

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS PARA MANEJO DE AGUAS RESIDUALES

Iván Andrés Sánchez Ortiz
David Robbins
Grant Ligon



Editorial
Universidad de Nariño

êditorial

Universidad de **Nariño**

**PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE
SISTEMAS DESCENTRALIZADOS
PARA MANEJO DE AGUAS RESIDUALES**

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS PARA MANEJO DE AGUAS RESIDUALES

Iván Andrés Sánchez Ortiz
David Robbins y Grant Ligon

êditorial
Universidad de **Nariño**

Sánchez Ortiz, Iván Andrés

Principios para el diseño de sistemas descentralizados para manejo de aguas residuales / Iván Andrés Sánchez Ortiz, David Robbins, Grant Ligon --1ª. ed. -- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2024

327 páginas : ilustraciones, gráficas, tablas, fotografías

Incluye referencias bibliográficas p. 319-327

ISBN: 978-628-7679-98-6

1. Aguas residuales--Manejo 2. Aguas residuales--Tratamiento 3. Análisis de agua residuales 4. Construcción—Sistemas descentralizados 5. Aguas residuales—Tratamiento terciario 6. Lagunas de estabilización 7. Lagunas anaerobias 8. Desarenadores 9. Alcantarillados simplificados 10. Alcantarillados a presión. I. Robbins, David II. Ligon, Grant

628.3 S211pr – SCDD-Ed. 22



SECCIÓN DE BIBLIOTECA

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS PARA MANEJO DE AGUAS RECIDUALES

© Editorial Universidad de Nariño

© Iván Andrés Sánchez Ortiz

David Robbins

Grant Ligon

ISBN: 978-628-7679-98-6

Primera Edición

Corrección de estilo: Manuel E. Martínez R.

Diseño y diagramación: Jenny Alexandra Narváez

Fecha de publicación: Noviembre 2024

San Juan de Pasto, Nariño, Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o cualquier propósito, sin la autorización escrita de sus autores o de la Editorial Universidad de Nariño

PREFACIO

En este texto se abordan paso a paso los aspectos necesarios para la selección de la(s) tecnología(s) que sean compatibles con una realidad específica y que permitan realizar de manera eficiente y lo más económica posible un Sistema Descentralizado para el Manejo de las Aguas Residuales (SDMAR); se enfatiza en el término manejo, pues se pretende incentivar el pensamiento que permita trascender el tratamiento de los efluentes y considerar el eventual reúso del líquido tratado y de subproductos del tratamiento. Aunque se comentan aspectos relevantes sobre opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales, el libro no es un manual de diseño de sistemas de tratamiento de efluentes, pues existen diversas referencias mundiales que abordan los parámetros y criterios de diseño para cada tecnología y tipo de agua residual.

El libro enfatiza en la no existencia de un modelo o solución universal y se describen las informaciones necesarias para que una institución, una comunidad o una región pueda elegir una adecuada opción para la gestión de las aguas residuales. Para seleccionar el sistema de manejo de los efluentes es fundamental: caracterizar las fuentes de las aguas residuales, evaluar lugares para implementar el SDMAR, identificar las tecnologías compatibles con las características del lugar junto al tipo de efluente a tratar y seleccionar la(s) tecnología(s) con base en ello. Cada etapa de este tipo se comenta con énfasis en las realidades de países en desarrollo, en la implementación de tecnologías sencillas, en el potencial aprovechamiento del terreno disponible y del suelo como parte del sistema de tratamiento.

Así mismo, en el libro se enfoca la temática desde una perspectiva práctica con suficiente argumentación técnica, sin el uso de un número excesivo de referencias y con inclusión de importante material gráfico, para ello se conjugó la formación académica con la experiencia científica y de consultoría de sus autores a nivel de análisis, diseño, construcción y operación de SDMAR en países como Filipinas, China, Vietnam, Camboya, Tailandia, Indonesia, Colombia, Perú, Brasil, Ecuador, Méjico, Guatemala, El Salvador y Honduras. Las experiencias antes comentadas y la ejecución de proyectos financiados por entidades tales como, el Banco Mundial, USAID, el Banco Asiático de Desarrollo, la Fundación Bill & Melinda Gates, CAPES y CNPQ, brindan herramientas que orientarán a los lectores en los criterios preliminares para seleccionar y diseñar un SDMAR adaptado a las condiciones específicas de su localidad.

CONTENIDO

DEDICATORIA	19
CAPÍTULO 1.	22
Introducción a los sistemas descentralizados de manejo de aguas residuales	
Preámbulo	24
1.1 Antecedentes	27
1.1.1 Combinación de tecnologías para formar SDMAR	29
1.1.2 Evolución del concepto	30
1.1.2.1 Una nota sobre la escala del proyecto	31
1.2 El propósito del libro	33
1.3 La audiencia para este texto	34
1.4 El modelo de desarrollo de los SDMAR	36
1.5 Cómo usar la versión impresa de este LIBRO	38
1.6 Definiciones y términos Básicos	39
1.7 Guía de estudios de caso	43



CAPÍTULO 2.	46
Caracterización de la fuente	
Preámbulo	48
2.1 Introducción	50
2.2 Composición de las aguas residuales	52
2.2.1 Aguas negras y aguas grises	52
2.3 Categorías de fuentes de aguas residuales	54
2.3.1 Edificaciones residenciales	55
2.3.2 Plazas de mercado	55
2.3.3 Hospitales e instalaciones de atención de la salud	57
2.3.4 Centro de sacrificio	60
2.3.5 Hoteles, centros turísticos y restaurantes	63
2.3.6 Edificios para oficinas y centros de culto	64
2.3.7 Escuelas y colegios	64
2.3.8 Otras instalaciones comerciales	64
2.3.9 Sistemas de aguas residuales comunitarias	65
2.4 Paso 1: determinación del caudal de diseño	67

