 54.

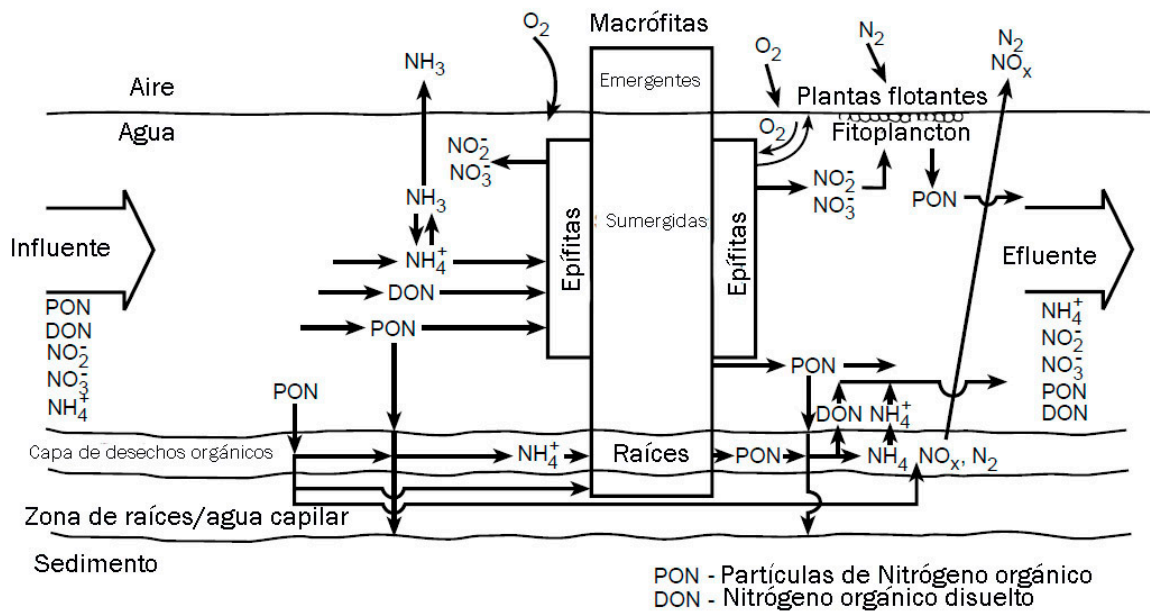
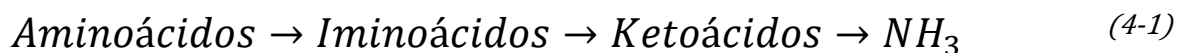


Figura 4-12. Procesos de transformación del nitrógeno en un humedal FWS. Modificado de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 54.

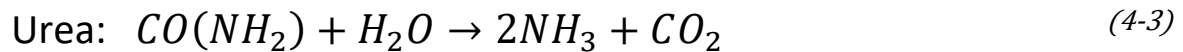
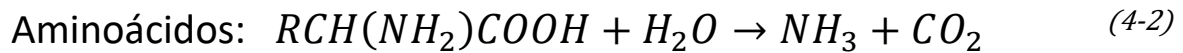
Primera etapa

Amonificación

El nitrógeno orgánico es transformado en amoniaco como se presenta en las siguientes ecuaciones químicas (4-1, 4-2, y 4-3):



Ejemplos:

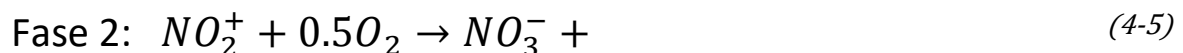
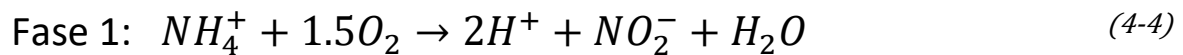


La mayor parte del nitrógeno orgánico es transformado en amoníaco por microbios en condiciones aerobias y anaerobias, y aunque este proceso se lleva a cabo más rápidamente en las capas en las que hay mayor oxígeno, también depende de la temperatura, el pH, el contenido de nutrientes, la relación Carbono/Nitrógeno, y las condiciones del sustrato.

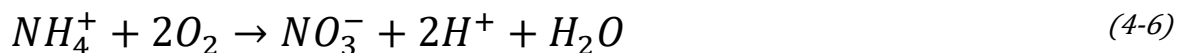
Segunda etapa

Nitrificación

Este proceso se produce en dos pasos, primero el amoníaco es oxidado por bacterias quimilitoautotrofas hasta convertirlo en nitrito bajo condiciones aeróbicas, en el segundo es convertido en nitrato por bacterias facultativas. Las dos fases del proceso son:



La reacción total podría escribirse como¹³⁸:



El nitrato no se inmoviliza por el sustrato y permanece en la columna de agua o en el agua capilar de los sedimentos, y por tanto puede ser absorbido por plantas o microbios (convirtiéndolo en biomasa) o puede seguir la siguiente etapa: la desnitrificación.

Consumo por plantas

El consumo y asimilación por parte de las plantas es también un proceso importante en la remoción del nitrógeno del agua. Ya que éstas lo ocupan como parte de su metabolismo. En la temporada de crecimiento la remoción es mucho mayor, mientras que en la temporada de senectud (en otoño e invierno) la remoción cae. En esta temporada el nitrógeno queda almacenado en los rizomas y en las raíces, mientras que una parte de este es liberada al agua debido a la hojarasca y demás desechos liberados por las plantas¹³⁹.

Adsorción

El amoníaco puede ser adsorbido por el sustrato, esto dependiendo de la capacidad de intercambio de cationes. Es por eso que en este caso la elección del material de sustrato es importante y por lo que, también, se han hecho distintas pruebas con distintos materiales para asegurar la remoción de nitrógeno (especialmente en los flujos SSF). Materiales comunes para asegurar dicha capacidad son la zeolita y grava; escorias de alto horno y de carbón artificial quemado; polietileno de alta densidad; pizarra; entre otros.

¹³⁸ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 62-63.

¹³⁹ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 55.

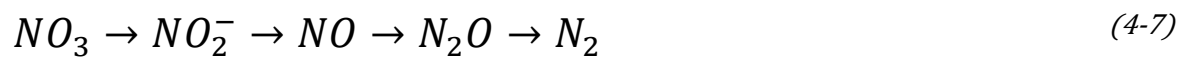
Volatilización del amoníaco

En este proceso, el amoníaco ionizado es liberado desde la columna de agua a la atmósfera a causa de fuerzas advectivas¹⁴⁰. Este proceso es altamente dependiente del pH, siendo que para valores mayores de 9.3 la conversión de amoníaco a NH_3 incrementa con respecto a valores de pH más bajos. En humedales VF la cantidad de amoníaco que se volatiliza es reamente poca, aunque en general la remoción de nitrógeno es baja (especialmente en comparación con los humedales HSF).

Tercera etapa

Desnitrificación

Esta es la última etapa de la cadena del proceso de transformación del nitrógeno, y solamente sucede cuando una parte del nitrógeno pasa por el proceso de nitrificación. En esta etapa se da paso a la reducción del nitrito y del nitrato producido para formar óxido nítrico, óxido nitroso y gas nitrógeno, proceso que llevan a cabo las bacterias desnitrificadoras. En este proceso las bacterias facultativas heterotróficas utilizan los óxidos del nitrógeno o el oxígeno como receptores de electrones y la materia orgánica como donadores de electrones de acuerdo a la siguiente ecuación:



El proceso puede verse afectado por el potencial de óxido-reducción, la disponibilidad de carbón orgánico y nitrato, el oxígeno disuelto, la humedad, el pH, y la temperatura. Una buena fuente de carbón orgánico puede ser la hojarasca que se puede encontrar en todos los humedales.

Fósforo

El fósforo, al igual que el nitrógeno, contribuye a la aparición del fenómeno de eutrofización en los cuerpos de agua receptores, razón por la cual la remoción de este contaminante es importante. Las formas orgánicas e inorgánicas en las cuales puede presentarse el fósforo en el agua residual suelen ser: formas inorgánicas como los ortofosfatos libres, polifosfatos (cíclicos y linealmente condensados), y formas orgánicas como los fosfolípidos, ácidos nucleicos, y azúcares fosforilados. Los principales procesos de remoción y/o transformación del fósforo que se dan en los humedales artificiales son la adsorción/desorción, precipitación, consumo por plantas o microbios, y la mineralización.

La figura 4-13 muestra los procesos de remoción/transformación del fósforo en los humedales FWS, mientras que la figura 4-14 muestra las relaciones en la transformación del fósforo.

¹⁴⁰ Ejercidos por o debido a un campo vectorial.

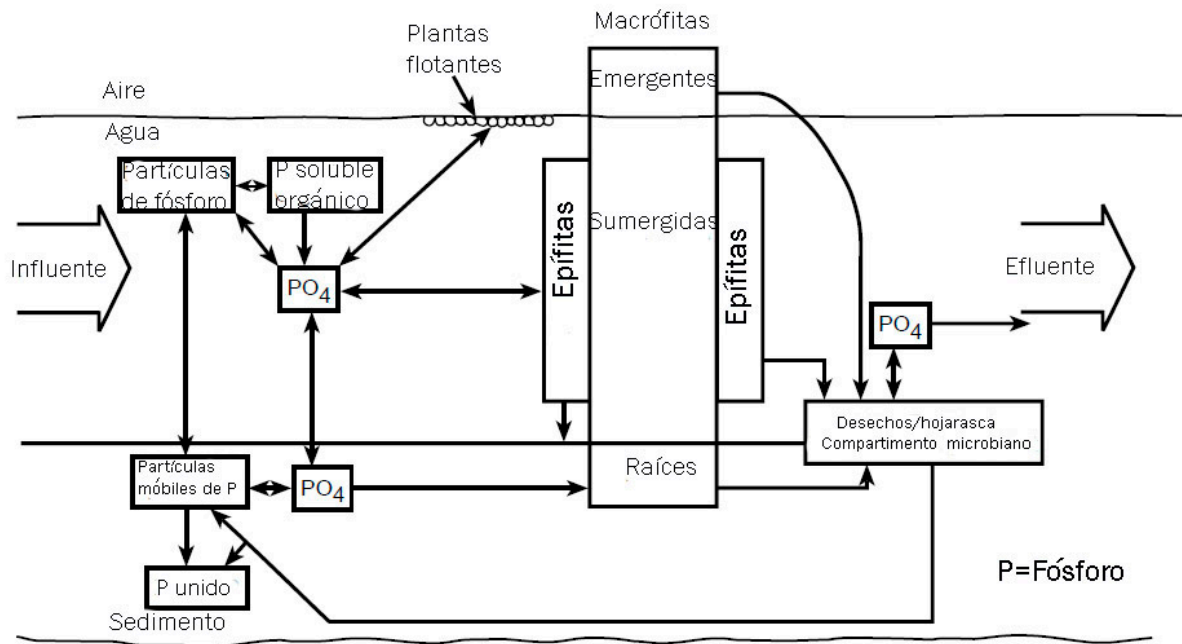


Figura 4-13. Procesos de transformación del fósforo en un humedal FWS. Modificado de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 58.

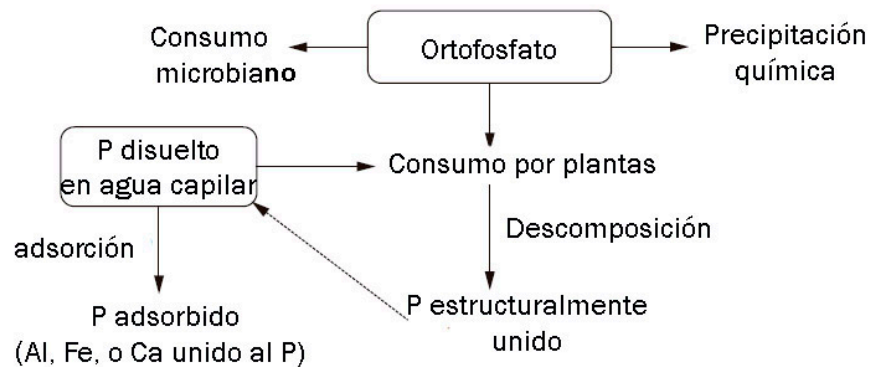


Figura 4-14. Relaciones en los procesos de transformación y remoción del fósforo. Modificado de fuente: Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 68.

Adsorción y precipitación

La adsorción por parte del sustrato y la precipitación se consideran como un proceso en total, y éste representa el proceso con mayor remoción de fósforo en los humedales artificiales. La capacidad de adsorción de fósforo por parte del sustrato depende evidentemente de sus características, luego entonces, altos los contenidos de óxidos de aluminio, hierro, y calcio aumentan la reacción de adsorción y precipitación.

Durante la adsorción el fósforo orgánico soluble es acumulado en la superficie de los minerales del material filtro, esto, sin que el fósforo penetre más allá de la superficie. Los iones fosfato pueden reaccionar con el aluminio, hierro, calcio, o magnesio formando sólidos cristalinos o amorfos.

Consumo por plantas

El consumo por parte de las plantas del fósforo al igual que el de nitrógeno es aprovechado para sus necesidades de crecimiento y desarrollo, por lo cual dicho consumo es mucho mayor durante la época de crecimiento y significativamente mayor después del invierno cuando los nuevos brotes comienzan a aparecer. La cantidad asimilada por las plantas (eliminada permanentemente) en comparación con la cantidad total de fósforo removida es muy pequeña. Aun así, dicha asimilación es indispensable para el sistema ya que de esta forma no hay posibilidad de que el fósforo eliminado por asimilación vuelva al sistema a través de los desechos de las plantas (como la hojarasca).

Consumo microbiano

A pesar de que hay poca investigación (especialmente en los humedales VF), se sabe al menos que en los humedales HSF la porción asimilada por microorganismos es alrededor de 15%. La remoción por parte de microorganismos puede ser por bacterias, algas u hongos. Los cuales almacenan el fósforo durante su crecimiento convirtiéndolo en fósforo inorgánico, y aunque liberan dicho fósforo al término de su vida, una porción pequeña es removida permanentemente del agua. Por último, esta remoción es mucho mayor en las partes superiores del sustrato en donde la población microbiana es más densa, y el oxígeno disuelto es abundante.

Agentes patógenos

Se ha probado que estos sistemas proveen una gran remoción de patógenos, aunque los humedales artificiales son construidos con el propósito de eliminar principalmente materia orgánica, sólidos suspendidos y nitrógeno. Sin embargo, la mayor remoción de patógenos se realiza en la desinfección. Ya se ha discutido los riesgos a la salud humana que ciertos organismos patógenos ya se han discutido en el apartado del agua residual, por lo cual no se discutirá en este apartado.

Los mecanismos por los cuales pueden removerse los patógenos pueden ser físicos o biológicos. Los físicos son exactamente los mismos asociados a los sólidos suspendidos por lo tanto solo se discutirán los biológicos en este apartado.

Depredación

Este proceso biológico es el principal mecanismo de remoción de patógenos, y a pesar de que ha habido poca investigación en el tema de depredación de microorganismos, se sabe que los patógenos encontrados en el agua residual sirven como alimento para otros organismos como bacteriófagos, organismos tipo bdellovibrio, y protozoos. Estos últimos con una eficiencia mayor probada para remover patógenos, siendo los cilóforos los depredadores de la Escherichia Coli más eficientes en humedales (especialmente HSF) con camas plantadas con vegetación; mientras que los bacteriófagos son virus que atacan a las bacterias y son considerados los más abundantes y diversos en el planeta.

Se sabe, además, que la actividad de depredación es mucho más intensa en los 20 primeros centímetros de la cama de sustrato, que este proceso depende principalmente de las características de los organismos presa (la especie, la densidad, etc.), las características de los organismos depredadores (morfología, fisiología, y hábitos alimenticios), así como las características del medio (la temperatura y el potencial de óxido-reducción).

Retención en biopelículas

Los microorganismos patógenos pueden adherirse en el sustrato, en las raíces de las plantas, o en la superficie de las plantas como las hojas, tallos y brotes. Ésta es la razón por la cual es muy importante el cuidado que se debe de tener con el contacto humano porque representa un riesgo para la salud (específicamente en los humedales FWS). Las capas de arena son especialmente eficientes en la remoción de bacterias, y si aunado a esto, hay presencia de protozoos, hay un incremento en la eficiencia.

Las plantas

La presencia de las plantas puede llegar a favorecer la remoción de patógenos con un suministro de oxígeno a través de su sistema de raíces. Además, la liberación de metabolitos secundarios (ácidos tánico y gálico) también por parte de las raíces se considera otro mecanismo de remoción de patógenos, aunque esto está aún por ser probado¹⁴¹.

Metales

Se sabe muy bien que ciertos metales son necesarios para el crecimiento no solamente para los animales sino también para las plantas (bario, berilio, boro, cromo, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, selenio, azufre, yodo, y zinc), pero altas concentraciones de estos metales pueden ser tóxicas. Por otro lado, hay otros metales que no son necesarios para el crecimiento biológico y que pueden ser tóxicos incluso en pequeñas concentraciones (arsénico, cadmio, plomo, mercurio, y plata).

Los metales encontrados en el agua residual en forma insoluble pueden ser removidos por formas físicas iguales a las expuestas en la remoción de los sólidos suspendidos, resolubilizados (dependiendo del pH y el potencial de óxido-reducción), o removidos por los procesos siguientes: intercambio iónico; y quelación con el sustrato y los sedimentos del humedal; fijación con materiales húmicos; precipitación como sales de sulfuros insolubles, carbonados y oxihidróxidos; y consumo por plantas, algas, y bacterias.

Las plantas pueden asimilar algunos tipos de metales dependiendo de la especie de vegetación y de que se metal se trata, siendo algunas plantas mejores para remover ciertos tipos de metales. Algunos investigadores también creen que algunos metales (especialmente los metales pesados) pueden ser encontrados en las superficies del sistema de raíces debido a la precipitación y la adsorción.

Sin embargo, la insuficiente información a largo plazo en humedales a gran escala no provee gran información y mucho menos con gran confiabilidad en el desempeño en cuestión de remoción de metales pesados del agua residual. Aun así, se sabe que en humedales con vegetación abundante, las condiciones anaerobias son favorables para retener una mayor cantidad de metales con los sólidos suspendidos, y también que minimizan la resolubilización¹⁴².

Micro contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos de mayor relevancia en esta categoría son los fenoles y otros compuestos aromáticos; fármacos, productos de higiene personal y alteradores endocrinos, los cuales pueden llevar a removerse por distintos procesos como la volatilización, la

¹⁴¹ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 64-79.

¹⁴² U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 60-61.

sedimentación/intercepción, el consumo por plantas y la biodegradación¹⁴³. Dado que estos procesos se han discutido ya ampliamente en los compuestos anteriores solamente se hace referencia a ellos pero no se abordarán más las condiciones y características de dichos procesos.

4.1.5 Eficiencia esperada

DBO

La remoción de DBO en los sistemas de humedales es alta. Por un lado por el asentamiento de materia orgánica, debido a distintas razones que dependen del tipo del humedal del que se trate. En los humedales FWS es debido a la velocidad del flujo, que es muy lenta. En cambio, en los humedales HSF y VF es debido a la filtración y depósito. Por otro lado, la materia orgánica que no se asienta es después eliminada por el contacto con el crecimiento microbiano en distintas superficies.¹⁴⁴

La remoción de DBO₅ en los humedales FWS se muestra en la tabla 4-5, mientras que en la 4-6 se muestra la remoción de DBO₅ en los Humedales HSF y VF.

En comparación, la remoción en los humedales SSF parece ser más rápida y eficiente que en los humedales FWS. Esto es debido en parte a que los desechos de las plantas (hojarasca y otros) no se encuentran en la columna de agua.

¹⁴³ Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrantzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 68.; U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 61.

¹⁴⁴ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 252, 321.

Tabla 4-5. Remoción de Demanda bioquímica de oxígeno en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 253.

| Lugar | DBO en el influente (mg/L) | DBO en el efluente (mg/L) | Porcentaje de remoción (%) | Referencia |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Arcata, California | 26 | 12 | 54 | Gearheart et al. (1989) |
| Benton, Kentucky | 25.6 | 9.7 | 62 | USEPA (1993) |
| Cannon Beach, Oregon | 26.8 | 5.4 | 84 | USEPA (1993) |
| Cle Elum, Washington | 38 | 8.9 | 77 | Smith et al. (2002) |
| Ft. Deposit, Alabama | 32.8 | 6.9 | 79 | USEPA (1993) |
| Gustine, California | 75 | 19 | 75 | Crites (1996) |
| Iselin, Pennsylvania | 140 | 17 | 88 | Watson et al. (1989) |
| Listowel, Ontario, Canada | 56.3 | 9.6 | 83 | Herskowitz et al. (1987) |
| Ouray, Colorado | 63 | 11 | 83 | Andrews (1996) |
| West Jackson County, Mississippi | 25.9 | 7.4 | 71 | USEPA (1993) |
| Sacramento County, California | 24.2 | 6.5 | 73 | Nolte Associates (1999) |

Tabla 4-6. Remoción de Demanda bioquímica de oxígeno en humedales de flujo subsuperficial. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 322.

| Lugar | Procedencia del agua residual | DBO en el influente (mg/L) | DBO en el efluente (mg/L) | Porcentaje de remoción (%) | Tiempo de retención hidráulica nominal (d) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| Benton, Kentucky ^a | Laguna de oxidación | 23 | 8 | 65 | 5 |
| Mesquite, Nevada ^b | Laguna de oxidación | 78 | 25 | 68 | 3.3 |
| Santee, California ^c | Tratamiento primario | 118 | 1.7 | 88 | 6 |
| Sydney, Australia ^d | Tratamiento secundario | 33 | 4.6 | 86 | 7 |
| a Escala real. Operación de marzo de 1988 a noviembre 1988, operado a 80 mm/d (Watson et al. 1989). | | | | | |
| b Escala real. Operación de enero de 1994 a enero de 1995. | | | | | |
| c Escala piloto. Operación en 1984, operado a 50 mm/d (Gersberg et al. 1985). | | | | | |
| d Escala piloto. Operación en Richmond, New South Wales, cerca de Sydney, Australia, operado a 40 mm/d de diciembre de 1985 a febrero de 1986 (Bavor et al. 1986). | | | | | |

Sólidos suspendidos

La mayoría de los sólidos suspendidos que pueden removerse por asentamiento son removidos en los primeros 15 a 30 metros de la longitud del humedal. La remoción de éstos en humedales de flujo

SSF tienen valores típicos debajo de los 10 mg/L aunque las tasas son muy similares a las de los humedales FWS. La tabla 4-7 muestra la remoción de los sólidos suspendidos en los humedales de flujo superficial, pudiendo aplicarse también para humedales de flujo subsuperficial.

Tabla 4-7. Remoción de sólidos suspendidos totales en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 253.

| Lugar | SST en el influente (mg/L) | SST en el efluente (mg/L) | Porcentaje de remoción (%) | Referencia |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Arcata, California | 30 | 14 | 53 | Gearheart et al. (1989) |
| Benton, Kentucky | 57.4 | 10.7 | 81 | USEPA (1993) |
| Cannon Beach, Oregon | 45.2 | 8.0 | 82 | USEPA (1993) |
| Cle Elum, Washington | 32 | 4.8 | 85 | Smith et al. (2002) |
| Ft. Deposit, Alabama | 91.2 | 12.6 | 86 | USEPA (1993) |
| Gustine, California | 102 | 31 | 70 | Crites (1996) |
| Iselin, Pennsylvania | 380 | 53 | 86 | Watson et al. (1989) |
| Listowel, Ontario, Canada | 111 | 8 | 93 | Herskowitz et al. (1987) |
| Ouray, Colorado | 86 | 14 | 84 | Andrews (1996) |
| West Jackson County, Mississippi | 40.4 | 14.1 | 65 | USEPA (1993) |
| Sacramento County, California | 9.2 | 7.1–11.9 | 23–29 _a | Nolte Associates (1999) |

Nitrógeno

En el caso de los humedales FWS, los organismos nitrificadores requieren una gran cantidad de oxígeno y área, por lo cual dichos organismos no se encuentran en sistemas con grandes cargas de materia orgánica (cargas de DBO mayores a 100 [lb/ac*d]≈112.085 [kg/ha*d]) o en humedales artificiales construidos recientemente, por lo cual se ha encontrado que se necesitan de una a dos temporadas de crecimiento para que se desarrolle suficiente vegetación que pueda respaldar el proceso de nitrificación. Cuando el nitrógeno se presenta en forma de nitrato, en general, la remoción es fácil y rápida, pero hay que considerar que depende de la concentración del nitrato, el tiempo de retención, y de la cantidad de materia orgánica.

En el caso de los humedales SSF, se reportan tasas de remoción de 20 a 70 % (aunque hay un caso en Santee, California en el que se reportó 86%). Cuando los tiempos de retención sobrepasan de los 6 o 7 días, se puede esperar de 50 a 60 %, mientras que si el agua residual ha pasado por el proceso de nitrificación, la misma remoción de nitrato con el proceso de desnitrificación se alcanza en tiempos de retención de 2 a 4 días ¹⁴⁵.

¹⁴⁵ *Ibid.*, pág. 254, 322.

La remoción del amoníaco y nitrógeno en humedales FWS se presenta en la tabla 4-8.

Tabla 4-8. Remoción del amonio y nitrógeno en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 254.

| Lugar | Procedencia del agua residual | Amoníaco en el influente (mg/L) | Amoníaco en el efluente (mg/L) | Nitrógeno total en el influente (mg/L) | Nitrógeno total en el efluente (mg/L) |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Arcata, California | Laguna de oxidación | 12.8 | 10 | — | 11.6 |
| Beaumont, Texas | Tratamiento secundario | 12 | 2 | — | — |
| Iselin, Pennsylvania | Laguna de oxidación | 30 | 13 | — | — |
| Jackson Bottoms, Oregon | Tratamiento secundario | 9.9 | 3.1 | — | — |
| Listowel, Ontario | Tratamiento primario | 8.6 | 6.1 | 19.1 | 8.9 |
| Pembroke, Kentucky | Tratamiento secundario | 13.8 | 3.35 | — | — |
| Sacramento County, California | Tratamiento secundario | 14.9 | 9.1 | 16.9 | 11 |
| Salem, Oregon | Tratamiento secundario | 12.9 | 4.7 | — | — |

Fósforo

La remoción de fósforo depende de la interacción del suelo o sustrato y del tiempo de retención. Por lo cual, en flujos con pequeñas concentraciones de fósforo o tiempos de retención largos, será retenido en la zona del sustrato o las raíces. En los humedales FWS con tiempos de retención de 5 a 10 días, los valores en el efluente raramente excederán de 1 a 3 mg/L. Por otro lado la remoción de fósforo en los humedales SSF es más bien deficiente, teniendo porcentajes de remoción entre 10 y 40% para influentes con concentraciones de entre 7 a 10 mg/L¹⁴⁶.

La remoción del fósforo en humedales FWS se observa en la tabla 4-9.

¹⁴⁶ *Ibid.*, 255, 322.

Tabla 4-9. Remoción del fósforo en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 255.

| Lugar | Tasa de carga hidráulica (in./d) | Fósforo total en el influente (mg/L) | Fósforo total en el efluente (mg/L) | Porcentaje de remoción (%) |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Listowel, Ontario | 0.95 | 1.9 | 0.7 | 62 |
| Pembroke, Kentucky | 0.3 | 3 | 0.1 | 96 |
| Sea Pines, South Carolina | 7.95 | 3.9 | 3.4 | 14 |
| Benton, Kentucky | 1.86 | 4.5 | 4.1 | 10 |
| Leaf River, Mississippi | 4.6 | 5.2 | 4 | 23 |
| Lakeland, Florida | 2.93 | 6.5 | 5.7 | 13 |
| Clermont, Florida | 0.54 | 9.1 | 0.2 | 98 |
| Brookhaven, New York | 0.59 | 11.1 | 2.3 | 79 |
| Sacramento County, California | 2.45 | 2.38 | 2.07 | 13 |
| Salem, Oregon | 0.4 | 2.2 | 1 | 55 |
| Promedio | 2.26 | 4.98 | 2.36 | 46 |

Metales

La remoción de los metales depende en el tiempo de retención, las concentraciones del metal en el influente, y la especiación de metales¹⁴⁷. Aunque aún los datos que se tienen sobre remoción de metales son limitados, la tabla 4-10 presenta algunos valores de varios humedales FWS en los Estados Unidos; la tabla 4-11 valores de un humedal SSF en Hardin, Kentucky; y la tabla 4-12 representa la remoción de acuerdo a la longitud recorrida por el flujo en humedales FWS. Es en esta última tabla (4-12) en la cual puede observarse que en los primeros 16m se pueden llegar a eliminar en algunos casos más del 90%, e incluso en los primeros 5m pueden llegar a eliminarse más del 80% en algunos casos.

¹⁴⁷ *Ibid.*, pág. 256.

Tabla 4-10. Remoción de metales en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 257.

| Lugar | Metal | Influyente (µg/L) | Efluente (µg/L) | Porcentaje de remoción (%) |
|-------------------------------|-----------|-------------------|-----------------|----------------------------|
| Prague | Aluminio | 451 | <40 | 91 |
| Sacramento County, California | Antimonio | 0.43 | 0.18 | 58 |
| Sacramento County, California | Arsénico | 2.37* | 2.8 | -18 |
| Brookhaven, New York | Cadmio | 43 | 0.6 | 99 |
| Sacramento County, California | Cadmio | 0.08 | 0.03 | 63 |
| Brookhaven, New York | Cromo | 160 | 20 | 88 |
| Sacramento County, California | Cromo | 1.43 | 1.11 | 23 |
| Brookhaven, New York | Cobre | 1 510 | 60 | 96 |
| Sacramento County, California | Cobre | 7.44 | 3.17 | 57 |
| Brookhaven, New York | Hierro | 6430 | 2140 | 67 |
| Sacramento County, California | Plomo | 1.14 | 0.23 | 80 |
| Brookhaven, New York | Plomo | 1.7 | 0.4 | 76 |
| Brookhaven, New York | Manganeso | 210 | 120 | 43 |
| Sacramento County, California | Mercurio | 0.011 | 0.004 | 64 |
| Brookhaven, New York | Níquel | 35 | 10 | 71 |
| Sacramento County, California | Níquel | 5.8 | 6.84 | -18 |
| Sacramento County, California | Plata | 0.53 | 0.09 | 83 |
| Brookhaven, New York | Zinc | 2200 | 230 | 90 |
| Sacramento County, California | Zinc | 35.82 | 6.74 | 81 |

* Durante los 5 años de monitoreo, el arsénico en el influente cayó de 3.25 a 2.33 µg/L, mientras que el arsénico en el efluente cambió de 2.34 a 3.77 µg/L.

Tabla 4-11. Remoción de metales a través de un humedal de flujo subsuperficial en Hardin, Kentucky. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 323.

| Metal | Rango en el influente (µg/L) | Promedio en el influente (µg/L) | Rango en el efluente (µg/L) | Promedio en el efluente (µg/L) | Porcentaje de remoción (%) |
|-----------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Aluminio | 380–3 800 | 1696 | <50–100 | <50 | >97 |
| Cobre | 20–190 | 77 | <10 | <10 | >87 |
| Hierro | 310–2 400 | 1 111 | 370–2 900 | 1 234 | –10 |
| Manganeso | 44–480 | 258 | 64–590 | 288 | –10 |
| Zinc | 20–120 | 64 | <10 | <10 | >84 |

Tabla 4-12. Remoción de metales de acuerdo a la longitud recorrida por el flujo en humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 257.

| Metal | Longitud | | | | | | | Concentración del metal en dicha longitud |
|-----------|----------|-----|------|------|------|------|------|-------------------------------------------|
| | 0 m | 5 m | 16 m | 32 m | 48 m | 60 m | 62 m | |
| Aluminio | 451 | 126 | 65 | 47 | 46 | <40 | <40 | |
| Cobre | 11.3 | 4.1 | 3 | <2.0 | <2.0 | <2.0 | <2.0 | |
| Manganeso | 278 | 47 | 52 | 39 | 41 | 45 | 53 | |
| Zinc | 198 | 106 | 12 | 7.3 | 3.6 | <5.0 | <5.0 | |

Reducción de la temperatura

Esta reducción de temperatura se presenta cuando el aire de la temperatura ambiente está a menor temperatura que el agua residual, lo cual puede ser importante especialmente en humedales FWS en los que se puede afectar ciertas eficiencias de remoción como la de los sólidos suspendidos, materia orgánica, metales, etc. La tabla 4-13 muestra las variaciones presentadas en dos humedales FWS en los Estados Unidos.

Tabla 4-13. Reducción de la temperatura del agua por efecto de pasar por el humedal FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 258.

| Mes | Sacramento County, California | | | Mt. Angel, Oregon | | |
|------------|-------------------------------|----------|-----------|------------------------|----------|-----------|
| | Influente ^a | Efluente | Reducción | Influente ^b | Efluente | Reducción |
| | (°F) | (°F) | (°F) | (°F) | (°F) | (°F) |
| Enero | 57.7 | 48 | 9.7 | 45.3 | 44.2 | 1.1 |
| Febrero | 62.4 | 51.3 | 11.1 | 50.2 | 50.4 | –0.2 |
| Marzo | 59 | 55.6 | 3.4 | 53.5 | 52.4 | 1.1 |
| Abril | 64.9 | 61.1 | 3.8 | 63.3 | 60.9 | 2.4 |
| Mayo | 67.5 | 59.9 | 7.6 | 67 | 62.5 | 4.5 |
| Junio | 72.1 | 71.8 | 0.3 | 72.8 | 68 | 4.8 |
| Julio | 74.8 | 73.6 | 1.2 | 73.7 | 69.1 | 4.6 |
| Agosto | 78.4 | 72.7 | 5.7 | 73.1 | 66.9 | 6.2 |
| Septiembre | 76.1 | 68.5 | 7.6 | 70.3 | 64.5 | 5.8 |
| Octubre | 64.2 | 58.6 | 5.6 | 59.5 | 55.9 | 3.6 |
| Noviembre | 60.6 | 57.2 | 3.4 | 52.2 | 50.6 | 1.6 |
| Diciembre | 56.3 | 50.2 | 6.1 | 48.4 | 47.5 | 0.9 |
| Promedio | — | — | 5.5 | — | — | 3 |

a Porcentaje en 5 años de 1994 a 1998 (Nolte Associates, 1999).
b Porcentaje en 4 años de 1999 to 2002 (City of Mt. Angel, Oregon).

Trazas de compuestos orgánicos

Ya que los procesos por los cuales los compuestos orgánicos pueden ser removidos han sido expuestas, la tabla 4-14 presenta el porcentaje de remoción observado en un humedal artificial a escala piloto con un tiempo de retención hidráulica de 24 horas. Tabla en la cual puede observarse la gran eficiencia en este rubro, estando en su mayoría entre el 80% y 90%.

Tabla 4-14. Remoción de contaminantes orgánicos prioritarios en humedales. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 258.

| Compuesto | Concentración Inicial ($\mu\text{g/L}$) | Remoción 24 hr (%) |
|------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| Benceno | 721 | 81 |
| Bifenilo | 821 | 96 |
| Clorobenceno | 531 | 81 |
| Dimetilftalato | 1033 | 81 |
| Etilbenceno | 430 | 88 |
| Naftalina | 707 | 90 |
| <i>p</i>-Nitrotolueno | 986 | 99 |
| Tolueno | 591 | 88 |
| <i>p</i>-Xileno | 398 | 82 |
| Bromoforno | 641 | 93 |
| Cloroformo | 838 | 69 |
| 1,2-Diclorometano | 822 | 49 |
| Tetracloroetileno | 457 | 75 |
| 1,1,1-Tricloroetano | 756 | 68 |

Remoción de patógenos

Ya que los procesos por los cuales los organismos patógenos pueden ser removidos han sido expuestas, la tabla 4-15 presenta las concentraciones de coliformes fecales en el influente y efluente, observadas en distintos humedales artificiales.

Tabla 4-15. Remoción de patógenos en humedales artificiales. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 70.

| Lugar | Desempeño del sistema | |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Influyente | Efluente ^a |
| Santee, California (humedal de totoras)^b | | |
| Invierno (Octubre–Marzo) | | |
| Coliformes totales (número/100 mL) | 5×10^7 | 1×10^5 |
| Bacteriófagos (PFU/mL) | 1 900 | 15 |
| Verano (Abril–Septiembre) | | |
| Coliformes totales (número/100 mL) | 6.5×10^7 | 3×10^5 |
| Bacteriófagos (PFU/mL) | 2 300 | 26 |
| Iselin, Pennsylvania (Totoras y pastos)^c | | |
| Invierno (Noviembre–Abril) | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 1.7×10^6 | 6200 |
| Verano (Mayo–Octubre) | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 1.0×10^6 | 723 |
| Arcata, California (humedal de totoras)^d | | |
| Invierno | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 4 300 | 900 |
| Verano | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 1 800 | 80 |
| Listowel, Ontario (totoras)^d | | |
| Invierno | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 556 000 | 1400 |
| Verano | | |
| Coliformes fecales (número/100 mL) | 198 000 | 400 |
| a No desinfectado. | | |
| b Cama de grava, Flujo SSF. | | |
| c Cama de arena, Flujo SSF. | | |
| d Flujo FWS. | | |

Concentraciones de fondo

Dado que los humedales artificiales son ecosistemas creados por el hombre y tienen distintos procesos biológicos iguales a los de los sistemas naturales, los humedales artificiales producen concentraciones de distintos contaminantes. Dichos contaminantes no tienen su origen en el agua residual sino en los ciclos vitales de los organismos que habitan el sistema. Los humedales artificiales, entonces, no pueden producir efluentes con cero contaminantes (DBO, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales). Sin embargo, no es lo mismo que un humedal natural que reciba agua limpia a un humedal artificial que reciba agua residual rica en nutrientes, por lo que las concentraciones de dichos contaminantes expedidos por el sistema son mayores en el segundo caso (que también varía de acuerdo a las estaciones)¹⁴⁸. Las concentraciones de los distintos contaminantes que pueden llegar a ocurrir en distintos casos se observan en la tabla 4-16.

¹⁴⁸ *Ibid.*, pág. 259.

Tabla 4-16. Concentraciones de contaminantes producidas por el sistema en un efluente de humedal artificial típico. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 260.

| Contaminante | Rango | Valor típico |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|
| Sólidos suspendidos totales (mg/L) | 2–5 | 3 |
| BOD* (mg/L) | 2–8 | 5 |
| Nitrógeno total (mg/L) | 1–3 | 2 |
| Nitrógeno nítrico (mg/L) | <0.1 | <0.1 |
| Nitrógeno amoniacal (mg/L) | 0.2–1.5 | 1 |
| Nitrógeno orgánico (mg/L) | 1–3 | <2 |
| Fósforo total (mg/L) | 0.1–0.5 | 0.3 |
| Coliformes fecales (ufc/100 mL) | 50–5 000 | 200 |
| * Se ha reportado un rango entre 5 y 12 para humedales totalmente cubiertos con vegetación emergente. | | |

4.1.6 Aplicaciones de los humedales

Los humedales artificiales pueden llegar a alcanzar algunas o todas las funciones de un tratamiento secundario y mayor para agua residual municipal, por lo cual, el influente de los humedales suele ser el efluente del tratamiento primario (que en muchos casos son lagunas de oxidación o tanques sépticos)¹⁴⁹. Esta aplicación es la más común, aunque existen muchas otras que no son tan conocidas, pero que de igual forma son importantes y merecen ser discutidas para dar mayor claridad de por qué y bajo qué condiciones se utilizan los humedales para dichas aplicaciones.

Escorrentía de aguas pluviales

Dado que el objetivo principal de remoción de este tipo de aguas son los sólidos suspendidos, los humedales son una gran opción cuando de agua pluvial se trata. Por otro lado, generalmente son más utilizados los humedales FWS por su forma de canal, y porque los sistemas SSF pueden llegar a tener problemas de taponamiento, especialmente cuando se trata de sólidos inorgánicos como puede llegar a ser el caso por la recolección de este tipo de agua en estacionamientos, calles o algún otro espacio abierto¹⁵⁰. Una configuración muy común para esta aplicación es la que se muestra en la figura 4-15.

¹⁴⁹ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 9.

¹⁵⁰ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 263.

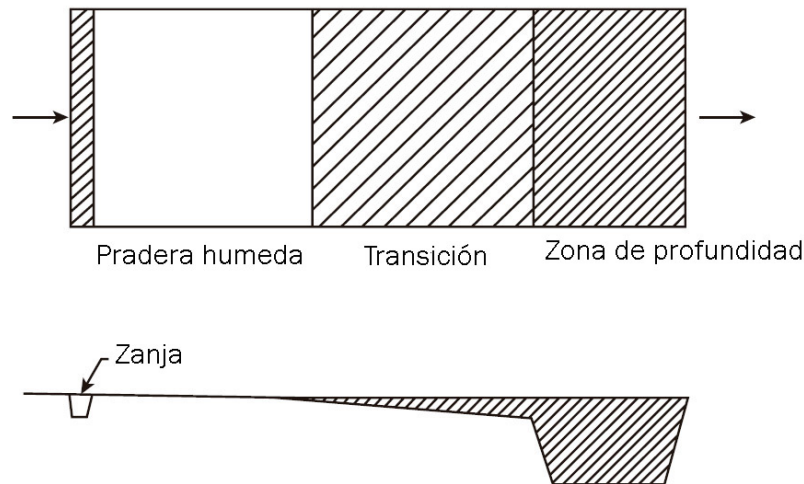


Figura 4-15. Esquema de un humedal para agua pluvial. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 264.

Agua residual de alcantarillado combinado

El tratamiento de agua residual que viene del alcantarillado combinado siempre suele ser un problema, debido a que en los picos de tormenta, la capacidad de la planta suele sobrepasarse haciendo que los operadores tengan que hacer pasar el agua sin tratamiento hacia la descarga de la planta para que no llegue a inundarse. Esta práctica está actualmente prohibida en algunos lugares por lo cual la búsqueda de soluciones se ha convertido en prioridad.