2.4.1	Medición del flujo	67
2.4.1.1	Factor de conversión de aguas residuales	69
2.4.2	Recopilar y aplicar datos de proyectos similares	70
2.4.3	Uso de tablas estándar de valores de generación de aguas residuales	70
2.5	Paso 2: Evaluación de las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales	72
2.6	Paso 3: cuantificación de la variabilidad del flujo	75
2.6.1	Ecualización del caudal	75
2.7	Nutrientes en las aguas residuales	76
2.7.1	Nitrógeno	76
2.7.2	Fósforo	77
2.8	Otros contaminantes de las aguas residuales	80
2.8.1	Grasas y aceites	80
2.8.2	Pelusa	80
2.8.3	Residuos sólidos	80
2.9	Algunos parámetros físicos y químicos	81
2.9.1	Temperatura	81
2.9.2	pH	82
2.9.3	Componentes químicos en las aguas residuales que pueden presentar retos	83
2.10	Muestreo y análisis	83
2.10.1	Preparación de un plan de muestreo	84
2.10.2	Recolección de muestras representativas	85
2.10.3.	Adecuado manejo y preservación de las muestras de campo	86
2.10.4	Cadena de custodia y procedimientos para identificación de muestras	89
2.10.5	Aseguramiento de la calidad/control de calidad	90
2.10.5.1	Aseguramiento y control de calidad en el campo	90
2.10.5.2	Aseguramiento y control de calidad en laboratorio	91
2.11	Revisión de los resultados encontrados	92

CAPÍTULO 3.	94
Evaluación del sitio	
Preámbulo	96
3.1 Introducción	97
3.1.1 Paso 1 – Información de Referencia	98
3.2 Paso 2 - Elaboración y uso de un esquema del plano del lugar	98
3.2.1 Procedimiento para elaborar un esquema del plano del sitio	100
3.2.2 Estimativa del área de terreno disponible para los componentes del SDMAR	105
3.2.3 Identificación de las características del sitio	106
3.3 Paso 3 - Evaluación de los suelos	107
3.3.1 Actividades involucradas en la evaluación de suelos	108
3.3.2 Apiques y sondeos o perforaciones de suelo	109
3.4 Paso 4 – Identificación y evaluación de los horizontes del suelo	110
3.4.1 Profundidad y espesor del suelo	112
3.4.2 Textura del suelo	112
3.4.3 Evaluación de la estructura del suelo	116
3.4.4 Consistencia del suelo	117
3.4.5 Estudios formales de suelos y sus propiedades fisicomecánicas	117
3.4.5.1 Caracterización granulométrica de suelos	118
3.4.5.2 Clasificación de suelos finos – Límites de consistencia	119
3.4.5.3 Medición de la permeabilidad de los suelos	120
3.4.5.4 Ensayo normal de compactación de suelos	122
3.4.5.5 Ensayo para control de la densidad de un suelo en campo	123
3.5 Paso 5 – Identificación del nivel freático oscilante y otras condiciones limitantes	124
3.5.1 Profundidad de las condiciones limitantes	126

3.6	Paso 6 - Evaluación de la pendiente y la topografía	126
3.6.1	Evaluación de la pendiente y su impacto en el SDMAR	127
3.6.2	Relación de la topografía con la pendiente	128
3.6.3	Posición del paisaje y descripción de la pendiente	130
3.6.4	Determinación de la tasa de infiltración del efluente y otros aspectos asociados al suelo	131
3.7	Paso 7 - Determinación de eventuales condiciones limitantes por aguas superficiales	133
3.8	Paso 8 - determinación de cómo el uso del suelo en terrenos aledaños afecta la selección del SDMAR	134
3.9	Paso 9 - Identificar los servicios públicos básicos, SDMAR preexistentes y posibles conflictos relacionados	136
3.9.1	Servicio eléctrico	137
3.9.2	Disponibilidad de agua para la operación y mantenimiento del sistema	137
3.9.3	Evaluación de los componentes y equipo de un SDMAR ya existente	138
3.9.3.1	Acceso a tanques sépticos existentes	139
3.9.3.2	Pruebas de fugas – procedimiento paso a paso	140
3.9.3.3	Remoción o abandono de tanques sépticos existentes	142
3.9.3.4	Abandono de tanques sépticos en el sitio.	143
3.10	Paso 10 - evaluación de aspectos relativos a la accesibilidad al SDMAR	143
3.10.1	Evaluación de la accesibilidad del sitio	144
3.11	Paso 11 - oportunidades para beneficiarse de los subproductos del tratamiento de las aguas residuales	147
3.12	Paso 12 - aspectos normativos del peritaje In Situ	148
3.13	Revisión de las informaciones obtenidas	149

CAPÍTULO 4.	152
Tecnologías de SDMAR	
Preámbulo	153
4.1 Categorías de los Componentes del SDMAR	155
4.2 Categorías de componentes típicos del SDMAR	156
4.3 Interfaz de usuario y pretratamiento	157
4.3.1 Interfaz de Usuario	157
4.3.1.1 Inodoros EcoSan	157
4.3.1.2 Otros sistemas innovadores	159
4.3.2 Pretratamiento	162
4.3.2.1 Sistemas de canastas y rejillas para retención de sólidos de gran tamaño	162
4.3.2.2 Trampas de pelusa para lavanderías comerciales	166
4.3.2.3 Trampas de residuos sólidos para plazas de mercado	166
4.3.2.4 Desarenadores	167
4.3.2.5 Trampas de grasa para servicios de preparación y suministro de alimentos	170
4.4 Conducción	173
4.4.1 Alcantarillados convencionales por gravedad para pequeños proyectos de SDMAR	174
4.4.2 Alcantarillados simplificados	177
4.4.3 Alcantarillados libres de sólidos	178
4.4.4 Alcantarillados a presión	178
4.4.4.1 Componentes del sistema de bombeo de efluentes de tanque séptico	180
4.5 Tratamiento primario	189
4.5.1 Tanques sépticos	189
4.5.2 Reactores anaerobios con deflectores	191
4.5.3 Digestores anaerobios	195
4.5.4 Otras opciones de tratamiento primario	198
4.6 Tratamiento secundario	201
4.6.1 Sistemas de dispersión en el suelo	202
4.6.1.1 Zanjas de infiltración	202
4.6.1.2 Sistemas de infiltración alternativos no mecanizados similares a las zanjas	206
4.6.1.3 Sistemas de montículos	208