Los humedales artificiales pueden llegar a utilizarse en este caso con gran eficiencia ya que en esta situación, el agua tiene una concentración de contaminantes más uniforme. A diferencia del agua pluvial en la que la primera “descarga” de aguas es la que contiene una mayor concentración. En este caso también es más apropiado utilizar humedales FWS por las razones ya explicadas¹⁵¹.

Aguas residuales industriales

El grupo de industrias de procesamiento de alimentos producen aguas residuales con grandes concentraciones de contenidos orgánicos biodegradables y nitrógeno. Los cuales son contaminantes fácilmente removidos en los humedales. Sin embargo, hay otros tipos de aguas de la industria en los que el flujo es bajo en nutrientes, y un pH o muy grande o muy bajo. Uno de los casos más comunes es la industria textil, en los cuales el problema de la remoción de los colorantes es importante ya que solamente hasta el 47% de dichos colorantes es biodegradable. Por lo cual se necesita algún otro tratamiento anterior, utilizando solamente los humedales como tratamiento terciario¹⁵².

Agua residual de granjas animales y curtidurías

El agua residual de granjas animales tiene altos contenidos de materia orgánica (DQO= 38 000 - 85 000 mg/L), sólidos suspendidos (28 500 - 61 000 mg/L), nitrógeno (Nitrógeno Kjeldahl total= 1 400 - 3 300 mg/L; NH₄ + -N=500 - 1 300 mg/L) y de fósforo. Todos los tipos de humedales han sido probados; sin embargo, los humedales FWS han sido solamente usados con cargas de contaminantes

¹⁵¹ *Ibid.*, pág. 265.

¹⁵² Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 10; Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 263; Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science. Pág. 150.

superficiales, mientras que los humedales HSF han tenido más éxito con eficiencias de 78% a 90% para DQO, 22% a 90% para DBO₅, 71% a 98% para fósforo total, 22% a 90% para nitrógeno total, y 22% a 51% para sólidos suspendidos totales¹⁵³.

En el caso de las curtidurías, esta agua residual contiene distintas sustancias químicas usadas en el procesamiento del cuero, que son muy alcalinas y grandes en demanda de oxígeno. Tienen niveles de materia orgánica y sólidos suspendidos de 4 000 y 2 000 mg/L respectivamente. Por otro lado, contenidos altos de Cromo trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI) (150 mg/L), sulfuro (160 mg/L), cloruro (5 000 mg/L), nitrógeno Kjeldahl total (160 mg/L) y sulfato (1 400 mg/L). En este caso los humedales HSF, VF e incluso los híbridos son utilizados con grandes resultados¹⁵⁴.

Drenaje de minas

Algunos cientos de humedales FWS han sido utilizados en los Estados Unidos para esta aplicación; no obstante, el dimensionamiento y la configuración de estos han sido más bien arbitrarios de acuerdo a la experiencia de los encargados. A pesar de eso, los humedales han resultado proveer los beneficios deseados; esto es: la remoción de hierro, y manganeso.

Sin embargo, hay una gran preocupación, que es la disminución del pH de 6 a 3 por efecto de la oxidación del hierro. En este caso la *Tennessee Valley Authority (TVA)* ha desarrollado un sistema de drenaje anóxico de piedra caliza (ALD) que permite subir el pH del agua. Se trata de agregados triturados (20-40mm de tamaño) que contienen grandes contenidos de calcio colocados en una zanja de 3 por 5 m con una profundidad de 0.6 a 1.5m.

Para esta aplicación son preferidos los humedales FWS por su gran potencial de condiciones aeróbicas en el sistema, y por los problemas de taponamiento que podría ocasionar el hierro y el manganeso en las camas de los sistemas SSF. Y se recomienda también que el pretratamiento sea una laguna de sedimentación, esto independientemente de si se utiliza o no un sistema ALD¹⁵⁵.

Lixiviados de rellenos sanitarios

Los lixiviados de rellenos sanitarios son flujos con grandes concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los constituyentes principales y comunes son DBO₅=1 000 mg/L, DQO=18 000 mg/L, Nitrógeno Total=225 mg/L, Fósforo Total=30 mg/L, Calcio=1 000 mg/L, Magnesio=250 mg/L, Sodio=500 mg/L, Potasio=300 mg/L, Hierro=60 mg/L, Cl=500 mg/L, y SO₄²⁻=300 mg/L. Los lixiviados de los rellenos sanitarios son peligrosos porque pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas o superficiales con sus grandes contenidos de amoníaco y de nitrógeno orgánico.

Es importante que se utilice algún tipo de tratamiento anterior a los humedales, que en muchos casos pueden ser tanques de sedimentación, filtros percoladores, tanques de aireación, y tanques sépticos. En este caso este tratamiento es relevante porque además de eliminar sólidos suspendidos disminuyen las concentraciones de algunos otros contaminantes, que en grandes cantidades pueden llegar a ser perjudiciales para las plantas¹⁵⁶.

¹⁵³ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 151, 152.

¹⁵⁴ *Ibid.*, pág. 145.

¹⁵⁵ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 275, 276.

¹⁵⁶ Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science. Pág. 147.

4.2 Diseño

Cuando se trata de sistemas realmente grandes (miles de hectáreas) se corre el riesgo de que el agua pueda acortar el recorrido y no cumplir con las expectativas de tratamiento. Por lo cual, se sugiere dividir en celdas más pequeñas por medio de bermas interiores. De otra forma, se tendrá que incorporar un factor de seguridad por el tamaño¹⁵⁷. Algunas recomendaciones para el diseño de humedales FWS se encuentran en la tabla 4-17, aunque las bases de diseño de forma completa se darán conforme avanza el apartado.

Tabla 4-17. Recomendaciones de diseño para humedales de flujo a superficie libre. Modificado de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 94.

| Parámetro | Criterio de diseño |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Calidad del Efluente | DBO \leq 20 o 30 mg/L SST \leq 20 o 30 mg/L |
| Pretratamiento | Lagunas de oxidación |
| Caudal de diseño | Q_{max} (Flujo máximo mensual) Q_{med} (Flujo promedio) |
| Carga máxima de DBO a tratar (para el sistema completo) | 20 mg/L, y 45 kg/ha-d 30 mg/L, y 60 kg/ha-d |
| Carga máxima de sólidos suspendidos a tratar (para el sistema completo) | 20 mg/L, y 30 kg/ha-d 30 mg/L, y 50 kg/ha-d |
| Profundidad del agua | 0.6 - 0.9 m En zonas cubiertas completamente de vegetación. 1.2 - 1.5m Zonas con aguas abiertas 1.0m Zona de asentamiento en la entrada (opcional) |
| TRH mínimo (para Q_{max}) | 2 días en las zonas cubiertas completamente de vegetación. |
| TRH máximo (para Q_{med}) | 2-3 días en zonas con aguas abiertas |
| Número de celdas mínimo | 3 en cada tren |
| Número mínimo de trenes | 2 (a menos de que sea muy pequeño) |
| Geometría del estanque (relación de aspecto) | La optima es de 3:1 a 5:1 (pero esto depende de las limitaciones del sitio). En relaciones mayores a 10:1 probablemente se necesite calcular curvas de remanso. |
| Uso de zona de asentamiento en la entrada | Cuando el pretratamiento falle en retener partículas decantables |
| Entrada | Distribución uniforme a lo largo y ancho de la zona de entrada de la celda |
| Salida | Distribución uniforme a lo largo y ancho de la zona de salida de la celda |
| Carga en el vertedero de salida | $\leq 200 \text{ m}^3/\text{m}^*\text{d}$ |
| Vegetación emergente | Totoras (Typha o Scirpus) preferiblemente especies endémicas. |
| Vegetación sumergida | Potamogeton, Elodea, etc. |
| Porosidades de diseño | 0.65 para zonas cubiertas completamente de vegetación emergente 0.75 para zonas con menor densidad de población de vegetación emergente 1.0 para zonas con aguas abiertas |
| Hidráulica de las celdas | Cada celda debe ser completamente drenable Tubería flexible que conecte las celdas para permitir el mantenimiento Celdas independientes de puede llegar a maximizar el tratamiento |

¹⁵⁷ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 122.

4.2.1 Elección del tipo de humedal

La elección sobre los humedales es una disyuntiva que tiene muchas aristas, por lo cual en este apartado se discutirán algunas de ellas, pero conscientes de que se requiere un análisis profundo de cada situación.

La decisión de elegir un humedal FWS o SSF para aguas residuales municipales depende en el gasto del flujo, y las condiciones del sitio en el que se pretende construir el sistema. Por las tasas de reacciones mayores que se producen en los humedales SSF en cuestión de remoción de DBO y de nitrógeno, dichos humedales requieren menor área total de superficie que los humedales FWS para alcanzar los mismos objetivos de tratamiento. Sin embargo, todo esto depende del costo de acuerdo a las condiciones bajo las cuales se construirá el sistema.

En la mayoría de los casos los costos pueden llegar a favorecer a los humedales FWS ya que éstos por ser muy extensos suelen construirse en lugares relativamente lejanos. El equilibrio en costos entre estos dos humedales suele ocurrir en caudales de diseño menores a $378 \text{ m}^3/\text{d}$, y suelen ser más favorecedores para los humedales FWS en caudales arriba de $3785 \text{ m}^3/\text{d}$ ¹⁵⁸.

Aunque en muchos casos hay ciertas ventajas que podrían contrarrestar el costo en los humedales SSF como lo es el caso de que excluye la posibilidad de mosquitos u otros insectos molestos. Así como que elimina riesgos de contacto humano con el agua que está siendo tratada. Por otro lado, en el caso de climas extremadamente fríos, el suelo ofrece una protección térmica que no pueden ofrecer los humedales FWS¹⁵⁹.

Los dos casos que prevalecen con mayor “popularidad” son los humedales FWS y HSF. En la cultura de Norte América se ha intentado emular a los hábitats naturales por razones ecológicas (preservación de especies, construcción de ecosistemas, etc.), mientras que en Europa ha prevalecido una idea de que los humedales HSF son más eficientes y que estos tienen una menor huella ecológica en el ambiente¹⁶⁰.

4.2.2 Requerimientos del tratamiento anterior

Los humedales artificiales, como se ya ha dicho, son ecosistemas construidos por el hombre, que simulan a aquellos naturales. Es así que no son capaces de recibir cualquier nivel de concentración de contaminantes. Con lo cual el diseñador debe tener en cuenta esto que puede llegar a dañar o destruir al humedal. Por otro lado también, debido a las concentraciones producidas por el mismo humedal los requerimientos para la descarga podrían no cumplirse, lo cual es otro punto a tener en consideración.

Si bien es cierto que se tiene cierta documentación de algunas plantas que utilizan humedales como sistemas de tratamiento en los cuales hubo en algún momento ciertos contaminantes que han causado problemas como el disminuir o aniquilar la vegetación, o problemas de taponamiento no se tiene concentraciones exactas de en qué punto pueden llegar a causar problemas a excepción de un caso. Ahí está el caso de sólidos suspendidos excesivos que pueden provocar programas de mantenimiento más rigurosos o incluso taponamiento en los flujos subsuperficiales; o el caso de concentraciones altas de ciertos químicos provenientes de la industria, como sulfuros, incluso

¹⁵⁸ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 260.

¹⁵⁹ *Ibid.*, pág. 333.

¹⁶⁰ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 614.

nitrógeno y fósforo. En el caso del nitrógeno se habla de que alrededor de 100-200 mg/L este contaminante puede llegar a presentar un efecto de “quemadura” en las plantas¹⁶¹.

4.2.3 Humedales de flujo a superficie libre

Las ecuaciones siguientes tanto del modelo volumétrico como del modelo de carga por área, así como las del diseño hidráulico son según Crites (2014).

Diseño hidráulico

Para el diseño se tienen que hacer ciertas consideraciones que, si bien no se cumplen completamente, se tienen que hacer para facilitar el modelado. Las dos principales son las condiciones de flujo uniforme, con un movimiento uniforme en toda la extensión del sistema, y que el agua tiene contacto ilimitado con los organismos responsables por el tratamiento. El enfoque que se utiliza es el de construir la plantilla con una pendiente de fondo que permita el ajuste del nivel del agua al final del humedal, al mismo tiempo que pueda proveer la suficiente carga hidráulica para sobrepasar las fuerzas de fricción debidas a la vegetación y las capas del sustrato, desechos, o sedimentos.

Por otro lado, la relación de aspecto (largo:ancho) tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y la resistencia al flujo en el sistema. Relaciones de aspecto de 1:1 hasta 3:1 o 4:1 se consideran aceptables. Lo cual también ayuda a otras recomendaciones para evitar el acortamiento del recorrido por el flujo, como lo son el uso de múltiples celdas más pequeñas en lugar de una gran celda, y la construcción de zonas de aguas abiertas de redistribución del flujo.

Según Crites (2014) la ecuación de Manning (4-8) es altamente aceptada para el modelado hidráulico:

$$v = \frac{y^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (4-8)$$

En donde:

- v = Velocidad del flujo [$\frac{m}{s}$]
- n = Coeficiente de Manning [$\frac{s}{m^{\frac{1}{3}}}$]
- y = Tirante del canal [m]
- s = Pendiente de la plantilla [1]

La resistencia en la mayoría de las aplicaciones de los canales es en el perímetro mojado del canal, mientras que los humedales por la vegetación emergente la resistencia se extiende por toda la profundidad del canal. La relación entre el coeficiente de Manning y el factor de resistencia está definido por la ecuación (4-9)¹⁶²:

$$n = \frac{a}{y^{\frac{1}{2}}} \quad (4-9)$$

¹⁶¹ *Ibid.*, pág. 621-623.

¹⁶² Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 280-281.

En donde:

- a = Factor de resistencia [$s * m^{\frac{1}{6}}$]
- n = Coeficiente de Manning [$\frac{s}{m^{\frac{1}{3}}}$]
- y = Tirante del canal [m]

Los valores de “a” en humedales FWS se presentan en la tabla 4-18 los cuales han sido confirmados experimentalmente por Dombeck et al. (1997).

Tabla 4-18. Valores del factor de resistencia “a” para humedales FWS. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 282.

| Vegetación | Tirante | Valor de a |
|----------------------------|----------|-------------------------------------|
| Escasa, baja densidad | y > 0.4m | a = 0.487 [$s * m^{\frac{1}{6}}$] |
| Moderada, mediana densidad | y ≥ 0.3m | a = 1.949 [$s * m^{\frac{1}{6}}$] |
| Abundante, alta densidad | y < 0.3m | a = 7.795 [$s * m^{\frac{1}{6}}$] |

Reed et al. (1995) desarrollaron un modelo para estimar la longitud deseable para el canal de un humedal FWS:

$$L = \left(\frac{(86400) * (A_s * y^{2.667} * m^{0.5})}{a * Q_a} \right)^{0.667} \quad (4-10)$$

En donde:

- L = Longitud máxima de la celda [m]
- A_s = Área de diseño del humedal [m²]
- y = Tirante del humedal [m]
- m = Porción disponible de la pendiente para proveer la carga hidráulica [% como decimal]
- a = Factor de resistencia [$s * m^{\frac{1}{6}}$]
- Q_A = Flujo medio del humedal [$\frac{m^3}{d}$]

Un valor inicial de m entre 10 y 20% se sugiere para asegurar una reserva como un factor de seguridad.

Para el flujo medio, una ecuación muy aceptada es la 4-11. Es importante decir que dicha ecuación es una simplificación, y que no considera pérdidas o ganancias una vez en el sistema.

$$Q_A = \frac{(Q_E + Q_S)}{2} \quad (4-11)$$

En donde:

$$\begin{aligned} Q_A &= \text{Flujo medio del humedal } \left[\frac{m^3}{d}\right] \\ Q_E &= \text{Flujo de entrada del humedal } \left[\frac{m^3}{d}\right] \\ Q_S &= \text{Flujo de salida del humedal } \left[\frac{m^3}{d}\right] \end{aligned}$$

Modelos de diseño y calidad del efluente

Tres modelos fueron comparados en el manual “Water Environment Federation’s Manual of Practice” (WEF 2010), los cuales se basan en un análisis de datos, y balances de masa en la entrada y salida del humedal. Todos ellos toman la forma de un modelo de primer orden de flujo pistón. Sin embargo, los modelos no consideran las complejas relaciones e interacciones que se dan en los humedales, y en su lugar usan un índice aparente, conglomerado, y constante que pueda representar los cambios en concentración y masa entre la entrada y salida del sistema. Este enfoque, hasta el momento, es el mejor que se puede hacer dada la cantidad de información y datos obtenidos en la investigación que se ha realizado. Estos modelos pueden ser considerados equivalentes, y aunque se debería esperar que dieran resultados similares, no es así. Esto, en parte debido a que no fueron desarrollados por el mismo “paquete” de datos, y a la diferencia en estructura y contenido de los modelos. Los modelos pueden dividirse en dos tipos: los modelos volumétricos desarrollados por Reed et al. (1995), y por Crites y Tchobanoglous (1998), y los modelos de carga por área desarrollados por Kadlec y Knight (1996).

Según Crites (2014) las ecuaciones básicas para ambos modelos son las siguientes tres:

$$\frac{C_S}{C_0} = e^{-K_T * t} \quad (4-12)$$

En donde:

$$\begin{aligned} C_S &= \text{Concentración del contaminante en el efluente } \left[\frac{mg}{L}\right] \\ C_0 &= \text{Concentración del contaminante en el influente } \left[\frac{mg}{L}\right] \\ K_T &= \text{Constante de reacción de primer orden (depende de la temperatura) } [d^{-1}] \\ t &= \text{Tiempo de retención hidráulica } [d] \end{aligned}$$

El tiempo de retención hidráulica de la ecuación anterior se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L * W * y * \varepsilon}{Q} \quad (4-13)$$

En donde:

- t = Tiempo de retención hidráulica [d]
- L = Largo de la celda del humedal [m]
- W = Ancho de la celda del humedal [m]
- y = Profundidad de la celda del humedal [m]
- ε = Espacio disponible en el humedal para que el agua fluya [% en decimal]
- Q = Caudal promedio que fluye en el humedal [$\frac{m^3}{d}$]

Y dado que el área es:

$$A_S = L * W \quad (4-14)$$

Entonces sustituyendo la ecuación 4-14 en la 4-13, y esta a su vez en la 4-12 y después despejando A_S nos da la siguiente ecuación:

$$A_S = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C_S}\right)}{K_T * y * \varepsilon} \quad (4-15)$$

Modelo volumétrico

El modelo volumétrico tiene dos ventajas principales. La primera es estar diseñado con base en el flujo promedio que fluye por el sistema, lo que permite una compensación de ganancias y pérdidas de agua debidas a la precipitación y evapotranspiración. La segunda es que el factor de seguridad y las concentraciones de fondo (irreducibles) son tratadas como condiciones externas de frontera y no tienen un impacto limitante en los resultados matemáticos del modelo.

Entre las desventajas pueden avistarse tres importantes. El proceso de diseño requiere el conocimiento del tirante en el canal, lo que puede ser difícil controlar en sistemas muy grandes o largos, y que es muy probable que se modifique a largo plazo. La “porosidad” de la vegetación y el desecho acumulado debe conocerse. Y aunque existen datos, estos son pocos y al igual que el tirante tienden a cambiar a largo plazo. Se asume que la remoción de DBO depende de la temperatura a pesar de que datos de humedales que se encuentran operando sugieren que no exista dicha relación.

Es importante recalcar que en este modelo las concentraciones de fondo (las cuales serán dadas más adelante para cada contaminante) representan una condición externa y ninguno de estos modelos debería ser resuelto para concentraciones menores a aquellos niveles de fondo.

Si lo que se desea en vez de predecir la calidad del efluente del sistema es dimensionarlo, lo que se debe calcular es el área para cada parámetro, y el área que resulte mayor de todos los parámetros será el área requerida para el humedal. Con esto, el humedal, entonces, debe ser capaz de dar tratamiento aceptable a los demás parámetros.

Es muy común que en los proyectos de ingeniería se utilice un factor de seguridad, el que en este modelo se aplica al finalizar los cálculos al área final, lo cual significará un incremento considerable en ésta. Este factor en humedales varía de 15 a 25%.

El modelo de predicción de la calidad para la remoción de DBO5, del nitrógeno amoniacal y el nitrato es la ecuación 4-2. De la misma forma la ecuación del área necesaria es la 4-15, mientras que la 4-16 es para determinar la constante del contaminante a determinada temperatura:

$$\frac{C_S}{C_0} = e^{-K_T * t} \quad (4-12)$$

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T_w - 20)} \quad (4-16)$$

$$A_S = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C_S}\right)}{K_T * y * \varepsilon} \quad (4-15)$$

En donde:

- C_S = Concentración del contaminante en el efluente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
- C_0 = Concentración del contaminante en el influente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
- K_T = Constante de reacción de primer orden (depende de la temperatura) $[d^{-1}]$
- t = Tiempo de retención hidráulica $[d]$
- K_{20} = Constante del contaminante a 20° $[d^{-1}]$
- θ = Factor de corrección de temperatura $[1]$
- T_w = Temperatura promedio en el humedal del periodo en cuestión $[^{\circ}C]$
- A_S = Área de tratamiento del humedal (Área de la plantilla) $[m^2]$
- Q = Caudal promedio del humedal (ecuación 4.11) $\left[\frac{m^3}{d}\right]$
- y = Profundidad promedio del agua en el humedal $[m]$
- ε = Espacio disponible en el humedal para que el agua fluya [% en decimal]

La tabla 4-19 contiene valores comunes para los distintos parámetros en las ecuaciones 4-12, 4-15, y 4-16.

Tabla 4-19. Constantes para los contaminantes en los que aplica la ecuación 4-12. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 290, 291.

| Parámetro | Valor | Notas |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ε (Espacio disponible en el humedal para que el agua fluya) [% en decimal] | 0.7 – 0.9 | |
| y (profundidad) [m] | 0.3 - 0.6 | |
| Remoción de DBO₅ | | |
| K ₂₀ [d ⁻¹] | 0.678 | |
| θ | 1.06 | |
| Concentración de fondo [$\frac{mg}{L}$] | 6 | |
| Remoción de amoniaco | | |
| K _T (a 0°) | 0 | Se considera prudente asumir que todo el nitrógeno Kjeldahl (del agua residual municipal) que entra al humedal puede aparecer como amoniaco, entonces C ₀ =TKN |
| K ₂₀ (para 1°C o mayor) | 0.2187 | |
| θ | 1.048 | |
| Concentración de fondo [$\frac{mg}{L}$] | 0.2 | |
| Remoción del nitrato | | |
| K _T (a 0°)[d ⁻¹] | 0 | Asumir que todo el amonio removido en el paso anterior puede aparecer como nitrato es una consideración conservadora que suele hacerse comúnmente, por lo cual la concentración C ₀ es igual al CS del paso anterior más la concentración de nitrato en el influente. |
| K ₂₀ (para 1°C o mayor) | 1.0 | |
| θ | 1.15 | |
| Concentración de fondo [$\frac{mg}{L}$] | 0.2 | |

La ecuación para la remoción de los sólidos suspendidos totales es la siguiente:

$$\frac{C_S}{C_0} = 0.1139 + 0.00213 * q \quad (4-17)$$

En donde:

$$q = \text{Tasa de carga hidráulica } [0.1 \frac{mm}{d}]$$

Para la remoción de nitrógeno total no existe una ecuación específica por lo cual se considera a la concentración de nitrógeno total en el efluente a la suma de las concentraciones de amoniaco y nitrato a la salida del sistema¹⁶³ (ecuación 4-18).

$$C_{S/NT} = C_{S/nitrato} + C_{S/amoniaco} \quad (4-18)$$

La ecuación para la remoción del fósforo total es la siguiente:

¹⁶³ *Ibid.*, pág. 288-291.

$$\frac{C_S}{C_0} = e\left(-\frac{K_p}{q}\right) \quad (4-19)$$

En donde:

$$q = \text{Tasa de carga hidráulica } \left[\frac{cm}{d}\right]$$

Y dado que esta ecuación no depende de la temperatura:

$$K_p = 2.73 \left[0.1 \frac{mm}{d}\right]$$

$$\text{Concentración de fondo} = 0.05 \left[\frac{mg}{L}\right]$$

La ecuación para la remoción de coliformes fecales es la siguiente:

$$\frac{C_S}{C_0} = \left[\frac{1}{1 + K_T * t} \right]^x \quad (4-20)$$

En donde:

$$t = \text{TRH (Tiempo de retención hidráulica)}$$

$$C_s, C_0 = \text{Concentraciones } \left[\frac{MPN}{100mL}\right] \text{ (MPN=Número más probable)}$$

$$x = \text{Número de celdas en serie}$$

$$K_{20} = 2.6 [d^{-1}]$$

$$\theta = 1.19$$

$$\text{Concentración de fondo} = 2000$$

Nota: Este modelo fue desarrollado para las lagunas facultativas y da resultados conservadores.

La ecuación para la obtención de la tasa de carga hidráulica es la siguiente (4-21), de la cual se puede despejar el área requerida por el humedal si eso es lo que se necesita.

$$q = \frac{Q}{A_S} \quad (4-21)$$

En donde:

$$q = \text{Tasa de carga hidráulica } \left[\frac{m}{d}\right]$$

$$Q = \text{Caudal promedio del humedal (ecuación 4.11) } \left[\frac{m^3}{d}\right]$$

$$A_S = \text{Área de tratamiento del humedal (Área de la plantilla) } [m^2]$$

Modelo de carga por área

Como ventajas para este modelo se distinguen dos. El modelo está basado en la carga de masa sobre la superficie del humedal, y por tanto, la profundidad del agua, que es difícil de determinar en sistemas grandes, no es necesaria para los cálculos del modelo. Además, estos modelos son matemáticamente flexibles, esto es, que los datos existentes pueden encajar mejor en un modelo de dos variables (K , C^*) que en un modelo de una sola variable (K) como lo es el modelo volumétrico.

Por otra parte, el modelo solo considera el influente del humedal, lo cual no considera ganancias y pérdidas en volumen en los cálculos. Además, este modelo está basado en una gran cantidad de datos de humedales que se utilizan para “pulir” el agua y por tanto con cargas de contaminantes pequeñas lo que resulta en valores de “ K ” bajos, que a su vez resulta en sistemas innecesariamente grandes. Y por último, La posición en la ecuación de las concentraciones de fondo (C^*) y el factor de seguridad (z) terminan resultando en tamaños excesivamente grandes para alcanzar concentraciones bajas de contaminantes.

Si lo que se desea en vez de predecir la calidad del efluente del sistema es dimensionarlo, lo que se debe calcular es el área para cada parámetro y el área que resulte mayor de todos los parámetros será el área requerida para el humedal. Con esto, el humedal entonces debe ser capaz de dar tratamiento aceptable a los demás parámetros. Las concentraciones de fondo y el factor de seguridad ya se incluyen en las ecuaciones por lo cual el área resultante de los cálculos es el área final, y no se tiene que hacer ningún cálculo adicional como en el modelo anterior.

Hay que tener en cuenta, también, que por la posición interna de las concentraciones de fondo (C^*) no es posible diseñar un humedal en el que el efluente tenga los valores de las concentraciones de fondo ya que a medida que la concentración requerida en el efluente se acerca a las concentraciones de fondo, el área requerida se “acerca” al infinito¹⁶⁴.

El modelo de predicción de la calidad para la remoción de todos los contaminantes es la ecuación 4-22, de la misma forma la ecuación del área necesaria es la 4-23, mientras que la 4-16 es para determinar la constante del contaminante a determinada temperatura:

$$\frac{C_S - C^*}{C_0 - C^*} = e^{\left(-\frac{K_T}{q_A}\right)} \quad (4-22)$$

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (4-16)$$

$$A_S = \left(-\frac{Q_0}{K_T}\right) * \ln\left[\frac{C_S * z - C^*}{C_0 - C^*}\right] \quad (4-23)$$

¹⁶⁴ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 289-294.

En donde:

- C_s = Concentración del contaminante en el efluente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
- C_0 = Concentración del contaminante en el influente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
- C^* = Concentración de fondo $\left[\frac{mg}{L}\right]$
- q_A = Tasa de carga hidráulica anual $\left[\frac{m}{año}\right]$
- K_T = Constante a la temperatura T $\left[\frac{m}{año}\right]$
- K_{20} = Constante a la temperatura 20° $\left[\frac{m}{año}\right]$
- θ = Factor de corrección de temperatura [1]
- T = Temperatura promedio en el humedal del periodo en cuestión [$^{\circ}C$]
- A_s = Área de tratamiento del humedal (Área de la plantilla) [m^2]
- Q_0 = Caudal anual promedio del influente del humedal $\left[\frac{m^3}{año}\right]$
- z = Factor de seguridad

Las constantes para los contaminantes en los que aplica la ecuación 4-22 se muestran en la tabla 4-20.

Tabla 4-20. Constantes para los contaminantes en los que aplica la ecuación 4-22. Modificado de fuente: Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 292, 293.

| Parámetro | Valor | Notas |
|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Remoción de DBO₅ | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 34 | El modelo no puede resolverse cuando las concentraciones del influente se acercan a las concentraciones de fondo. |
| θ | 1.0 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 3.5+0.0053C ₀ | |
| θ _z (para C*) | 1.0 | |
| z | 0.59 | |
| Remoción de sólidos suspendidos totales | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 1000 | El modelo no se puede resolver con valores bajos en el efluente. Es decir si se requiere una concentración de 15 mg/L a la salida, a la entrada la concentración no puede exceder los 17mg/L |
| θ | 1.0 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 5.1+0.16C ₀ | |
| θ _z (para C*) | $C_T = C_{20} * \theta^{T-30}$ | |
| z | 0.526 | |
| Remoción del nitrógeno orgánico | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 17 | |
| θ | 1.05 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 1.5 | |
| z | 0.555 | |
| Remoción de amoniaco | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 18 | |
| θ | 1.04 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 0 | |
| z | 0.4 | |
| Remoción del nitrato | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 35 | |
| θ | 1.09 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 0 | |
| z | 0.4 | |
| Remoción del nitrógeno total | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 22 | |
| θ | 1.09 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 1.5 | |
| z | 0.625 | |
| Remoción del fósforo total | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 12 | |
| θ | 1.0 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 0.02 | |
| z | 0.555 | |
| Remoción de coliformes fecales | | |
| K ₂₀ [$\frac{m}{año}$] | 0.555 | |
| θ | 1.0 | |
| C* [$\frac{mg}{L}$] | 300 | |
| z | 0.333 | |

4.2.4 Humedales de flujo subsuperficial

Las ecuaciones siguientes tanto del modelo volumétrico como del modelo de carga por área, así como las del diseño hidráulico son según Crites (2014).

Diseño hidráulico

La ecuación de la ley de Darcy, que describe el flujo en un medio poroso, es comúnmente aceptada para el diseño de humedales SSF en los que se usan suelos o gravas como medio filtro. Sin embargo, la ecuación hace ciertas suposiciones como que el régimen de flujo es laminar, constante, y uniforme en todo el sistema. Por lo cual, si existen desigualdades de porosidad, un gradiente hidráulico muy grande, o la construcción es deficiente, las condiciones no se cumplen completamente y habrá variaciones en los resultados. Las recomendaciones generales son: el uso de tamaños de gravas de pequeñas a medianas, que el sistema dependa de un gradiente hidráulico relativamente pequeño, que se reconozcan las entradas y salidas de agua, y que se intente a toda costa evitar que el flujo acorte el circuito de tratamiento.

En el caso en que el flujo sea turbulento (cuando se usan tamaños grandes de gravas) un enfoque con la ecuación de Ergun es más apropiada.

La ecuación de Darcy se define como sigue:

$$v = k_s * S \quad (4-24)$$

Y como la velocidad se puede definir de forma general para flujos como:

$$v = \frac{Q}{W * y} \quad (4-25)$$

Entonces el gasto puede verse como:

$$Q = k_s * A_t * S \quad (4-26)$$

En donde:

- v = Velocidad de Darcy en el área transversal $[\frac{m}{d}]$
- k_s = Permeabilidad perpendicular en la dirección del flujo $[\frac{m^3}{m^2 * d}]$
- S = Gradiente hidráulico o pendiente de la plantilla $[\frac{m}{m}]$
- Q = Caudal promedio del humedal $[\frac{m^3}{d}]$
- W = Ancho de la celda del humedal $[m]$
- y = Tirante del humedal (profundidad promedio) $[m]$
- A_t = Área transversal total (perpendicular al flujo) $[m^2]$

La resistencia al flujo es causada principalmente por el sustrato y, en el largo plazo, las raíces de las plantas y los residuos no degradables atrapados en los poros del medio. La relación de aspecto (largo:ancho) también aumenta la resistencia al flujo conforme la longitud crece. Muchos humedales

SSF han tenido problemas de flujo superficial a causa de que esta relación en ocasiones llega a ser muy grande (10:1 o más) y el gradiente hidráulico no llega a suministrar la suficiente carga para mantener el flujo subsuperficial. Reed et al. (1995) desarrollaron un modelo que puede ser usado para estimar el mínimo ancho aceptable en un humedal SSF.

$$W = \frac{\left[\frac{(Q * A_t)}{m * k_s} \right]^{0.5}}{y} \quad (4-27)$$

En donde:

- W = Ancho de la celda del humedal [m]
- Y = Tirante en el humedal (profundidad promedio) [m]
- Q = Flujo promedio en el humedal [$\frac{m^3}{d}$]
- A_s = Área de diseño (de la plantilla del humedal) [m²]
- m = Porción del gradiente hidráulico utilizado para proveer la carga necesaria al flujo [% como decimal]
- K_s = Coeficiente de permeabilidad [$\frac{m^3}{m^2 * d}$]

Existen dos recomendaciones que se utilizan como factor de seguridad para evitar contingencias como la aparición de flujo superficial, o el taponamiento del medio. La primera es que el valor de “m” típicamente varía de 5 a 20% de la potencial carga disponible, y la segunda es que no se utilice en la ecuación más de un tercio de la permeabilidad del medio. Esto tiene como efecto limitar la relación de aspecto a valores relativamente bajos (<3:1 para profundidades de aproximadamente 122 cm y 0.75:1 para profundidades de aproximadamente 61 cm).

Es importante recalcar que la permeabilidad y la porosidad debe obtenerse a través de un laboratorio para el medio específico que se planea usar.

Modelos de predicción de la calidad del efluente

Los modelos para los flujos subsuperficiales se basan en los mismos modelos anteriores con pequeñas variaciones, y por supuesto, las constantes varían ya que estas dependen de las características del agua residual y de las condiciones en el humedal.

Modelo volumétrico

La ecuación de la remoción de DBO, amoníaco, y nitrato (eliminado por medio de la nitrificación) puede escribirse de la siguiente forma, aunque es la misma que la ecuación 4-12:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_s)}{K_T * y * n} \quad (4-28)$$

En donde:

- A_s = Área del humedal [m^2]
- Q = Flujo promedio de diseño [$\frac{m^3}{d}$]
- C_0 = Concentración de DBO₅ en el influente [$\frac{mg}{L}$]
- C_s = Concentración de DBO₅ en el influente [$\frac{mg}{L}$]
- K_T = Constante del contaminante a la temperatura T [d^{-1}]
- y = Profundidad [m]
- n = Porosidad [% en decimal]

La constante K_T para la DBO puede calcularse a través de la ecuación 4-16:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (4-16)$$

En donde:

- K_{20} = 1.1 [d^{-1}]
- θ = 1.06
- T = Temperatura [$^{\circ}C$]

La constante de temperatura para la remoción de amoníaco está dada por las siguientes tres relaciones:

Cuando $T = 0^{\circ}C$

$$K_0 = 0[d^{-1}] \quad (4-29)$$

Para cuando $T = 1^{\circ}C$

$$K_T = K_{NH} * (0.4103)[d^{-1}] \quad (4-30)$$

Para cuando $T > 1^{\circ}C$

$$K_T = K_{NH} * (1.048)^{T-20}[d^{-1}] \quad (4-31)$$

La ecuación siguiente es para el término K_{NH} (constante de nitrificación a 20°C):

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922 * (r_Z)^{2.6077} \quad (4-32)$$

En donde:

$$\begin{aligned} K_{NH} &= \text{Constante de nitrificación a } 20^{\circ}\text{C } [d^{-1}] \\ r_z &= \text{Fracción de la cama de sustrato ocupada por la zona de raíces } [\% \text{ en decimal}] \end{aligned}$$

Para el caso de la remoción de nitrato, la constante es como sigue:

$$\text{Cuando } T = 0^{\circ}\text{C: } K_T = 0 [d^{-1}] \quad (4-33)$$

$$\text{Cuando } T \geq 1^{\circ}\text{C: } K_T = 1.15^{T-20} \quad (4-34)$$

La ecuación de la remoción de sólidos suspendidos está relacionada con la tasa de carga hidráulica y es muy parecida a la ecuación 4-17 con variación en los coeficientes como sigue:

$$C_S = C_0 * (0.1058 + 0.0011 * q) \quad (4-35)$$

En donde:

$$\begin{aligned} C_S &= \text{Concentración de TSS en el influente } \left[\frac{mg}{L}\right] \\ C_0 &= \text{Concentración de TSS en el influente } \left[\frac{mg}{L}\right] \\ q &= \text{Tasa de carga hidráulica } \left[\frac{cm}{d}\right] \end{aligned}$$

La determinación del área requerida para producir un efluente específico de nitrógeno total se realiza a través de un proceso iterativo, usando la ecuación 4-28 para ambos, la remoción de amoníaco y de nitrato. Primero, se asume un valor de C_S para amoníaco, se resuelve la ecuación 4-28 y se calcula el tiempo de retención hidráulica. Segundo, se asume que la concentración removida de amoníaco (la resta de C_0 menos C_S) es el influente de la ecuación 4-28 para la remoción de nitrato y despejar la concentración en el efluente (C_S). Por último, la concentración de nitrógeno total en el efluente es la suma de las concentraciones a la salida del nitrato y el amoníaco. Si la concentración no es la requerida se vuelven a realizar los cálculos hasta que éstas se igualen.

Modelo de carga por área

Recordando un poco, la situación más simple sobre la cual se puede trabajar es cuando no existen pérdidas ni ganancias de flujo, o cuando éstas se compensan (es decir precipitación = evapotranspiración + filtración). Este modelo considera dichas condiciones para que puede aplicarse.

La ecuación 4-36 es una variante de la ecuación ya vista en el apartado de humedales de flujo FWS (4-22). Es importante recalcar que está ecuación también puede usarse con los humedales FWS, y aunque los resultados tendrán ciertas variaciones, éstas no son muy grandes.

$$\frac{C_S - C^*}{C_0 - C^*} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_T}{N * q}\right)^N} \quad (4-36)$$

En donde:

- C_s = Concentración del contaminante en el influente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
 C_0 = Concentración del contaminante en el influente $\left[\frac{mg}{L}\right]$
 C^* = Concentración de fondo del contaminante $\left[\frac{mg}{L}\right]$
 K_T = Constante del contaminante a la temperatura T (puede calcularse con la ecuación 4.16) $\left[\frac{m}{d}\right]$
 N = Número de celdas de humedales en serie
 q = Tasa de carga hidráulica $\left[\frac{m}{d}\right]$

4.3 Construcción

Los elementos constructivos en los humedales artificiales son los mismos que los utilizados en las plantas de tratamiento con lagunas, con una sola diferencia. Es decir, bermas laterales hechas de tierra para contener el flujo y que no se desborde, y el revestimiento impermeable para evitar filtraciones. La gran diferencia entonces son las estructuras de control de flujo, que permiten que el flujo se distribuya de manera uniforme a lo largo del humedal¹⁶⁵.

Sin embargo, los elementos expuestos en este apartado son únicos de los humedales, y requieren especial atención. Una recomendación especial es tener cuidado con la plantación de la vegetación, que no siempre está entre las especificaciones de los contratistas. Se debe hacer explícita la responsabilidad de éstos en el contrato o hacer los arreglos para que la vegetación tenga un responsable entre las dos partes o de una tercera¹⁶⁶.

4.3.1 Bermas y diques

El propósito de las bermas es el contener el agua dentro de patrones de flujo específicos, así como impedir la intromisión de agua de otra proveniencia que pueda llegar a afectar el funcionamiento normal de las celdas de humedales¹⁶⁷.

Hay dos tipos de bermas que se utilizan para los humedales. Las interiores, que son las que se encargan que el flujo de agua siga el curso asignado, y las exteriores, que son las que se encargan de no permitir la entrada de otro flujo no regulado al sistema de humedales¹⁶⁸. Generalmente, las bermas internas tienen una pendiente lateral interior de 3:1 con un mínimo de 2 pies (60cm) de bordo libre (se debe considerar un bordo libre adicional si el humedal está diseñado para trabajar con flujos de grandes variaciones). Por otro lado, las bermas externas suelen tener la misma relación de pendiente, pero deben tener un ancho mínimo de 3m en la parte superior con una capa de grava, y un bordo libre de 0.6-1 m. Esto permitirá el paso de ciertos vehículos para llevar a cabo algún tipo de mantenimiento. En ambos casos, dichas bermas deben ser compactadas, lo que evitará que puedan llegar a ser afectadas por hoyos debidos a los animales o raíces de la vegetación. También es recomendable

¹⁶⁵ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing. Pág. 296.

¹⁶⁶ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 122.

¹⁶⁷ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 668.

¹⁶⁸ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 122.

realizar un balance de masas para el movimiento de tierras, lo que evitará que se hagan viajes innecesarios de acarreo de material¹⁶⁹.

Las dos figuras siguientes (4-16 y 4-17) muestran las características típicas para las bermas interiores y exteriores.