4.6.1.4	Sistemas de irrigación por goteo	209
4.6.2	Humedales construidos	211
4.6.3	Lagunas de estabilización	218
4.6.3.1	Lagunas anaerobias	219
4.6.3.2	Lagunas facultativas	221
4.6.3.3	Lagunas aerobias	222
4.6.3.4	Lagunas aireadas	222
4.6.3.5	Caídas hidráulicas-Escaleras de aireación	224
4.6.4	Filtros biológicos con medio soporte	230
4.6.5	Sistemas de tratamiento aerobio	233
4.7	Tratamiento terciario	237
4.7.1	Filtración terciaria	237
4.7.2	Desinfección	238
4.7.2.1	Radiación ultravioleta	238
4.7.2.2	Cloración	239
4.8	Fin del ciclo – descarga o reutilización segura	241
4.9	Determinación de nivel de tratamiento requerido	243
4.9.1	Cumplimiento de los estándares de descarga u otros niveles de acatamiento normativo	244
4.9.2	Cumplimiento de los estándares de reutilización	244
 CAPÍTULO 5.		 248
Selección de tecnologías para tratamiento de aguas residuales		
Preámbulo		250
5.1	Interpretación de los datos recolectados a partir de la fuente y el sitio	251
5.1.1	Concepto de la relación entre el caudal y la disponibilidad de terreno	252
5.2	Estrategias para la selección de tecnologías	256
5.3	Conclusiones de cara al futuro	
	Apéndices. Aplicación práctica de los datos de evaluación de suelos	255
	Apéndice I. Aspectos adicionales sobre la evaluación de suelos	

A1.1	Generalidades del proceso de evaluación de suelos	269
A1.2	Pasos para determinar la TILP	274
A1.3	Métodos y procedimientos para evaluación de suelos	276
A1.3.1	Textura y estructura del suelo	276
A1.3.2	Consistencia del suelo	277
A1.3.3	Descripción de la pendiente y posición del paisaje	279
	Apéndice II. Ejemplo de interpretación de datos de evaluación de suelos y cálculo de TILP.	282
	Apéndice III. Informaciones útiles para SDMAR sobre estudios de caso	287
	Estudio de caso uno: Manejo integrado de aguas residuales y biosólidos en un matadero municipal en León, Nicaragua	287
	Estudio de caso dos: Tratamiento de efluentes y biosólidos de una planta de sacrificio en Nariño, Colombia	291
	Estudio de caso tres: Tratamiento semicentralizado de aguas residuales para nuevos desarrollos habitacionales en Nindirí, Nicaragua	296
	Estudio de caso 4: Sistema de depuración biológica de aguas residuales domésticas de la escuela San Felipe Neri en el Municipio de Pasto (Colombia)	299
	Estudio de caso 5: Wetlands de flujo subsuperficial asociados a biodigestores para el tratamiento de efluentes de porcicultura y de origen doméstico	302
	Estudio de caso 6: Wetlands construidos como alternativa para tratamiento de aguas residuales para regiones rurales, periurbanas y comunidades aisladas: Aplicación de humedales construidos en áreas rurales	308
	Estudio de caso 7: Consideraciones sobre la remoción periódica del lodo en comunidades de bajos ingresos y dificultades adicionales específicas	309
	Referencias Bibliográficas	
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	315



DEDICATORIA

de Iván Andrés Sánchez Ortiz:

Dedico inicialmente este libro al hogar que el Señor me ha brindado: a mis preciosos hijos Bianca Estrella, Juan Esteban y María José, que son fuente permanente de inspiración, amor y buen humor, y especialmente a mi amada esposa Paula Andrea, quien, con inmenso cariño, espiritualidad, sabiduría, sacrificio e integridad ha sido mi soporte y compañía en esta bella travesía y me ha brindado el aliento en los momentos de adversidades. También dedico este libro a mis estudiantes y exalumnos de pregrado y postgrado y a la Universidad de Nariño por todo el apoyo que me ha brindado; a mis múltiples maestros en los diversos niveles de formación en la Universidad de Nariño, la Universidade Estadual Paulista (UNESP) y la Universidade Federal de Viçosa (UFV), así como a mi mamá Alicia y mis hermanos Sandra y José.

En este libro se han recopilado conceptos y conocimientos fruto de la experiencia profesional y la formación académica e investigativa de los autores en torno al tratamiento y disposición de aguas residuales domésticas de forma descentralizada. Para elaborar el texto nos inspiró el anhelo de brindar soluciones eficientes, de bajo costo y lo más sencillas posibles a la gestión de efluentes para poblaciones en vías de desarrollo de América Latina y El Caribe; por ello, a esas comunidades dedico también este libro. Cabe mencionar que en 2014 David y Grant publicaron a través de IWA Publishing un texto similar basado fundamentalmente en las condiciones de países asiáticos como Vietnam y Camboya, y ya que nuestras amadas América del Sur y Centroamérica requieren de grandes esfuerzos para mejorar las condiciones de saneamiento de muchas comunidades decidimos elaborar este documento, donde cerca del 80% de su contenido se basa en informaciones de la región, y que esperamos sirva de instrumento para que ingenieros, académicos y líderes comunitarios encuentren la base de alternativas para gestionar sus aguas residuales urbanas y domésticas de la manera más adecuada.



de David Robbins y Grant Ligon:

Este libro está dedicado a las personas de los sectores público y privado que integran la cadena de servicios de saneamiento quienes liderarán el camino hacia el mejoramiento universal del saneamiento en América Latina. Dichas personas incluyen a quienes instalan y hacen mantenimiento a los sistemas para manejo de aguas residuales, a los topógrafos, a los ingenieros diseñadores, constructores, supervisores, planificadores y reguladores que ayudan a implementar las mejores prácticas de saneamiento, así como a los empresarios que permiten que el sector privado brinde servicios en las diversas escalas. En América Latina 2 de cada 5 personas carecen de un saneamiento gestionado de manera segura; buena parte de la respuesta a esa situación radica en el mejoramiento del saneamiento in situ, que es el arte y la ciencia de tratar las aguas residuales en el lugar donde se generaron. Ello incluye los tanques sépticos, biodigestores y zanjas de infiltración para sistemas residenciales, humedales construidos y otros sistemas naturales para su aplicación en sistemas residenciales de mediano tamaño, instalaciones públicas o comerciales y plantas de tratamiento de aguas residuales para generadores de efluentes de mayor tamaño, como hospitales y escuelas.

Una primera versión de este libro se publicó hace 10 años y, desde entonces, los principios de diseño, instalación y operación de sistemas in situ en comunidades en desarrollo se han utilizado en el sur y sureste de Asia, el este de Asia y África para desarrollar sistemas de aguas residuales in situ de bajo costo utilizando materiales y mano de obra locales para su construcción, y el suelo natural para la dispersión de efluentes. Estamos muy entusiasmados con esta colaboración con la Universidad de Nariño para llevar los mensajes del saneamiento in situ sostenible a América Latina, con estudios de casos y tecnologías relevantes a nivel regional y local. Esperamos que este libro sirva de apoyo en sus trabajos y en su reflexión sobre las diferentes estrategias y soluciones para abordar la gestión de aguas residuales in situ, no solo a través de sistemas individuales, sino también a través de programas organizados de mejora del saneamiento comunitario que permitan la transformación a escala.

En nombre de los autores, ¡gracias por su trabajo!

01

**INTRODUCCIÓN
A LOS SISTEMAS
DESCENTRALIZADOS
DE MANEJO DE
AGUAS RESIDUALES**

En este capítulo se aborda la importancia de los sistemas descentralizados para manejo de aguas residuales (SDMAR), y se presenta el propósito, la necesidad y el público objetivo para este libro; también se introducirá el modelo de desarrollo de los SDMAR; y se presentarán algunos términos técnicos y condiciones comunes a estos sistemas.



Figura 1.1. El señor Noun Makara (parte superior derecha) y su equipo fabrican componentes para letrinas fuera de Phnom Penh, Camboya. Utilizar el poder de los mercados –principalmente locales– es una herramienta importante para incrementar gradualmente el suministro del servicio de disposición de las aguas residuales. Las imágenes son de un proyecto para formación de capacidades de las comunidades de IDE Camboya.

PREÁMBULO

Las fotos de la fábrica de letrinas del Sr. Makara cerca de Phnom Penh, Camboya (Figura 1.1), ilustran el uso del poder de los mercados para incrementar el saneamiento en regiones con deficiencias en dicho servicio.

El aumento de cobertura y el mejoramiento del saneamiento con base en el mercado combina la habilidad de suministrar productos con programas que mejoren la demanda y a la vez ofrezcan incentivos promovidos por gobiernos locales comprometidos con dicha causa.

A continuación, se dará una mirada más detallada a cada componente con énfasis en comunidades con falta de saneamiento básico:

1. Generación de la demanda: Las personas generalmente están dispuestas a pagar por un saneamiento mejorado si creen que responderá a sus necesidades, carencias y deseos. Para entender tales aspectos asociados a una población objetivo es necesario reunir informaciones. Los especialistas en desarrollo de saneamiento usan herramientas como encuestas de clientes, discusiones de grupos focales y entrevistas con interesados para averiguar lo que las personas realmente quieren, lo que piensan y lo que creen que necesitan en relación al saneamiento. En algunos casos, el deseo primordial de las personas es mejorar la salud de sus hijos y familia; en otros escenarios, podría ser la conveniencia de implementar sistemas de tuberías internas, o la posibilidad de implementar una unidad sanitaria. Cabe mencionar que la seguridad es una de las mayores motivaciones para adoptar el uso de inodoros en los hogares. La defecación a cielo abierto es una actividad peligrosa, especialmente para las mujeres, por ello la seguridad y el estatus social son fuertes motivadores para el uso de unidades sanitarias domésticas. Las tecnologías de saneamiento se promueven para abordar las necesidades, carencias y deseos de la población tratada como cliente, las personas tendrán más disposición para invertir en los servicios que recibirán; también es importante notar que, para lograr sostenibilidad, la mejora del saneamiento debe cumplir con los compromisos adquiridos, si no, las personas destinarán esos recursos a otro fin.

2. Cadena de valor del saneamiento: La cadena de valor del manejo descentralizado de aguas residuales describe cómo las tecnologías son fabricadas, vendidas, entregadas, instaladas, operadas y cómo se les da mantenimiento. Para sostener la cadena de valor, los productos deberían fabricarse usando materiales y mano de obra locales, y los proveedores de servicios deberían entrenarse con ejercicios definidos de formación de capacidades. Cuando se identifica la demanda del servicio (tal como se describió anteriormente), la cadena de valor genera ventas, utilidades, empleos y desarrollo económico.

La cadena de valor del servicio de saneamiento se ilustra en la imagen que se presenta a continuación (Figura 1.2). Cuando la cadena funciona de manera adecuada esta sirve como un motor para el desarrollo económico y la creación de nuevos empleos. El estimular la demanda de servicios por medio de incentivos es una de las maneras de dinamizar la cadena del servicio de saneamiento.