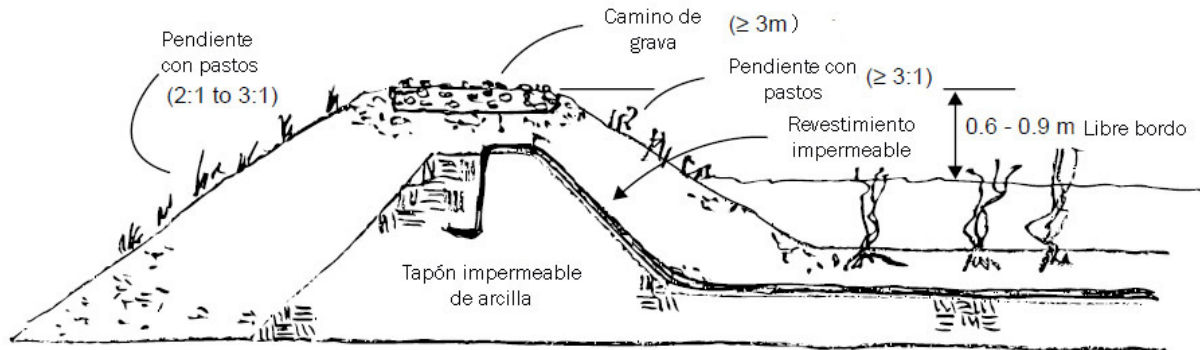


Figura 4-16. Ejemplo de berma exterior construida. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 123.

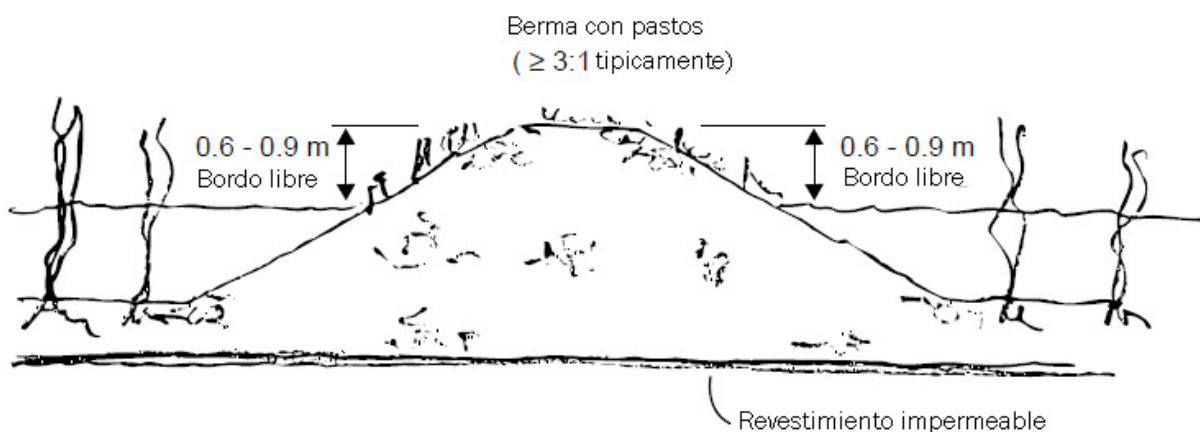


Figura 4-17. Ejemplo de berma interior construida. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 123.

4.3.2 Revestimiento impermeable y sustratos

Hay distintos revestimientos que pueden utilizarse como suelos con grandes cantidades de arcilla u otros materiales sintéticos como el polivinilo de cloruro (PVC) o el polietileno de alta densidad (HDP), que han sido utilizados con gran éxito. Otro material también utilizado con buenos resultados es la bentonita, la cual se mezcla con otros suelos en el sitio, se gradúa y se compacta, aunque también existen elementos prefabricados. En el caso de la arcilla, ésta debe tener un mínimo de 30cm de espesor para que pueda funcionar como barrera hidráulica, y por supuesto debe compactarse para evitar la penetración de las raíces (especialmente de la vegetación emergente)¹⁷⁰. En caso de utilización de otro tipo de materiales naturales, la permeabilidad recomendada es menor a 10^{-6} cm/s.

¹⁶⁹ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 295; U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 123.

¹⁷⁰ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 296-297.

Para el caso del sustrato, éste debe ser agronómico para permitir la reproducción de las plantas, debe tener al menos 150mm de espesor, y la pendiente debe ser igual o menor a 1%. Otras recomendaciones son poner un geotextil o capa de arena de aproximadamente 5cm arriba del revestimiento impermeable si se utilizan rocas trituradas como cama en humedales SSF, mientras que también se debe tener en cuenta que la capacidad de carga de los revestimientos no debe excederse, siendo la de la mayoría de 2 200 kg/m² (450 lbs/ft²).

4.3.3 Estructuras de control de entrada y salida del flujo

Estas estructuras distribuyen el flujo a lo largo y ancho del humedal, previenen zonas muertas, y controlan la profundidad del agua. La distribución de la entrada y la salida del flujo tienen una gran injerencia en los patrones de flujo que pueden llegar a presentarse en los humedales. La figura 4-18 muestra de forma gráfica las diferencias en los patrones de flujo que puede haber de acuerdo a las estructuras utilizadas.

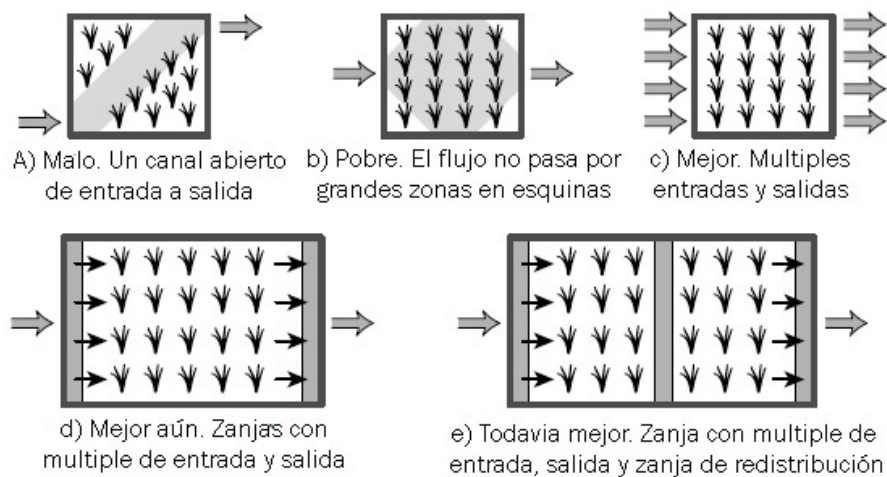


Figura 4-18. Distribución de los flujos de acuerdo a las estructuras de entrada, salida y redistribución. Modificado de fuente: Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 659.

La estructura de entrada y salida, en humedales pequeños y medianos, puede simplificarse a un tubo perforado. Por otro lado, para evitar problemas de taponamiento se sugiere que dicha entrada se encuentre por debajo de la superficie libre del agua de 1–1.3 m (3–4 ft). Si el múltiple de salida está sumergido, éste debe estar conectado a un dispositivo de control del nivel, que permite ajustar la profundidad del agua del humedal. Este dispositivo puede regularse a través de una compuerta, una sección intercambiable, un codo giratorio, o un vertedero ajustable¹⁷¹.

Las figuras 4-11, 4-20 y 4-21 muestra los tres tipos de entradas más comunes, mientras que las figuras 4-22, 4-23 y 4-24 muestran los tres tipos de salidas más comunes.

¹⁷¹ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 93, 122-124.

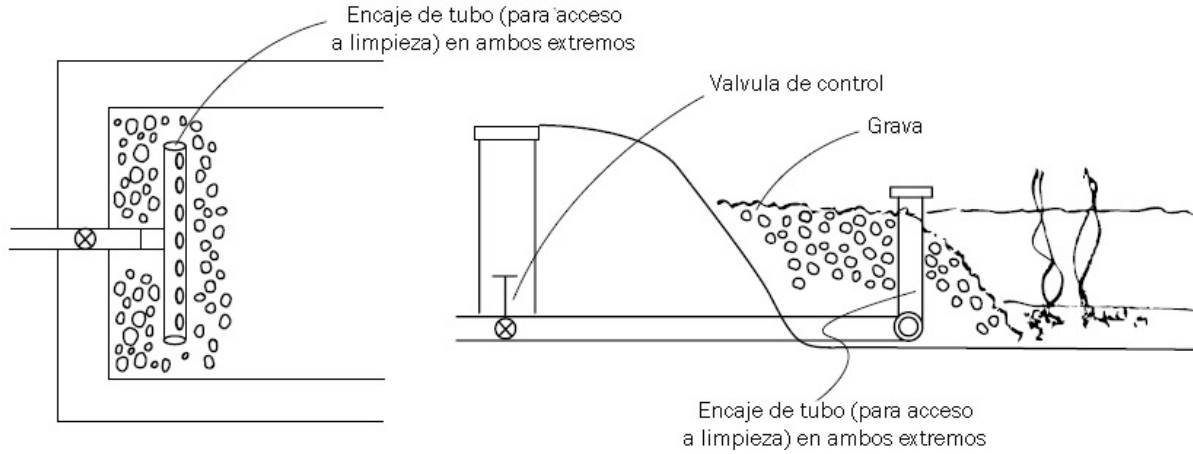


Figura 4-19. Entrada por tubo perforado sumergido. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 125.

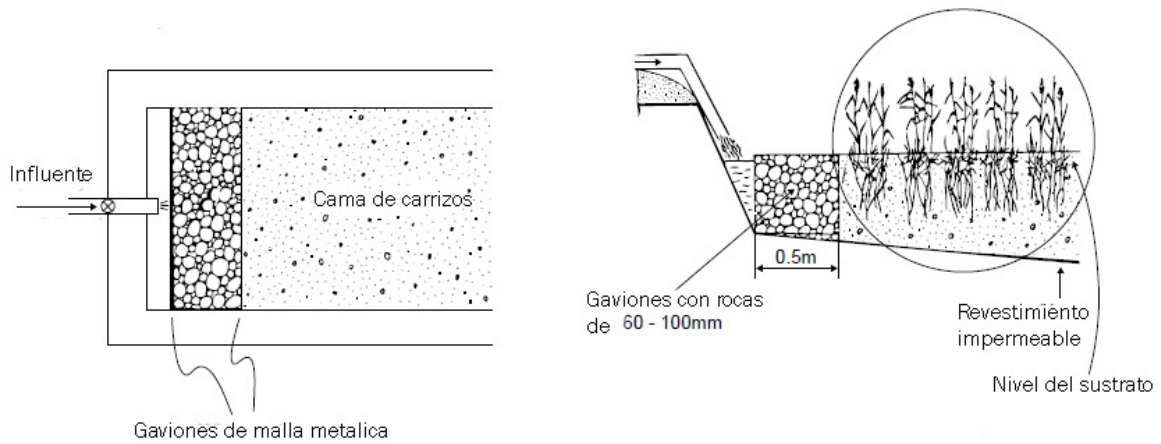


Figura 4-20. Entrada por gaviones de rocas. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 125.

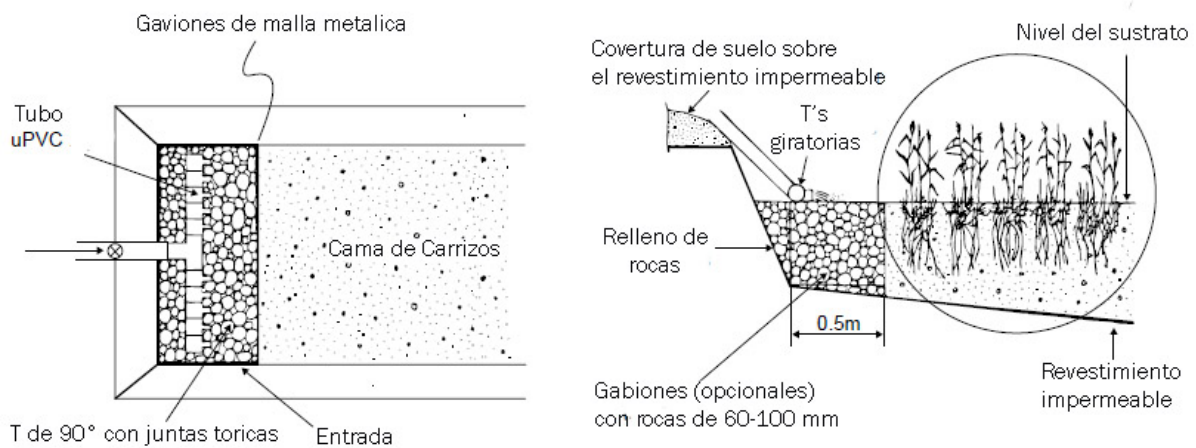


Figura 4-21. Entrada por T giratoria. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 125.

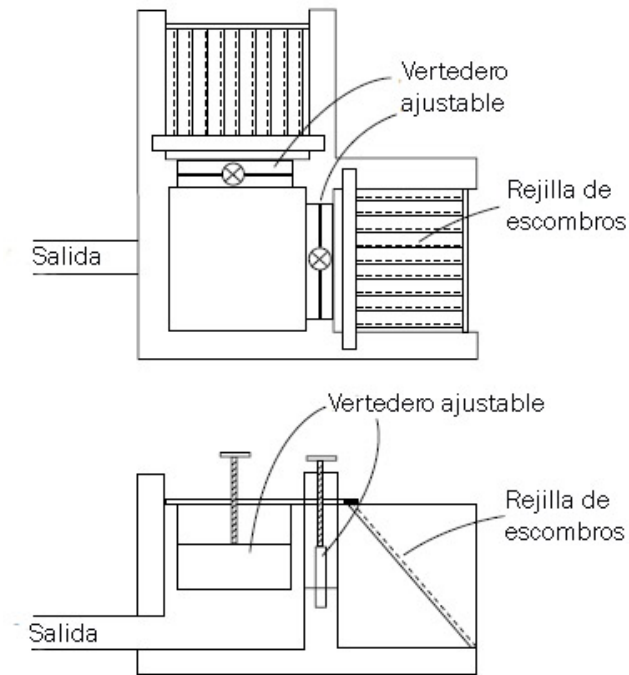


Figura 4-22. Salida por vertedero ajustable. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 126.

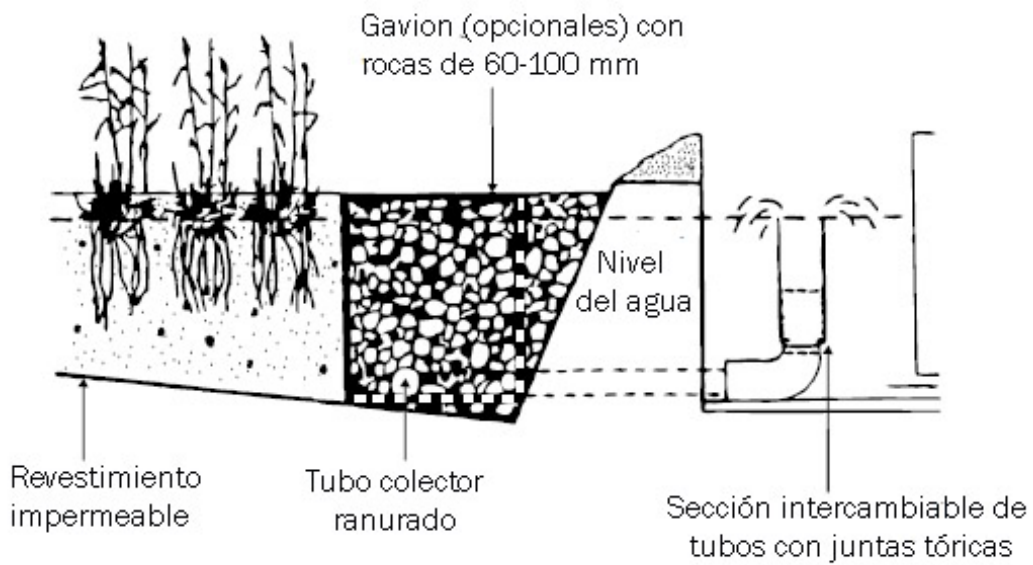


Figura 4-23. Salida por sección intercambiable. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 126.

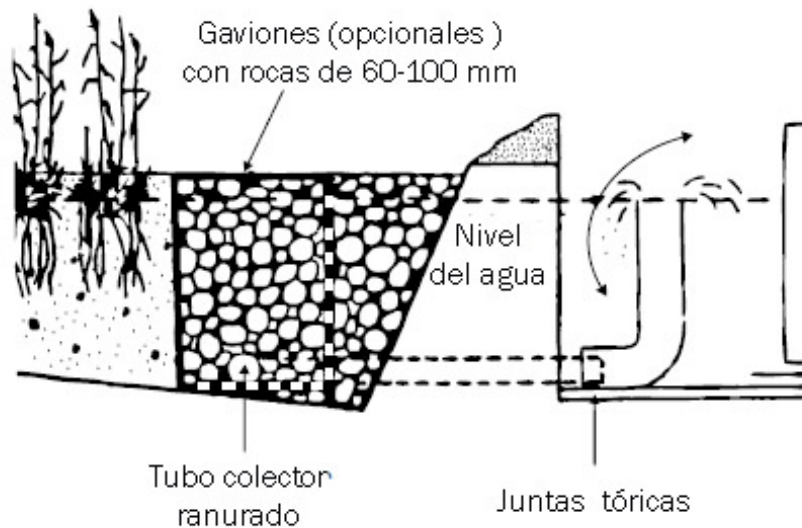


Figura 4-24. Salida por arreglo de codo de 90°. Modificada de fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 126.

4.4 Operación, mantenimiento y control

Los sistemas de humedales FWS siempre son diseñados para que el mantenimiento y los costos asociados sean bajos, aunque la situación es un tanto distinto con los humedales HSF y VF en los que requieren mayores planes de mantenimiento durante todo el periodo de vida. Por otro lado, mientras que el monitoreo de los flujos, del nivel del agua y su calidad, y otros parámetros biológicos son actividades de periodicidad diaria, otras actividades como la reparación de equipo electromecánico, el manejo de la vegetación, el control de plagas y la remoción de minerales sólidos acumulados tienen frecuencias más alejadas¹⁷².

Para el inicio de los humedales se pueden distinguir tres etapas muy claras: la fase de arranque, la fase de estabilización y la fase de operaciones rutinarias.

La etapa de arranque. Las plantas necesitan de este periodo de espera para desarrollarse y poder adaptarse a las nuevas condiciones, que en condiciones ideales no debe ser menor a 6 semanas ya que de otra forma podría haber un daño a las plantas, y a largo plazo el humedal tardaría más en alcanzar los objetivos de tratamiento. Cuando el inicio se ha dado, el agua tiene que regularse para que el nivel permanezca debajo de la parte superior de las plantas emergentes y si el efluente del tratamiento anterior está muy pesado en contaminantes, el flujo debe diluirse con agua limpia para que no sobrecarguen a las plantas. Al menos hasta que las plantas terminen de aclimatarse.

Durante la etapa de estabilización y también en la de arranque los parámetros de remoción no serán los mismos que los parámetros finales para los cuales se diseñó el humedal. Esto es, la remoción de los sólidos suspendidos y la DBO será mucho menor al inicio y conforme pasa el tiempo irá mejorando. Por el contrario, la remoción del fósforo y el nitrógeno que inicia en valores más altos que los esperados, después va decreciendo hasta alcanzar el equilibrio. A pesar de que el periodo de transición depende del tipo de humedal, la extensión de éste, y las características del influente, generalmente en los humedales FWS los periodos son más prolongados que los de los humedales de tipo SSF ya que los primeros dependen mucho más de las funciones de las plantas que los segundos. Lo anterior implica que, si un humedal FWS se inicia en primavera, es muy probable que se encuentre

¹⁷² Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 767.

cumpliendo las expectativas de tratamiento para el término de la segunda temporada de crecimiento. Mientras que, si un humedal poco poblado en vegetación es iniciado a finales de otoño en un clima más frío, necesitará tres años o más para alcanzar las expectativas. Para el caso de los flujos SSF se puede necesitar incluso menos de un año.

Durante todo este periodo se debe monitorear constantemente el crecimiento vegetal y la integridad de ciertas estructuras como las bermas, ajustar los niveles del agua, y detectar algún caso de aparición de mosquitos (solo para flujos FWS). En el caso de áreas en donde la vegetación no ha crecido, o ha muerto debe replantarse más para evitar casos en donde el agua acorte el recorrido. Este periodo es importante porque a partir de la experiencia obtenida durante la etapa, se determinará más adelante la frecuencia con la cual debe revisarse el humedal¹⁷³.

La etapa final es la de operaciones rutinarias, en las cuales las eficiencias de remoción han sido alcanzadas y el sistema se encuentra trabajando completamente normal y de acuerdo a lo proyectado.

4.4.1 Manejo de la vegetación

Un plan estricto de rutinas de manejo de la vegetación no es necesario en sistemas trabajando bajo las condiciones de diseño, y con una profundidad adecuada del agua. Esto, debido a que las plantas mismas crecerán, se reproducirán, morirán y volverán a crecer cada año de acuerdo a su ciclo de vida. También podrán crecer en lugares que sean propicios para su desarrollo, y se alejarán de las áreas que son ambientalmente estresantes para cada especie.

Las actividades de los operadores pueden incluir remover plantas de áreas abiertas en el agua que se pretende que sean así desde el diseño, es decir, zonas con condiciones aeróbicas. O ajustar el nivel del agua, reducir las cargas, plantar o agregar pesticidas en áreas en las que la cubierta de vegetación es deficiente. Sin embargo, hay que considerar que (especialmente en climas fríos) a pesar de algunas plantas tengan un color marrón incluso por meses, siguen proveyendo de tratamiento durante ese periodo¹⁷⁴.

4.4.2 Control de fauna molesta

Hay ciertos tipos de animales que pueden ser perjudiciales para el sistema como lo son los peces y las tortugas, que pueden llegar a remover el fondo y resuspender los sólidos ya asentados. Algunos otros más peligrosos como lagartos o serpientes que pueden llegar a atacar a los humanos con consecuencias graves. Otros más (como comadrejas, castores, musarañas o ratas) que afectan el circuito de los humedales, afectando las bermas o las camas de sustrato, permitiendo así que se llegue a acortar el recorrido del flujo. Para algunos casos solamente se puede llegar a colocar advertencias para que no haya contacto humano con dichos animales y que los operadores tomen precauciones. Para alguno más se tiene que atrapar dichos animales y liberarlos, aunque en algunos casos se tiene que llegar a eliminarlos (esto dependiendo de la especie, ya que si se encuentra en peligro de extinción, las cosas se complican más). Y algunos otros más se pueden llegar ahuyentar a través de subir el nivel de aguas para desalentar su estancia en el humedal.

El caso de los mosquitos es un caso de gran importancia porque puede llegarse a convertir en un problema de salud pública de escalas mayores. Los mosquitos solo se presentan en aguas con cierta profundidad por lo cual en humedales con flujo SSF no deberían ser un problema. Este problema

¹⁷³ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 128-129.

¹⁷⁴ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Pág. 786; U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA. Pág. 129.

puede controlarse con el uso de insecticidas (*Bacillus thuringiensis israelensis*, *Bacillus sphaericus* o Altosid®), la presencia de lentejas de agua también contribuye cubriendo la superficie e interfiriendo con la transferencia de oxígeno de la atmósfera al agua, y por último también puede usarse el pez mosquito (*Gambusia affinis*)¹⁷⁵.

4.4.3 Monitoreo

Todos los humedales usados para el tratamiento de aguas residuales deben ser monitoreados por lo menos en las características del agua en la entrada y salida del flujo, los niveles del agua, y ciertos indicadores biológicos de la condición del hábitat. El monitoreo es tan importante como el diseño y la construcción para el buen funcionamiento del sistema, ya que con base en los resultados, se pueden llegar a hacer modificaciones de acuerdo a las necesidades. No solo el monitoreo de la remoción de contaminantes es importante sino también el de ciertos componentes biológicos como los sedimentos, el agua, la vegetación, y la fauna. Lo que nos puede, también, llevar a conclusiones que ayuden a mejorar el sistema o a no afectar otros ecosistemas aledaños¹⁷⁶.

4.4.4 Mantenimiento de las estructuras

Las bermas y diques requieren de deshierbe y control de la erosión para que el sistema se mantenga funcionando de manera adecuada. Respecto a los humedales, cuando trabajan bajo flujos superficiales, se debe evitar o remediar la aparición de brotes de árboles que al crecer ensombrecen las áreas y afectan el desempeño de la vegetación¹⁷⁷.

¹⁷⁵ Crites Ronald W. [et al.]. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing. Pág. 303.

¹⁷⁶ Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Pág. 770, 774.

¹⁷⁷ U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA. Pág. 130.

Capítulo 5: Aplicación

5.1 Estudio de Caso: Revisión del humedal del Bosque de San Juan de Aragón.

El Bosque de San Juan de Aragón se localiza al nororiente de la Ciudad de México, en la colonia San Juan de Aragón, Delegación Gustavo A. Madero. El lago del Bosque es un cuerpo artificial de agua, el cual está constituido por tres espejos de agua, que en su conjunto tienen una superficie de 12 hectáreas, cuentan con una capacidad de 120 000 m³ de almacenamiento, y una superficie de espejo de 118 805 m². Lo anterior permite que se encuentre entre los lagos de mayor dimensión en la ciudad. Dicho lago fue concebido con fines recreativos y ambientales¹⁷⁸.

El abastecimiento del agua del lago comprende dos fuentes: el agua de lluvia, que provee un volumen diario de 5 616 m³; y una fracción del efluente de la Planta de Tratamiento de San Juan de Aragón, que representa un volumen diario de 5 616 m³. Mientras que las pérdidas en el volumen del lago comprenden cuatro factores: la evaporación, estimada en 119 m³ al día; el rebombeo de agua hacia la Alameda Oriente, estimado en 8.54 m³ al día; por último, la infiltración y envío de excedencias al drenaje que en su conjunto estas dos últimas se estiman en 4 643 m³ al año¹⁷⁹.

Lamentablemente el lago se encuentra eutrofizado debido al efluente de la Planta de Tratamiento de San Juan de Aragón, la cual tiene un sistema de tratamiento de tipo lodos activados convencionales. Dicho tratamiento no reduce en niveles adecuados el nitrógeno total, los ortofosfatos y la concentración de nutrientes inorgánicos como lo son los nitratos y fosfatos, por lo cual, al ser introducida al lago dichas condiciones, propician la aparición de microalgas. Es por lo anterior que se decidió construir un sistema de humedales artificiales que pudiera resolver el problema. Tomando como base el estudio “Simulación de los contaminantes en el lago del Bosque de San Juan de Aragón, México, D.F.” se determinó que el sitio más adecuado era al sur del lado, mejorando así la calidad del agua y el paisaje de la zona. Dicho lugar se encuentra señalado en la figura 5-1.

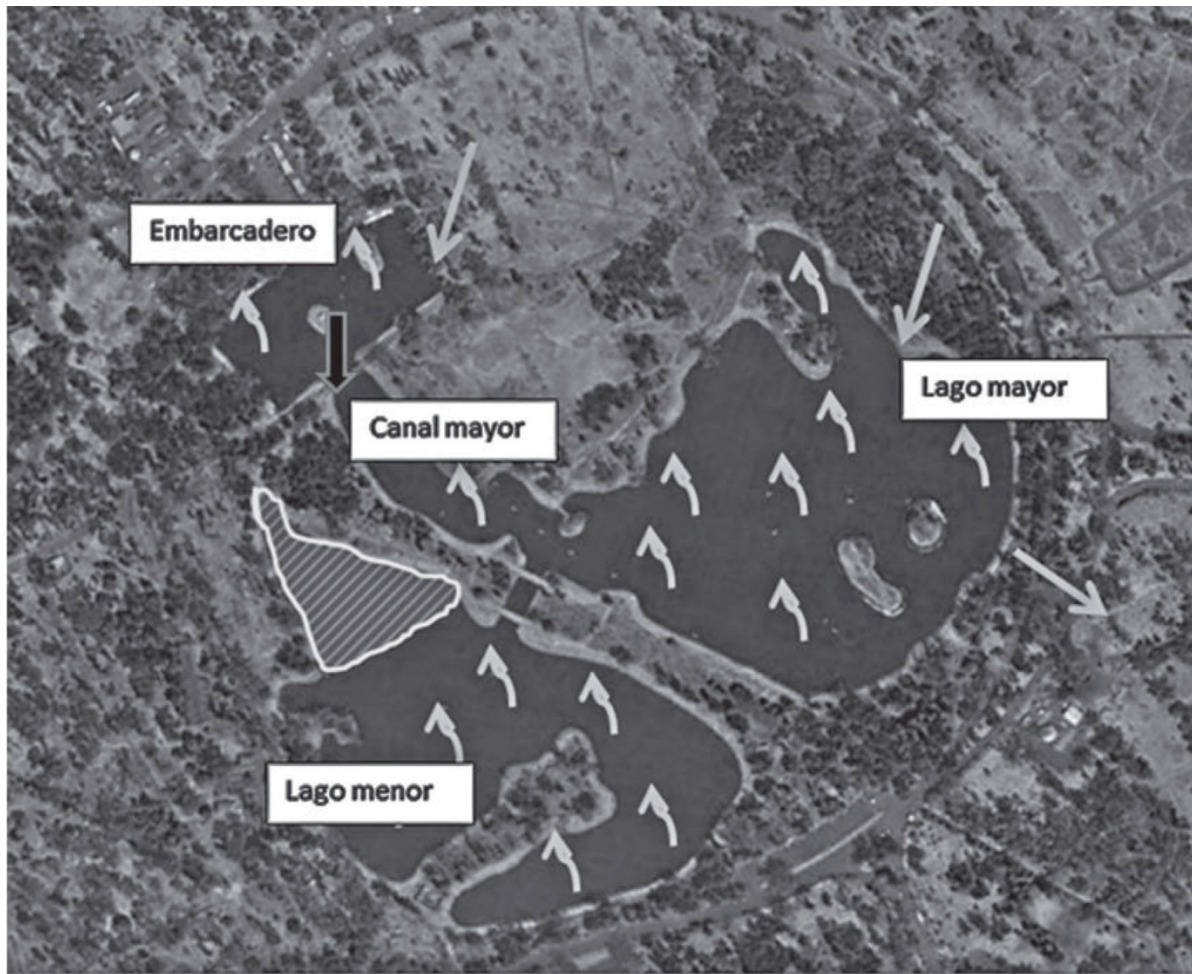
Con respecto al agua, el aporte de la Planta de Tratamiento de San Juan de Aragón es suministrado por una tubería de 20 pulgadas, la cual tiene dos puntos de llegada al lago. La parte conocida como el lago mayor es la que recibe el volumen mayor, mientras que el embarcadero recibe el volumen menor. Dichas zonas del lago pueden verse en la figura 5-1. A pesar de que los compuestos de carbono se encuentran acordes con las normas, esto mismo no sucede con los compuestos de nitrógeno y fósforo, así como también se encuentran fuera de la norma la concentración de bacterias coliformes (de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997). Por otro lado, parámetros como los Sólidos Suspendidos Totales, o la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅) se encuentran en niveles bajos, de forma que no representan mayor problema. Las concentraciones de forma más detallada se encuentran contenidas en la tabla 5-1.

Referente al agua del lago, los aspectos preocupantes son de nuevo, los compuestos de nitrógeno y fósforo, así como los coliformes. En este caso también los sólidos suspendidos se encuentran altos en concentración. Y los análisis hechos muestran que la zona del embarcadero presenta el mayor

¹⁷⁸ Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 35.

¹⁷⁹ UNAM, Facultad de Arquitectura. (2008). Plan maestro del Bosque de San Juan de Aragón.; UNAM, Facultad de Ingeniería. (2007). Diagnóstico de las condiciones ambientales en que se encuentra actualmente el Bosque de San Juan de Aragón.

deterioro de todo el lago. La tabla 5-2 presentan las concentraciones los parámetros del agua del lago¹⁸⁰.








| Símbolo | Descripción |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|  | Área designada para el Humedal artificial (0.8085 hectáreas.) |
|  | Aportes de la PTAR-Tlacos al LBSJA |
|  | Pérdidas por bombeo hacia la Alameda Oriente |
|  | Pérdidas por evaporación |
|  | Pérdidas por Infiltración |

Figura 5-1. Ubicación del humedal dentro del lago del Bosque de San Juan de Aragón. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 36.

¹⁸⁰ Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 35-37.

Tabla 5-1. Parámetros de contaminantes medidos en el efluente de la Planta de Tratamiento de San Juan de Aragón. Fuente: Luna Pabellón, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 37.

| Parámetro | Unidades | Efluente (PTSJA) | | | Niveles que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 | | Porcentaje de remoción necesario para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|------------------------------------------------------|------------|------------------|-------|--------|------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| | | Promedio | Máx | Mín | Protección de vida silvestre | Uso público urbano | |
| pH | UpH | 8.28 | 8.92 | 8.02 | N.R. | N.R. | - |
| Fósforo total | mg/L | 5 | 13 | 2 | 5 | 5 | N.R. |
| Nitrógeno amoniacal | mg/L | 11.00 | 12.00 | 0.23 | N.R. | N.R. | N.R. |
| N-Nitratos | mg/L | 0.89 | 23.00 | 0.28 | N.R. | N.R. | N.R. |
| N-Nitritos | mg/L | <0.002 | 0.66 | <0.002 | N.R. | N.R. | N.R. |
| Nitrógeno total | Suma | 11.89 | 35.66 | 0.51 | 15.00 | 15.00 | 18.00 |
| Color | - | 37 | 52 | 26 | N.R. | N.R. | N.R. |
| SST | mg/L | 5 | 7 | 4 | 40 | 40 | N.R. |
| DBO5 | mg/L | 3 | 4 | 2 | 30 | 30 | - |
| Grasa y Aceites | mg/L | 4 | 5 | 3 | 15 | 15 | - |
| Coliformes Fecales | Col/100 mL | 16 700 | 7 080 | 3 340 | 240 | 240 | 99 |
| Temperatura | ° C | 22 | 27 | 16 | 40 | 40 | - |
| Calcio | mg/L | 42 | 212 | 6 | N.R. | N.R. | - |
| Nota: | | | | | | | |
| N.R. Valor no requerido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 | | | | | | | |

Tabla 5-2. Parámetros de contaminantes medidos en el Lago del Bosque de San Juan de Aragón. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 38.

| Parámetro | Unidades | Lago del Bosque de san Juan de Aragón (LBSJA) | | | Niveles que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 | | Porcentaje de remoción necesario para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|-------|------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| | | Promedio | Máx | Mín | Protección de vida silvestre | Uso público urbano | |
| pH | UppH | 9.62 | 10.2 | 9 | N.R. | N.R. | N.R. |
| Fósforo total | mg/L | 3 | 7 | 2 | 5 | 5 | B.N.- |
| Nitrógeno amoniacal | mg/L | 52.00 | 200.00 | <0.25 | N.R. | N.R. | N.R. |
| N-Nitratos | mg/L | 24.00 | 94.00 | <0.20 | N.R. | N.R. | N.R. |
| N-Nitritos | mg/L | 8 | 39 | <0.12 | N.R. | N.R. | N.R. |
| Nitrógeno total | Suma | 84.00 | 333.00 | <0.57 | 15.00 | 15.00 | 82 |
| Color | - | 43 | 170 | 32 | N.R. | N.R. | N.R. |
| SST | mg/L | 127 | 450 | 4 | 40 | 40 | 44 |
| DBO5 | mg/L | 28 | 141 | 2 | 30 | 30 | B.N. |
| Grasa y Aceites | mg/L | 5 | 7 | 3 | 15 | 15 | B.N.- |
| Coliformes Fecales | Col/100 mL | 2 380 | 2 940 | 1 820 | 240 | 240 | 90 |
| Temperatura | ° C | 23 | 27 | 20 | 40 | 40 | B.N. |
| Calcio | mg/L | 83 | 333 | 20 | N.R. | N.R. | N.R. |
| Nota: | | | | | | | |
| N.R. | Valor no requerido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 | | | | | | |
| B.N. | Niveles de carga de contaminantes por debajo de la NOM-001-SEMARNAT-1996 | | | | | | |

El sistema fue concebido con un área efectiva de tratamiento de 8 085 m² (0.8085 hectáreas) para tratar 217 m³/día¹⁸¹ (aunque en la actualidad el sistema solo opera 8hrs con lo cual el caudal tratado sería 72.333 m³/día).

El sistema se compone de 5 elementos que contribuyen al tratamiento, los cuales se muestran en secuencia en el diagrama de flujo de la figura 5-2:

- Canales de conducción (figura 5-3)
- Sedimentador (figura 5-4)
- Humedal artificial de flujo subsuperficial (figura 5-5)
- Humedal artificial de flujo superficial (figura 5-5)
- Muro gavión (figura 5-6)

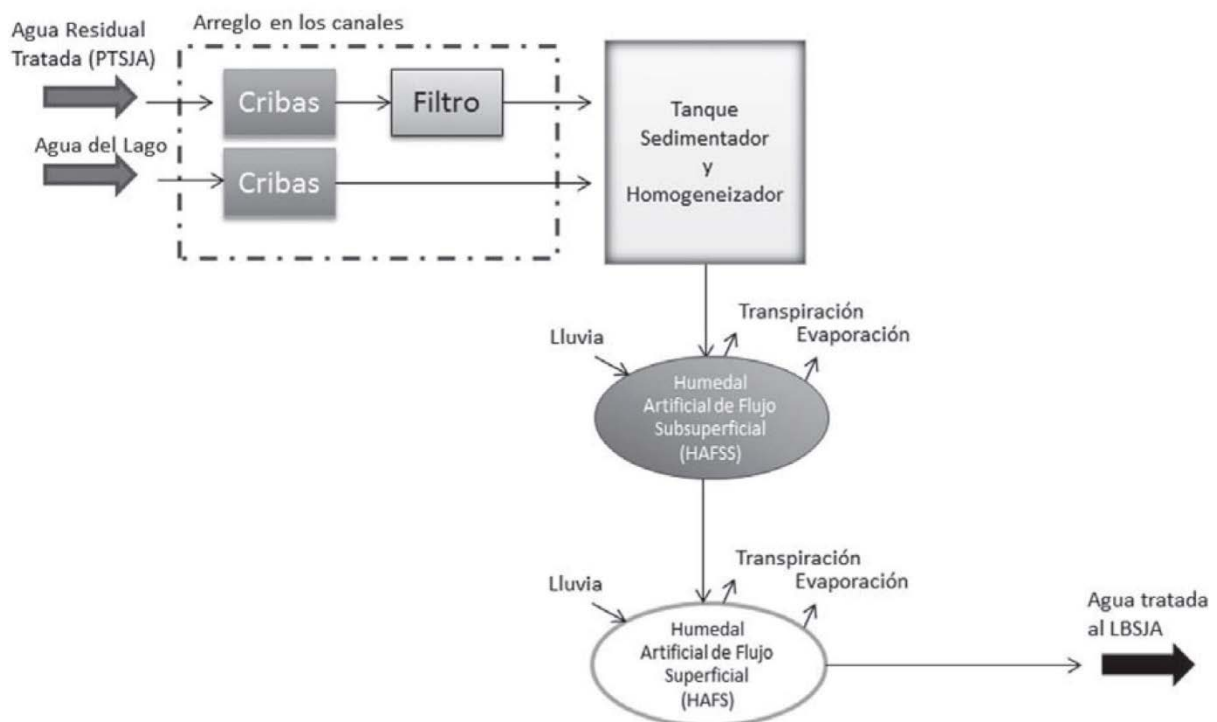


Figura 5-2. Diagrama de flujo del agua dentro del sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 39.

El agua ingresa al sistema por dos canales. El canal "A" recibe agua del lago que se encuentra próximo al canal mayor y las recirculaciones de distintos puntos del lago (Aporte Canal Mayor-embarcadero). Este canal se encuentra dividido en cinco zonas a lo largo, de 10 metros cada una y con un espacio de 1.55m entre ellas. En la entrada y salida de cada zona se colocaron cribas de malla rígida ondulada de 2x2 pulgadas y de calibre 6 con lo cual a lo largo del canal hay un total de 10 cribas. También, en este canal se encuentra un filtro de agregados calcáreos (roca caliza) que puede llegar a tratar hasta el 44% del caudal por fosfatos antes de que llegue al sistema; estas gravas se retiran y lavan cada año, y tienen un periodo de vida de 10 años aproximadamente. El canal "B" recibe una fracción del agua traída de la Planta de Tratamiento San Juan de Aragón.

En este canal solo se colocaron dos cribas de malla rígida ondulada de 2x2 pulgadas con calibre 6 a la entrada y salida debido a que no se encuentra dividido. Estos canales tienen como objetivo remover los

¹⁸¹ *Ibíd.*, pág. 38.

compuestos de cloro que pueda contener el agua ya que estos pueden dañar a los organismos que se encargan de depurar el agua, así como a las plantas.



Figura 5-3. Canales de conducción en el sistema.

Al salir de los canales, el flujo entra al sedimentador. Esta estructura tiene como objetivo retener las partículas de arena y partículas de mayor densidad para que el sistema (específicamente el humedal de flujo subsuperficial) no tenga problemas de taponamiento. Además, funciona como un cárcamo de bombeo que envía el flujo hacia los humedales artificiales; y mezcla y uniformiza los dos caudales. El tanque está constituido por dos cilindros concéntricos de 2m de altura y cuenta con un área de 44 m², de la cual el 20% es espacio adicional como factor de seguridad. Dicho tanque tiene un mantenimiento periódico de retiro de sedimentos acumulados, los cuales se combinan con materia vegetal para la elaboración de composta. Después del tiempo de retención hidráulica (2.5 horas) el efluente es conducido hacia el módulo del humedal de flujo subsuperficial a través de una bomba centrífuga de operación normal intermitente. El sistema de abastecimiento y distribución de las bombas es mediante control automatizado y este es suministrado de energía por un sistema fotovoltaico de 16 paneles (a pesar de tener como reserva el sistema convencional) que sirve para las 4 bombas en el sistema: dos para llevar el flujo del sedimentador al humedal de flujo subsuperficial y dos para repartir el flujo de salida de este último al humedal de flujo superficial (aunque en realidad solo se utilizan dos y dos quedan de reserva).



Figura 5-4. Sedimentador en el sistema.



Figura 5-5. Humedal artificial de flujo subsuperficial y Humedal artificial de flujo superficial en el sistema.



Figura 5-6. Muro gavión en el sistema.