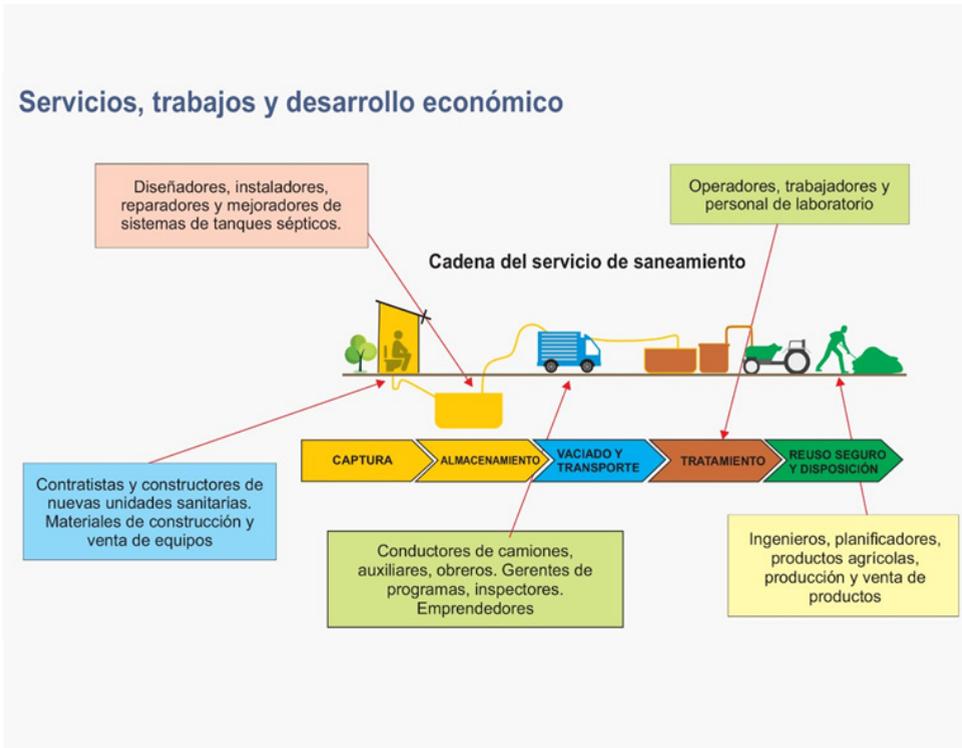


Figura 1.2. Cadena de valor del servicio de saneamiento.

3. Entorno propicio: Consiste en la combinación de incentivos y el marco regulador que se encarga de promover, en vez de inhibir, la participación en programas de mejora del saneamiento. Los buenos programas incluyen incentivos que ofrecen beneficios tangibles para aquellos que cumplen con las condiciones definidas por dichos programas; de igual manera establecen disposiciones para ejecutar medidas que propicien el cumplimiento de las condiciones para aquellos que aún no lo hacen. El entorno propicio también se refiere a cómo los gobiernos locales interactúan con ciudadanos y negocios. Los marcos de trabajo que aceleran y simplifican un proceso regulador justo y transparente son herramientas poderosas que los gobiernos locales pueden utilizar para incrementar el saneamiento aplicando el manejo descentralizado de las aguas residuales.

Existen básicamente seis componentes asociados al entorno propicio:

- a. Marco legal y regulatorio
- b. Organizaciones de tipo institucional
- c. Habilidades y capacidad instaladas
- d. Acuerdos financieros (tales como propiciar el pago progresivo por la instalación de los servicios de saneamiento en vez de un único pago elevado, que inclusive acumule periodos del servicio)
- e. Aceptación socio cultural
- f. Apoyo de tipo gubernamental para el programa

A continuación, en la Figura 1.3 se ilustran los componentes relacionados con un entorno propicio para programas que propendan a mejorar el saneamiento

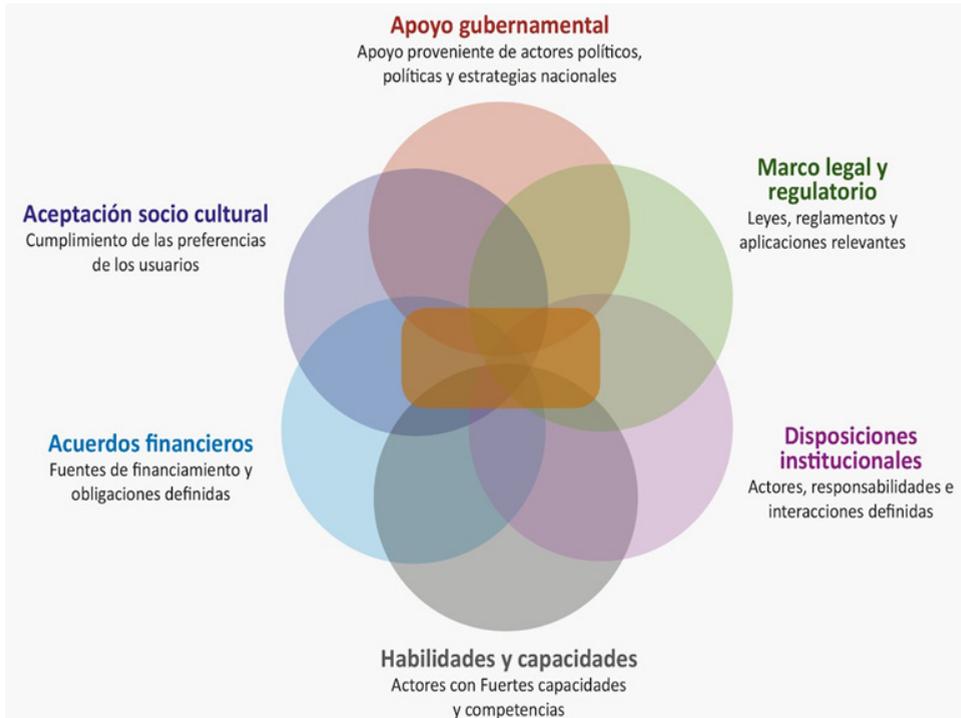
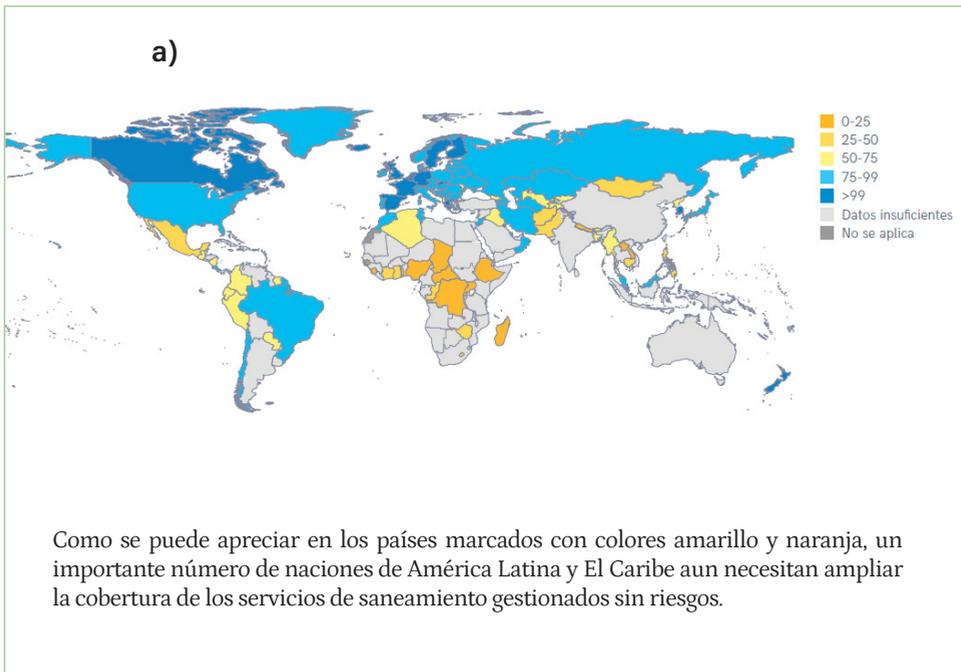