El humedal artificial de flujo subsuperficial tiene un área de 2 351 m² y un área efectiva de tratamiento de 1 613 m². Éste tiene un diseño con forma de abanico de tipo modular e interconectado por vasos comunicantes, está constituido por 6 módulos acoplados en serie y en cada uno de ellos fluyen volúmenes iguales. El sistema tiene dos materiales acomodados en tres capas verticales en el lecho. El primer material es grava de origen ígneo, la cual favorece la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales; además de que fomenta la transformación del nitrógeno amoniacal a nitrógeno nítrico. El segundo material es gravilla a base de mineral de roca caliza, que es eficiente en la remoción de ortofosfatos y llevar a cabo el proceso de desnitrificación. Dichos materiales fueron perfectamente tamizados y lavados para su utilización. La vegetación que se eligió es de tipo hidrófita enraizada emergente, que favorece la asimilación de nitrógeno nítrico, así como la incorporación de compuestos de carbono a su tejido y el intercambio de oxígeno en el rizoma. Este último procedimiento permite el desarrollo de la biopelícula de microorganismos depuradores.

El efluente del humedal de flujo subsuperficial es vertido en el humedal de flujo superficial. El flujo es distribuido a partir de la orilla poniente de todo el sistema para que por gravedad el agua tenga un recorrido hacia el muro gavión que representa el límite divisorio oriente de los humedales con el resto del lago. También una parte del efluente del humedal de flujo subsuperficial es enviado a la zona oriente del sistema para que pueda tener un mayor recorrido en la siguiente fase. El humedal de flujo subsuperficial se considera un tratamiento terciario del agua, mientras que el humedal de flujo superficial se considera un pulimiento de ésta. La vegetación hidrófita comprende enraizadas emergentes a los márgenes del espejo de agua y subemergentes y de libre flotación en el espejo de agua del humedal¹⁸².

Para la vegetación se consideraron plantas con función estética (de ornato) y plantas con capacidad depuradora. La reproducción fue a través de rizomas colectados en Cuemanco, Texcoco y Xochimilco. Se lleva un control y registro de las especies, buscando que no exista endogamia, y que de esta forma exista variabilidad genética, haciendo menos vulnerable la vegetación a las plagas. La tabla 5-4 muestra las especies usadas en ambos humedales y la figura 5-7 muestra la distribución original, aunque hubo una variación en dicha distribución buscando una mejor adecuación de las plantas.

¹⁸² *Ibíd.*, pág. 38-43.

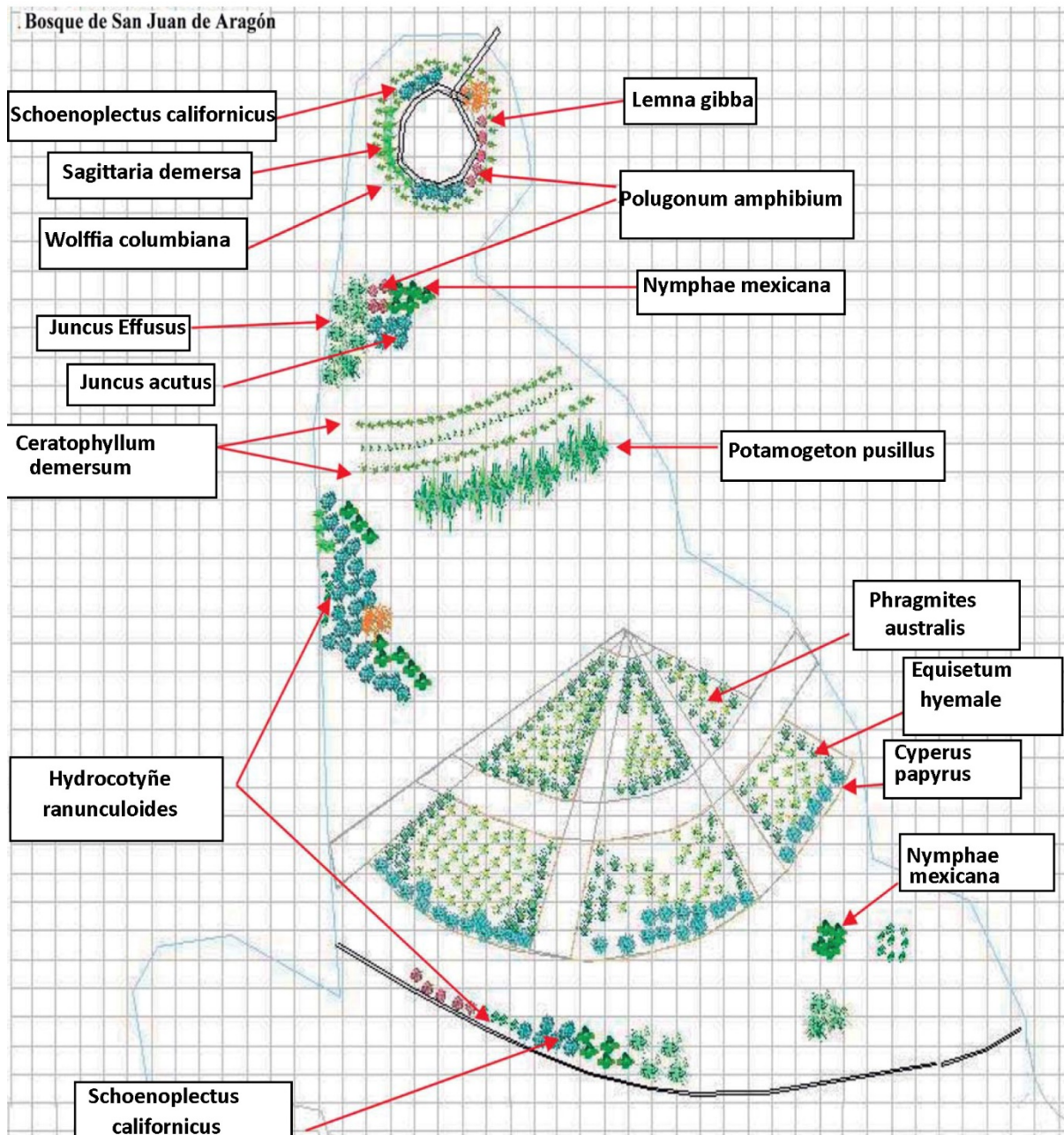


Figura 5-7. Distribución de la vegetación en el sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 41.

Tabla 5-3. Especies vegetales comprendidas en el sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 40.

| En los humedales de flujo subsuperficiales | | |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Nombre científico | Nombre común | Función |
| <i>Phragmites australis</i> | Carrizo | Depuradora |
| <i>Equisetum hyemale</i> | Cola de caballo, arricillo y cañuela | Ornato |
| <i>Cyperus papyrus</i> | Papiro | Depuradora |
| En el humedal de flujo superficial | | |
| Hidrófitas enraizadas emergentes | | |
| Nombre científico | Nombre común | Función |
| <i>Schoenoplectus californicus</i> | Junco triangular o totora | Depuradora |
| <i>Juncus effusus</i> | Tulillo o junco | Depuradora |
| <i>Juncus acutus</i> | Junco espinoso | Depuradora |
| Hidrófitas enraizadas de hojas flotantes | | |
| Nombre científico | Nombre común | Función |
| <i>Nymphae mexicana</i> | Atlacuetzón, ninfa | Ornato |
| <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> | Malacate | Depuradora |
| <i>Polygonum amphibium</i> | Achillillo macho | Depuradora |
| <i>Sagittaria demersa</i> | Papa de agua, bayoneta, cola de pato | Depuradora |
| <i>Potamogeton pusillus</i> | Pasto de Agua, lila de agua | Depuradora |
| <i>Ceratophyllum demersum</i> | Cola de zorro, bejuquillo | Depuradora |
| Hidrófitas libres flotadoras | | |
| Nombre científico | Nombre común | Función |
| <i>Wolffia columbiana</i> | Chichicastle, lentejilla | Depuradora |
| <i>Lemna gibba</i> | Chichicastle, lentejilla | Depuradora |

Con base en los cálculos realizados tomando en cuenta el gasto y concentración de los influentes, la temperatura, los nutrientes disponibles, la luz, humedad, y la estética se calculó el área y la capacidad de tratamiento de cada módulo. La tabla 5-3 muestra cada módulo con sus respectivas características.

Tabla 5-4. Áreas y flujos establecidos para el sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 42.

| Módulo | Celdas de tratamiento (módulos) | Flujo nominal de diseño (m3/d) | Área |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Canales de conducción | Dos (2) | 218 | 84 m ² |
| Sedimentador | Uno (1) | 218 | 44 m ² |
| Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) | Seis (6) | 217 – 218 | Área Total 2 351 m ² Superficie activa 1 613 m ² |
| Humedal artificial de flujo superficial (HAFS) | Uno (1) | 177 – 186 | Superficie Activa 5 735 m ² |
| Totales | Siete (7) | 394-404 | 8 086 m ² |

Con respecto a la construcción, en la losa de cimentación se utilizó varilla de 3/8" de diámetro a cada 15cm con un concreto de resistencia a la compresión $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ y un peralte de 12cm. Para el sedimentador se utilizó varilla de 3/8" de diámetro, de 15x25cm, la cimbra de madera triplay apuntalada cada 40cm para concreto de $f'_c= 250\text{kg/cm}^2$, el muro es circular de 20cm de espesor. Para el muro secundario del sedimentador se utilizó exactamente el mismo material y especificaciones que para el muro principal. Los muros divisorios son de tabiques rojos recosidos de 15x15 cm y los refuerzos horizontales tienen Armex de 15x15 cm. Para el lleno del piso se colocó tezontle y una geomembrana encima de éste. Los muros del canal tienen varillas de 3/8" de 15x25cm para concreto con $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$. Por último, el muro gavión está hecho de piedra braza a 90° de inclinación con dimensiones de 120x120 cm, y resguardado por una malla metálica con protección de plástico de 0.5cm de diámetro. La figura 5-8 muestra el arreglo final de las estructuras vista en planta.

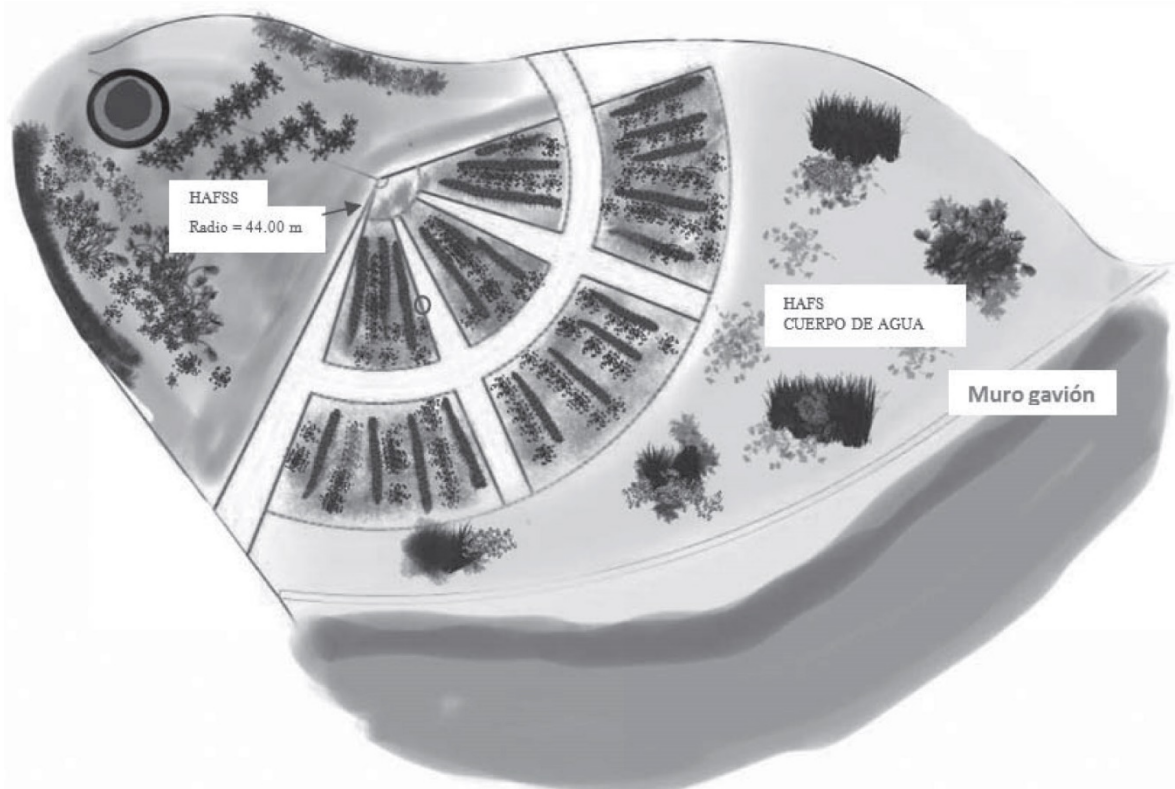
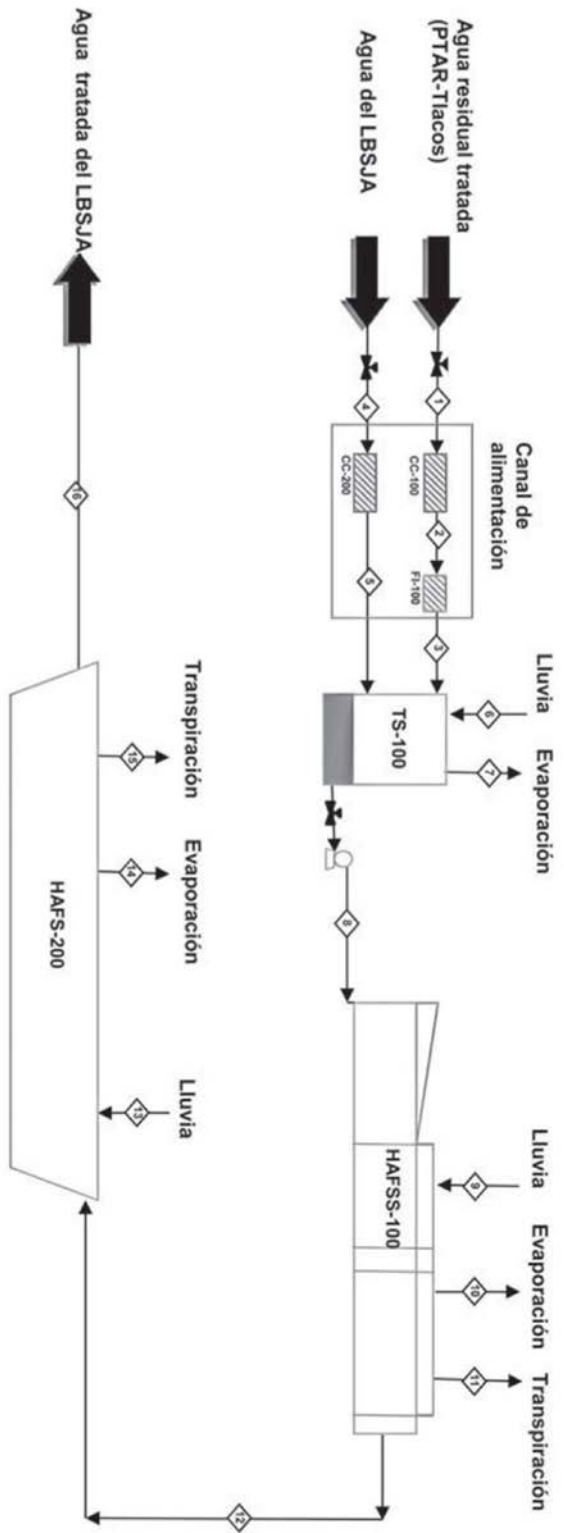


Figura 5-8. Esquema de distribución de los elementos del sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 42.

La figura 5-9 muestra un diagrama de flujo más detallado del flujo del agua una vez en el sistema, así como los elementos que lo conforman, mientras que la figura 5-10 muestra las concentraciones de los contaminantes más importantes y como se van reduciendo conforme pasan por los distintos componentes del sistema. Es importante notar como los contaminantes se reducen de manera drástica al terminar de pasar el humedal de flujo subsuperficial y que cuando salen del humedal de flujo superficial terminan de bajar más, y es por eso que la última fase, el humedal de flujo superficial, se considera un pulimiento.



| Clave | Descripción |
|-------|-------------------------------------|
| 1 | Agua residual PTSJA-Tiacos |
| 2 | Agua de CC-100-AFI-100 |
| 3 | Agua de CC-100-AFI-101 |
| 4 | Agua de CC-200 |
| 5 | Agua de CC-200 ATS-100 |
| 6 | Aporte de agua de lluvia TS-100 |
| 7 | Pérdida por evaporación en TS-100 |
| 8 | Influyente al HA-100 |
| 9 | Aporte de agua de lluvia en HA-100 |
| 10 | Pérdida por evaporación en HA-100 |
| 11 | Pérdida por transpiración en HA-100 |
| 12 | Influyente HA-200 |
| 13 | Aporte de agua de lluvia en HA-200 |
| 14 | Pérdida por evaporación en TS-200 |
| 15 | Pérdida por transpiración en HA-200 |
| 16 | Efluente del HA-200 a el LBSJA |

| Lista de Equipos | |
|------------------------|-----------|
| Nombre | Clave |
| Cribado (canal 1) | CC-100 |
| Cribado (canal 2) | CC-200 |
| Filtro | FI-100 |
| Tanque sedimentador | TS-100 |
| Bomba | BA-100 |
| Humedal subsuperficial | HAFSS-100 |
| Humedal superficial | HAFS-200 |

Figura 5-9. Diagrama de flujo del proceso del sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabelló, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 50.

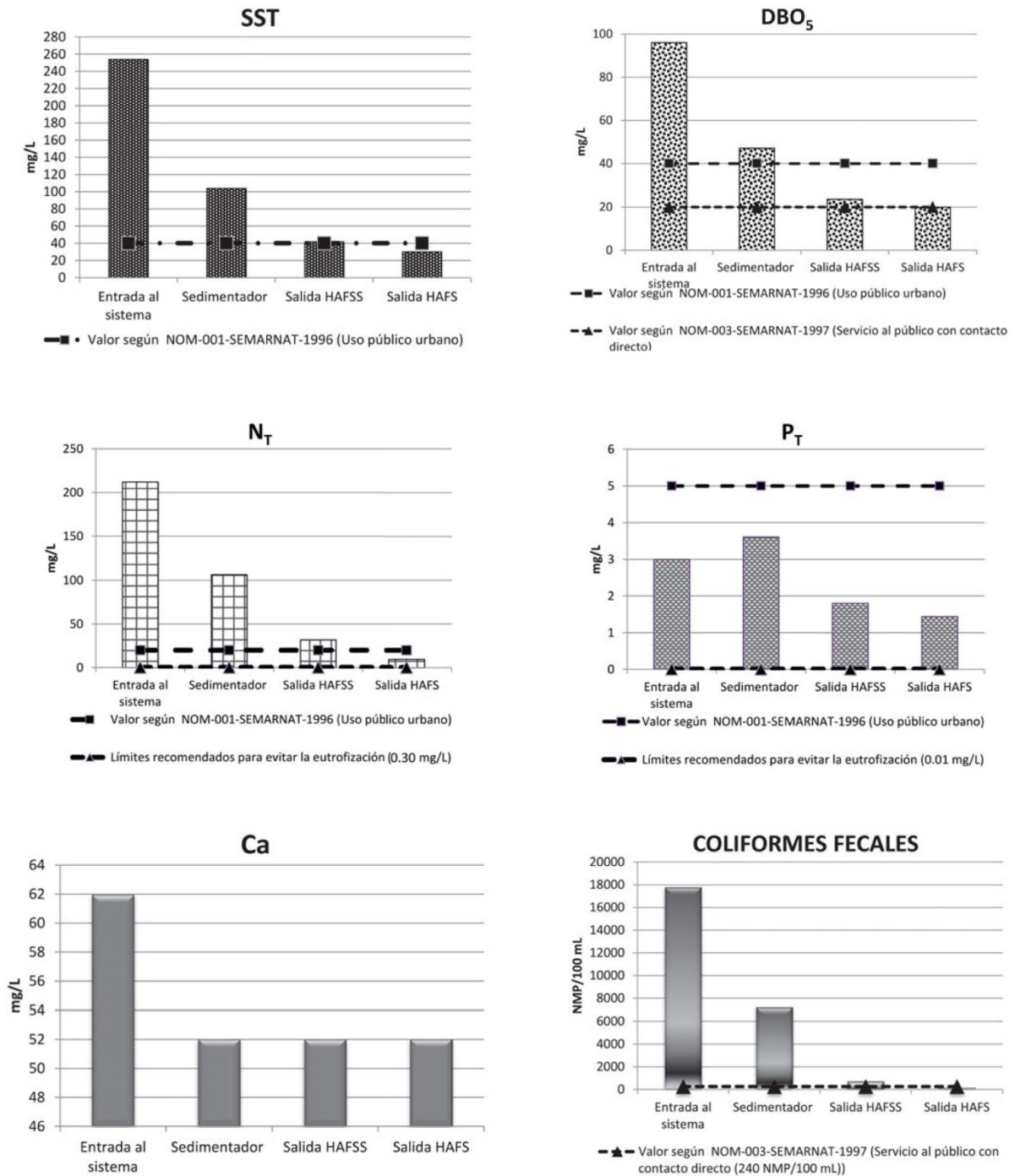


Figura 5-10. Perfil de los parámetros medidos por etapa del sistema de humedales artificiales. Fuente: Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 52.