Figura 1.3. Entorno propicio para programas para la mejora del saneamiento.

Para lograr mejoras de saneamiento a escala se requiere de campañas de promoción basadas en la evidencia, una cadena robusta de valor y de servicio y un entorno propicio para su funcionamiento. Cuando estos tres elementos se encuentren presentes de manera simultánea, el mejoramiento del saneamiento puede constituirse en una fuerza para lograr un valioso cambio social y ambiental

1.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas, muchas organizaciones han documentado la falta de saneamiento básico para gran parte de la población mundial. Se estima que en 2020 un total de 3.600 millones de personas carecían de servicios gestionados de manera segura, de los cuales 1.900 millones disponían de servicios básicos, 580 millones tenían servicios limitados, 616 millones utilizaban instalaciones no mejoradas y 494 millones practicaban la defecación al aire libre (OMS & UNICEF, 2022). De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), para el año 2017, la proporción global de la población de América Latina y el Caribe en regiones urbanas que utilizó servicios de saneamiento gestionados sin riesgos fue únicamente del 37,03 %. En años recientes se estimó que más de 1,5 mil millones de hogares poseen alcantarillado sanitario; sin embargo, las aguas residuales se descargan al medioambiente sin ningún tipo de tratamiento (Baum et al., 2013). Como región, aunque América Latina tiene alta cobertura de saneamiento básico (80 % de la población total), todavía cuenta con más de 200 millones de personas que poseen conexión a un sistema de alcantarillado sanitario sin ningún tipo de tratamiento antes de la descarga al medioambiente (Baum et al., 2013); por tal motivo, la necesidad del manejo de aguas residuales en dicha región aún es alta. Un esquema del porcentaje de la población global que utiliza servicios de saneamiento gestionados de manera segura se presenta en la Figura 4.a, y la Figura 4.b presenta algunos valores para países de América Latina y el Caribe.



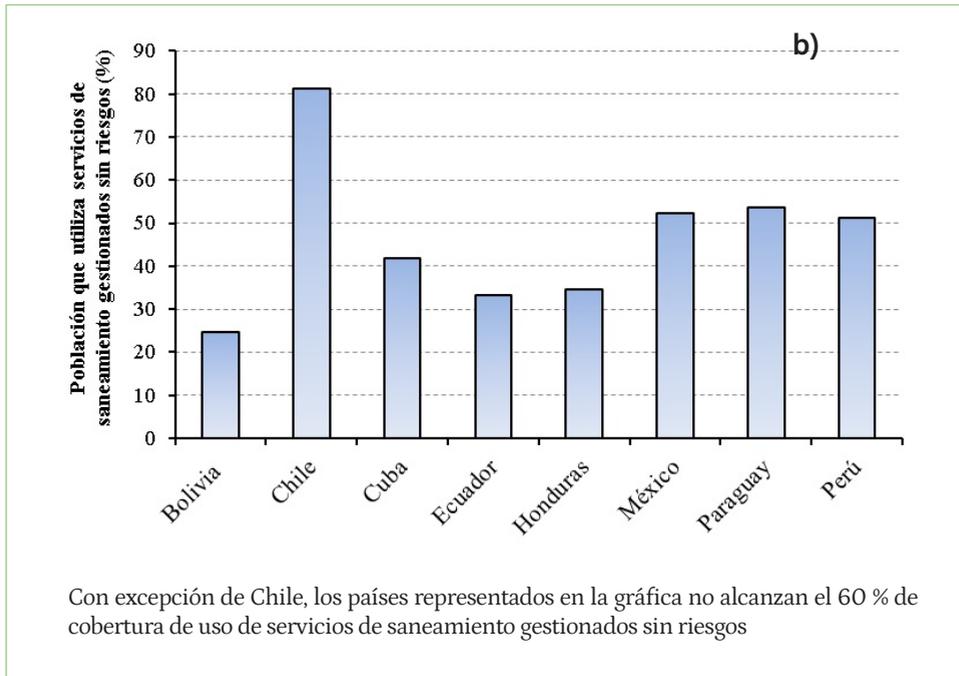


Figura 1.4. a) Porcentaje de la población que en el año 2020 utilizó servicios de saneamiento gestionados de manera segura (Fuente: Adaptada de OMS/UNICEF, 2022, p. 8) y b) Porcentaje de Población que utilizó servicios de saneamiento gestionados sin riesgos para diversos países de América Latina (Fuente: Los Autores, con base en informaciones de: CEPAL, 2019)

Este problema, sin duda, representa una crisis de salud pública, dado el fuerte vínculo entre la falta de tratamiento de las aguas residuales y la incidencia de enfermedades y muerte, especialmente en los niños. La falta de tratamiento de aguas residuales es una carga para el sistema de salud y, por ende, se traduce en una carga financiera significativa para individuos, familias, comunidades y gobiernos; pero es una carga evitada. La falta de saneamiento induce a retrocesos en el crecimiento económico. El saneamiento deficiente se traduce en altos costos financieros, del orden de miles de millones de dólares, para algunos países. El Banco Mundial (The World Bank, 2022) estima que el costo del saneamiento deficiente representó, en 2007, para Bangladesh del orden del 6,3 % del Producto Interno Bruto (PIB); para India, en 2006, representó el 6,4 % del PIB; para Camboya, en 2005, del orden del 7,2 % del PIB; para Níger, en 2012, el 2,4 % del PIB; y para Pakistán, en 2006, el 3,9 % del PIB. En la primera década del presente siglo, se estimó que para América Latina solamente 3'100.000 de los 52'000.000 m³ de aguas residuales recolectadas diariamente (6%) reciben tratamiento adecuado (Egocheaga y Moscoso, 2004). Para el contexto colombiano, según informaciones de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y el Departamento Nacional de Planeación de la República de Colombia (Colombia, 2019), entre los 1204 municipios la cobertura en el servicio público de alcantarillado para el año 2018 fue del 82,8



% en el área urbana y de tan solo 14,4 % en el sector rural. Para el mismo año se identificaron 699 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el país, la mayoría en los departamentos de Cundinamarca (119) y Antioquia (90); mientras que departamentos como Guainía y Vichada solo poseen 2 PTAR; Risaralda solo tiene una PTAR; y Amazonas y Guaviare carecen de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Para cumplir con la necesidad del tratamiento de aguas residuales, en ciudades y municipios de gran, mediano y pequeño tamaño de algunos países, se han implementado sistemas centralizados para tratamiento de los efluentes urbanos. Sin embargo, los sistemas centralizados, con excepción de los centros urbanos más densamente poblados, no necesariamente son las mejores opciones para los países en vías de desarrollo, incluyendo los contextos de América Latina, ya que la adopción de sistemas centralizados o descentralizados depende de la densidad de la población, la topografía del lugar, y otros factores técnicos y socio-culturales. Algunas poblaciones, ciudades pequeñas, y muchas veces los sectores comerciales, industriales, y públicos de las ciudades, carecen de sistemas de saneamiento adecuados, con tecnologías descentralizadas que propicien, además del tratamiento, la disposición controlada e inclusive el reúso de las aguas residuales tratadas.

Los beneficios de los sistemas descentralizados para manejar las aguas residuales son diversos, ya que suelen requerir tecnologías más sencillas y tratar los efluentes cerca, favorece la reutilización económica de estos; además, dichos sistemas suelen ser más sencillos de instalar y mantener y pueden contribuir al desarrollo económico local. En efecto, los sistemas descentralizados mejoran el saneamiento y la salud ambiental, y pueden crear empleos en las cadenas de valor y de servicio, desde los fabricantes de equipos y distribuidores de insumos, hasta diseñadores, instaladores y operadores de los sistemas de tratamiento.

1.1.1 Combinación de tecnologías para formar SDMAR

Los sistemas descentralizados para manejo de aguas residuales, al igual que sus contrapartes de sistemas centralizados, usan una variedad de tecnologías que trabajan juntas para lograr diversos objetivos. Las principales metas por lograr son: 1) alejar las aguas residuales de los humanos, 2) reducir la contaminación producida por los efluentes recolectados, 3) dispersar o verter de forma segura las aguas residuales tratadas, y 4) reutilizar el efluente y otros residuos para fines benéficos. Tales metas se logran juntando las tecnologías apropiadas para formar sistemas que respondan a las necesidades específicas de los usuarios finales.

Los SDMAR, que varían grandemente, tanto en términos de complejidad como de costos, pueden incluir:

- **Separación de los residuos:** son los inodoros familiares o las letrinas de tipo familiar o comunitario, que sirven como el primer punto de recolección de los desechos humanos y ayudan a removerlos del posible contacto humano
- **Recolección y transporte:** conformado por el alcantarillado sanitario otras tecnologías que propician la recolección de las aguas residuales y que las transportan hacia sus lugares de tratamiento o disposición controlada
- **Tratamiento:** son las tecnologías encargadas de tratar las aguas residuales hasta un nivel que sea “seguro” para su vertimiento, para su reutilización o su dispersión, y
- **Reutilización y reciclaje:** se refiere a las tecnologías que permiten las labores de reutilización o reciclaje seguro del efluente tratado o de otros subproductos del proceso de tratamiento los efluentes, tales como los biosólidos, los nutrientes, el biogás, u otros biomateriales.