El sistema tiene una vida útil de aproximadamente 25 años y una capacidad de remoción de contaminantes presentes entre 80% y 90%. Fue construido con fondos administrados por parte del Gobierno la Ciudad de México y para ello se realizó la respectiva licitación pública en el año 2009. El

30 de noviembre del 2012 fue inaugurado y constituye el humedal artificial de mayor tamaño y capacidad en la Ciudad de México¹⁸³.

5.1.1 Muestreo, y resultados pruebas de campo y laboratorio

Debido a que es el sistema es un sistema combinado de humedales y que existen dos fuentes para abastecer al sistema, se tomaron muestras de ambas entradas y de la salida del humedal subsuperficial, así como a la salida del humedal superficial para analizar las concentraciones finales de los contaminantes más importantes en cada etapa con respecto a las concentraciones iniciales.

Dichos muestreos se llevaron a cabo con guantes y cubrebocas lo que impediría la contaminación cruzada. Las muestras se tomaron utilizando envases de PET totalmente limpios, mientras que para las pruebas bacteriológicas se utilizaron frascos Winkler declorados. Los parámetros medidos en campo se han llevado a cabo a través de un multímetro portátil siempre limpiándolo con agua destilada después de medir en los cuatro flujos. Las muestras fueron transportadas del humedal al laboratorio con una hielera y congelantes que permitieron su refrigeración para realizar las pruebas de laboratorio el mismo día de la toma de muestras.

Respecto a las pruebas, para el nitrógeno de nitritos y de nitratos, así como los fosfatos y fósforo total, dichas pruebas se llevaron a cabo con el método de celda reactiva y blanco con la ayuda de un espectrofotómetro según las normas mexicanas NMX-AA-099-SCFI-2006, NMX-AA-079-SCFI-2001, y NMX-AA-029-SCFI-2001 respectivamente.

La determinación de coliformes totales se llevó a cabo de acuerdo a la norma NMX-AA-042-SCFI-2015 con la ayuda del matraz Kitasato, matraz invertido estéril, embudo de cristal, pinzas y una bomba de vacío se hicieron pasar 100 mL a través de una membrana la cual con un cojín absorbente y un medio de cultivo para coliformes se colocaron en una caja de Petri para incubarlos 24 horas a 35°C.

Respecto a la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), las pruebas se hicieron siguiendo los lineamientos de la norma NMX-AA-028-SCFI-2001, y utilizando el método yodométrico descrito en la norma NMX-AA-012-SCFI-2001. Dichas pruebas se hicieron preparando dos diluciones, una de 10% y una de 15%, los resultados presentados en la tabla 5-5 son un promedio de ambas diluciones.

Con lo que respecta a los sólidos suspendidos, las pruebas se realizaron con base en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 haciendo pasar 10 mL de agua residual por un filtro Gooch y un papel filtro a peso constante que se pesan en conjunto antes de la filtración y después de la desecación.

La tabla 5-5 muestra los resultados completos de las pruebas, mientras que la tabla 5-6 muestra las eficiencias obtenidas del humedal de flujo subsuperficial, del humedal de flujo superficial y la eficiencia total del sistema.

¹⁸³ Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Pág. 40, 48, 53.

Tabla 5-5: Resultados del análisis de campo y de laboratorio: Temperatura, pH, Conductividad, Sólidos disueltos, DBO5, Sólidos Suspendedos T., Coliformes fecales, Nitrogeno y Fósforo.

| Fuente | Parámetros tomados en campo | | | | Pruebas de laboratorio | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|-------|--------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| | Temperatura [°c] | pH | Conductividad [mS] | Sólidos disueltos [ppm] | DBO5 [mg/L] | Sólidos S. Totales [mg/L] | Coliformes Fecales [Col/100mL] | Nitrógeno de nitrito (NO ₂ ⁻) [mg/L] | Nitrógeno de nitrato (NO ₃ ⁻) [mg/L] | Fosfatos (NO ₃ ⁻) [mg/L] | Fósforo Total (P) [mg/L] |
| Entrada del Lago del Bosque de San Juan de Aragón | 21.8 | 10.43 | 1.87 | 9.4x10 ⁻⁷ | 50.5 | 50 | >240 | 0.005 | 6.4 | 1.81 | 0.59 |
| Entrada Planta de Tratamiento San Juan de Aragón | 23.6 | 10.33 | 1.92 | 9.5x10 ⁻⁷ | 43 | 60 | >240 | 0.008 | 1.6 | 1.39 | 0.45 |
| Salida Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial | 24.0 | 8.94 | 2.37 | 1.19x10 ⁻⁶ | 27.9 | 0 | >240 | 0.001 | 1.5 | 1.12 | 0.37 |
| Salida Humedal Artificial de Flujo Superficial | 23.8 | 8.87 | 2.41 | 1.2 x10 ⁻⁶ | 23.7 | 1 | 128 | 0.001 | 0.6 | 0.96 | 0.30 |

Tabla 5-6: Eficiencias obtenidas por el humedal de flujo subsuperficial, el humedal de flujo superficial y la eficiencia total del sistema.

| Eficiencia | DBO5 [%] | Sólidos S. Totales [%] | Nitrógeno de nitrito (NO ₂ ⁻) [%] | Nitrógeno de nitrato (NO ₃ ⁻) [%] | Fosfatos (NO ₃ ⁻) [%] | Fósforo Total (P) [%] |
|--------------------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial | 40.32 | 100 | 84.62 | 62.50 | 30 | 28.85 |
| Humedal Artificial de Flujo Superficial | 15.05 | - | 0 | 60 | 14.29 | 18.92 |
| Total | 49.30 | 98.18 | 84.62 | 85.00 | 40 | 42.31 |

5.1.2 Análisis de los resultados y recomendaciones

La mayoría de los parámetros cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para la protección de vida silvestre y uso público urbano al salir de la etapa del humedal de flujo subsuperficial, mientras que al salir del humedal de flujo superficial las concentraciones se reducen una fracción más, siendo el caso de los coliformes fecales el caso en el que tiene más injerencia reduciéndolos hasta cumplir la norma antes mencionada. La tabla 5-7 muestra como al salir del sistema el agua cumple con todos los niveles de contaminación marcados por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 5-7. Tabla de comparación de niveles de contaminación entre lo que marca la NOM-001-SEMARNAT- 1996 y los niveles del caudal al salir del sistema de humedales.

| Parámetro | Salida del sistema | Nivel requerido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 | Porcentaje adicional requerido para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT- 1996 |
|--------------------|--------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| pH | 8.87 | N.R. | 0 |
| Fósforo total | 0.3 | 5 | 0 |
| N-Nitratos | 0.6 | N.R. | 0 |
| N-Nitritos | 0.001 | N.R. | 0 |
| SST | 1 | 40 | 0 |
| DBO5 | 23.7 | 30 | 0 |
| Coliformes Fecales | 128 | 240 | 0 |
| Temperatura | 23.8 | 40 | 0 |

Nota: N.R. = valor no requerido por la norma

En cuestión de eficiencias el sistema se encuentra operando de manera eficaz llegando a tener incluso una eficiencia del 98.18% en sólidos suspendidos, y la mitad de los otros parámetros entre 90% y 80% y la otra mitad entre 50% y 40%. Sin embargo, es importante recalcar que aunque la mayoría de estas eficiencias son altas, hay algunos parámetros en la entrada que también se encuentran altos en comparación a las consideraciones iniciales (las de diseño). Estos parámetros específicamente son del agua proveniente de la Planta de tratamiento de San Juan de Aragón, entre los cuales se encuentran los sólidos suspendidos y DBO5 que en nuestras mediciones son más altos que los reportados por la planta de tratamiento al Bosque. Aun así, parámetros como el nitrógeno en nitritos y nitratos, y el fósforo total son más bajos en la entrada y salida de acuerdo a nuestros resultados. Y ya que estos son los parámetros principales para evitar la eutrofización del agua, son con los que se debe tener cuidado.

En el humedal existe una condición que puede afectar el desempeño del humedal. La presencia de tilapias, que, debido a su crecimiento acelerado, tolerancia a las altas densidades poblaciones, adaptación al cautiverio y resistencia a enfermedades, pueden representar un problema y una buena oportunidad. El problema viene por la carga de materia orgánica que representa en el sistema, que definitivamente afecta el desempeño del humedal de flujo superficial. Por otra parte, representa una oportunidad en este momento en el cual el sistema de humedales del Bosque de Aragón no cuenta con un laboratorio con el cual monitorear de mejor manera los parámetros y el desempeño del sistema, ya que con las tilapias como un indicador biológico de las condiciones del sistema pueden dar indicaciones de que el sistema no está cumpliendo con los objetivos de tratamiento.

Por lo tanto, a pesar de que los resultados obtenidos en nuestras pruebas muestran valores en nitrógeno y fósforo arriba de los niveles recomendados para evitar la eutrofización, aun así, los valores

parecen aceptables e incluso algunos casos son mejores que los planeados al inicio del sistema. No obstante, se recomienda mantener un monitoreo constante a partir de pruebas de laboratorio que ayudaran a mantener el sistema controlado, además de crear un programa de mantenimiento (aparte del existente) de retiro de los peces en el sistema para que la carga orgánica que representan las tilapias se reduzca, mejorando las eficiencias del humedal de flujo superficial como la DBO_5 o los valores de nitrógeno y fósforo totales. Acotando también que debido a la existencia de las concentraciones de fondo ciertos parámetros como el nitrógeno o el fósforo no pueden eliminarse por completo, por lo cual es importante mantener un registro y control de dichos parámetros.

Capítulo 6: Conclusiones

En esta guía que se ha creado sobre los humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales se han descrito y explicado qué son, y cómo funcionan, abordando todas las etapas ingenieriles de un proyecto con énfasis en el diseño y modelado matemático de dichos sistemas; así como sus ventajas, desventajas y posibles aplicaciones. También se ha presentado un panorama general del agua en México, que ayuda a entender la situación en la que nos encontramos y por qué es tan importante el desarrollo de tecnología alrededor de ésta. Por último, se analizó un sistema de humedales artificiales con dos tipos de flujo, que fue muy revelador a la hora de comparar las eficiencias entre ambos.

Los humedales son una tecnología relativamente nueva en comparación a otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, tanto que aún siguen en investigación y se va desarrollando cada vez. Sin embargo, tienen muchas ventajas no solamente a nivel de tratamiento de agua, sino también en temas ambientales, o incluso estéticos. Está claro que los humedales artificiales no son la panacea y que cada caso debe de tratarse de manera específica con los estudios y cálculos correspondientes, pero una mayor visibilización de los humedales podría aumentar los casos de aplicación de esta tecnología, contribuyendo así a la experiencia y conocimiento de estos sistemas, especialmente porque tienen grandes ventajas y que algunas desventajas pueden llegar a disminuirse o incluso desaparecer.

Como cualquier sistema de tratamiento tiene como beneficio contribuir al uso eficiente del agua, disminuir el impacto ambiental de las descargas, contribuir a la reutilización de las aguas residuales tratadas, aumentar la calidad de las fuentes de abasto de agua para uso primario, y recargar, recuperar y proteger los acuíferos. No obstante, existen otros beneficios más propios de los humedales artificiales como lo es la reducción de energía empleada para el tratamiento de desechos líquidos, bajar la producción de residuos secundarios del tratamiento, y la recuperación de hábitats afectados por la contaminación.

Además, no solo se queda en beneficios en comparación a otros métodos o en general por el tratamiento de agua residual, sino también ofrece otros beneficios ambientales como mejorar el paisaje, convertirse en un hábitat propicio para aves y más animales (en el caso de los humedales de flujo superficial), producir oxígeno y fijar el carbono gracias a la vegetación, retener el agua favoreciendo el ciclo hidrológico, así como mitigar el efecto de isla calórica al generarse un microclima, y por último, generar un espacio recreativo que puede servir para la educación ambiental.

Por otro parte, como todo método existen desventajas. Afortunadamente algunas de ellas pueden llegar a mitigarse o desaparecer. Es el caso del hecho de que algunos parámetros del agua como el nitrógeno y fósforo absorbidos por la vegetación puede ser devueltos al agua al finalizar el ciclo de vida de las plantas, que puede disminuirse de forma considerable a través del mantenimiento y retiro de vegetación muerta que afectaría los parámetros. Otro ejemplo de desventajas que pueden llegar a mitigarse es la saturación en el caso de los humedales de flujo superficial y el taponamiento en los humedales de flujo subsuperficial, que puede prevenirse al utilizar los humedales como sistemas de tratamiento terciario y pulimiento del agua; es decir, la implementación de tratamientos anteriores al sistema de humedales. Otro ejemplo más es la extensión del espacio que debe ocupar un humedal, especialmente los humedales de flujo superficial, extensión que puede disminuirse teniendo un sistema combinado como lo es el del Bosque de Aragón.

Es importante recalcar que muchos humedales naturales pueden llegar a producir incluso hasta 20 veces más metano que un bosque, y el metano puede llegar es más contaminante que el dióxido de

carbono. Un humedal artificial puede llegar a ser una buena opción cuando se quiere crear hábitats ya que en éste se pueden controlar las emisiones y desechos que se generan, a diferencia de sus contrapartes los humedales naturales. Podar la vegetación, retirar la naturaleza muerta y sedimentos, así como reutilizarlos en compostas para nutrir suelos deteriorados es una gran idea que puede llegar a ser redituable económicamente.

Por último, las eficiencias de remoción obtenidas de las pruebas nos muestran que en cuestión de tratamiento los humedales son una tecnología funcional para la depuración del agua.

Bibliografía

Carabias Julia [y otros] Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México [Libro]. - [s.l.] : UNAM; El Colegio de México; Fundación Gonzalo Río Arronte, 2005. - pág. 219.

César Valdez Enrique y Vázquez González Alba B. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales [Libro]. - [s.l.] : Fundación ICA, 2001. - pág. 337.

Chow Ven Te, Maidment David R. y Mays Larry W. Hidrología Aplicada [Libro]. - [s.l.] : McGraw-Hill, 1994. - pág. 584.

Comisión Nacional del Agua Competitividad y Normatividad / Normalización [En línea]. - 15 de Julio de 2017. - <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/competitividad-y-normatividad-normalizacion>.

Comisión Nacional del Agua Reglamentos [En línea]. - 14 de Julio de 2017. - <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/11273>.

Comisión Nacional del Agua Sitio del Registro Público de derechos de Agua [En línea]. - 01 de Junio de 2016. - 30 de Mayo de 2017. - <http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/acerca-del-repda>.

CONABIO La diversidad biológica de México: Estudio de país, 1998 [Libro]. - [s.l.] : CONABIO, 1998.

CONAGUA Sistema Nacional de Información del Agua Sistema Nacional de Información del Agua, Calidad del Agua [En línea]. - 29 de Mayo de 2017. - http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=calidadAgua.

Consejo Nacional de Población Índices de Marginación 2005 [Libro]. - [s.l.] : CONAPO, 2005. - pág. 52.

Consejo Nacional de Población La Situación Demográfica en México 2003 [Libro]. - [s.l.] : CONAPO, 2003. - pág. 176.

Crites Ronald W. [et al.] Natural Wastewater Treatment Systems [Book]. - [s.l.] : IWA Publishing, 2014. - Second Edition : p. 508.

Díaz Coutiño Reynol y Escárcega Castella Susana Desarrollo sustentable : oportunidad para la vida [Libro]. - [s.l.] : McGraw-Hill, 2009. - pág. 283.

Durán Juan Manuel, Sánchez Martín y Escobar Ohmstede Antonio El agua en la historia de México. Balance y perspectiva [Libro]. - [s.l.] : Morelia, El Colegio de Michoacán, 2005. - pág. 451.

French Richard H. Hidráulica de canales abiertos [Libro]. - [s.l.] : McGraw-Hill, 1988. - pág. 724.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía Así hicimos el VIII censo agrícola, ganadero y forestal 2007: Aspectos metodológicos y principales resultados [Publicación periódica] // Revista del VIII Censo Agropecuario. - [s.l.] : INEGI, 2007. - pág. 27.

Kadlec Robert H. y Wallace Scott D. Treatment Wetlands [Libro]. - [s.l.] : CRC Press, 2009. - Second Edition : pág. 1020.

Ley de Aguas Nacionales, TÍTULO TERCERO: Política y Programación Hídricas, Capítulo Único, Sección Primera: Política Hídrica Nacional. - 2016.

Luna Pabello Víctor Manuel y Aburto Castañeda Sergio Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón [Publicación periódica] // TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. - 2014.

Mantilla Morales Gabriela [y otros] Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México [Publicación periódica]. - [s.l.] : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002.

Meré Alcocer Francisco Javier Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas [Libro]. - [s.l.] : Colegio de Profesionistas Posgraduados del Estado de Querétaro, 2003.

Metcalf Leonard y Eddy Harrison P. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización [Libro] / trad. Trillo Monsorius Juan de Dios y Trillo Fox Ian. - [s.l.] : McGraw-Hill, 1998. - Tercera Edición : Vol. I y II : pág. 1485.

Musset Alain El agua en el valle de México, siglos XVI-XVIII [Libro]. - [s.l.] : CEMCA; Pórtico de la Ciudad de México, 1992. - pág. 245.

Naciones Unidas DECLARACIÓN DE ESTOCOLMO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE HUMANO [Conferencia] // Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano. - 1972.

Naciones Unidas Naciones Unidas [En línea] // Decenio Internacional para la acción "El agua fuente de vida" 2005-2015. - 22 de Octubre de 2014. - 29 de Mayo de 2017. - <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. // Diario Oficial de la Federación. - México : [s.n.], 1997.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal // Diario Oficial de la Federación. - México : [s.n.], 1998.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público // Diario Oficial de la Federación. - México : [s.n.], 1998.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final // Diario Oficial de la Federación. - México : [s.n.], 2003.

RAMALHO RUBENS SETTE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES [Libro]. - [s.l.] : REVERTÉ, 1990. - pág. 716.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Programa Nacional Hídrico 2014-2018 [Libro]. - D.F. : CONAGUA, abril 2014. - pág. 139.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Atlas del Agua en México 2015 [Libro]. - D.F. : CONAGUA, diciembre 2015. - pág. 135.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Estadísticas del Agua en México, Edición 2016 [Libro]. - [s.l.] : CONAGUA, 2016. - pág. 276.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación [Libro]. - [s.l.] : CONAGUA, 2015. - pág. 275.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Semblanza Histórica del Agua en México [Libro]. - [s.l.] : CONAGUA, 2009. - pág. 82.

SEMARNAT Comisión Nacional del Agua Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, edición 2016 [Libro]. - [s.l.] : CONAGUA, 2016. - pág. 190.

Seoáñez Calvo Mariano Tratado de gestión del medio ambiente urbano [Libro]. - [s.l.] : MUNDI PRENSA, 2001. - pág. 394.

Soriano Rull Albert y Pancorbo Floristan Francisco Javier Suministro, Distribución y Evacuación Interior de Agua Sanitaria [Libro]. - [s.l.] : Marcombo, 2012. - pág. 506.

Sotelo Ávila Gilberto Hidráulica de canales [Libro]. - [s.l.] : UNAM, Facultad de Ingeniería, 2002. - Primera Edición : pág. 836.

Stefanakis Alexandros, Akratos Christos S. and Tsihrintzis Vassilios A. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment [Book]. - [s.l.] : Elsevier Science, 2015. - p. 378.

Suárez Cortez Blanca Estela Historia de los usos del agua en México: oligarquías, empresas y ayuntamientos (1840-1940) [Libro]. - [s.l.] : CONAGUA; CIESAS; IMTA, 1998. - pág. 308.

Tebbutt T.H.Y. Principles of Water Quality Control [Libro]. - [s.l.] : Butterworth-Heinemann, 1998. - Fifth Edition : pág. 288.

Técnica Misión Ribas Ambiente y Desarrollo Sustentable [Publicación periódica]. - [s.l.] : Misión Ribas Técnica.

Tousignant Eric, Fankhauser Olivier y Hurd Sarah Guidance Manual for the Design, Construction and Operations of Constructed Wetlands for Rural Applications in Ontario [Libro]. - [s.l.] : Stantec Consulting Ltd R&TT, Alfred College (University of Guelph), South Nation Conservation., 1999. - pág. 159.

Trapote Jaime Arturo Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas [Libro]. - [s.l.] : Universidad de Alicante, 2011. - pág. 436.

U.S. Environmental Protection Agency Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters [Libro]. - [s.l.] : EPA, 2000. - pág. 165.

UNAM Facultad de Arquitectura Plan maestro del Bosque de San Juan de Aragón [Libro]. - [s.l.] : UNAM, Facultad de Arquitectura, 2008.

UNAM Facultad de Ingeniería Diagnóstico de las condiciones ambientales en que se encuentra actualmente el Bosque de San Juan de Aragón [Libro]. - [s.l.] : UNAM, Facultad de Ingeniería, 2007.

UNESCO [Conferencia] // Conferencia Intergubernamental de Tbilisi sobre Educación ambiental. - 1977.

UNESCO Congreso internacional UNESCO-PNUMA sobre la educación y formación ambientales [Conferencia] // Elementos para una estrategia internacional de acción en materia de educación y formación ambientales para el decenio de 1990. - 1987.