Para seleccionar las tecnologías apropiadas se requiere conocer la fuente de las aguas residuales y sus características relevantes, así como conocer las condiciones del sitio donde se manejarán los efluentes. El conocimiento de dicha información ayudará a los proveedores del servicio a optimizar sus sistemas y evitar costosos errores, que consumen tiempo, y que resultan de la selección de una tecnología inadecuada. Dada su importancia, uno de los temas centrales del presente texto es el abordaje de los procedimientos para caracterizar las fuentes de las aguas residuales, evaluar en dónde se realizará su manejo y tratamiento, y así determinar la potencialidad del reúso. Dichas temáticas servirán de apoyo a la toma de decisiones sobre las tecnologías apropiadas para los sistemas descentralizados de manejo de aguas residuales.

1.1.2 Evolución del concepto

En los últimos años, muchas organizaciones han utilizado una terminología diferente para describir los conceptos de manejo descentralizado de aguas residuales. El término “sistemas de tratamiento de aguas residuales en el sitio (onsite, o in situ)” se ha utilizado ampliamente en los Estados Unidos durante muchos años para describir sistemas anaerobios y campos de infiltración u otros sistemas para tratamiento de efluentes donde se maneja las aguas residuales en el mismo sitio donde fueron generadas. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) popularizó este término en su publicación Manual de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Sitio “Onsite Wastewater Treatment Systems Manual” (US EPA, 2002); dicho manual fue publicado por primera vez en 1980 y revisado en 2002. La Figura 1.5 ilustra la portada del manual en su versión de 2002, que representa su enfoque en tanques sépticos y sistemas de infiltración (blancos), de gran aplicabilidad para muchos tipos de instituciones y conjuntos de viviendas.

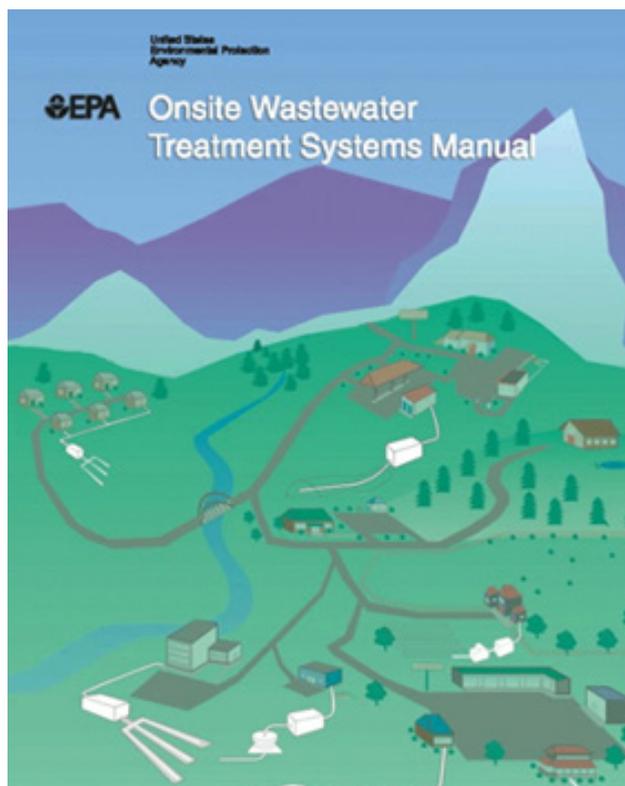


Figura 1.5. Portada del Manual de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en la página de internet de la USEPA, (Fuente: US EPA, 2002).

Esta es una buena esquematización del concepto asociado al manejo descentralizado de aguas residuales que forma la base de este texto sobre el Diseño de Sistemas para Manejo de Aguas Residuales para Condiciones Locales.¹

1.1.2.1 Una nota sobre la escala del proyecto

Definir un SDMAR es relativamente difícil, ya que la descentralización es un concepto de escala. A diferencia de los sistemas centralizados, que recolectan

¹La terminología “DEWATS” (correspondiente a la sigla de los Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales, en inglés, Decentralized Wastewater Treatment Systems -DEWATS-), fue popularizada por la Asociación

y manejan las aguas servidas en un solo lugar, los sistemas descentralizados manejan las aguas servidas en las cercanías de donde son generadas. Utilizando esta definición, un condominio o conjunto residencial con 100 hogares con tanques sépticos y campos de infiltración o individuales estaría utilizando un enfoque descentralizado asociado al manejo de las aguas residuales. Pero ¿Podría ser considerado como un SDMAR un sistema común que maneja las aguas residuales de los 100 hogares?, para los propósitos de este texto, la respuesta es “sí” ya que el manejo del agua residual se hace en un sitio cercano a las fuentes que generaron el agua residual -más cercano que un sistema de alcantarillado sanitario que transporta las aguas residuales hacia una planta de tratamiento que atiende a toda una ciudad. Pero ¿Qué sucede si 1.000 hogares en diferentes áreas combinan sus flujos de aguas residuales hacia un sistema común?, ¿Serían estos considerados aún como un SDMAR? La respuesta es así: para los propósitos de este texto, realmente no importa. La meta de este libro es brindar información útil y práctica sobre los pasos a seguir para caracterizar una fuente de aguas residuales, y evaluar el sitio donde serán manejadas, con el fin de tomar decisiones con criterio ingenieril sobre el uso de tecnologías apropiadas para tal fin. Dicho procedimiento se puede aplicar a proyectos para el manejo de aguas residuales en diversos tamaños y escalas.

de Investigación y Desarrollo Exterior de Bremen (*Bremen Overseas Research and Development Association* –BORDA-) en la década de 1990. La Asociación de Investigación y Desarrollo Exterior de Bremen considera que los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales pueden incluir diversas tecnologías para tratamiento primario y secundario de efluentes, con énfasis en aquellas que tienen requisitos de operación y mantenimiento con relativamente bajos costos, y que al mismo tiempo sean adecuadas para las regiones de bajos ingresos y condiciones subtropicales (Sasse, 1998). El principal ejemplo del modelo de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales consiste en un reactor anaerobio con baffles y un digestor de biogás, para el tratamiento primario, asociados a un humedal artificial, para efectuar el tratamiento secundario.

La Asociación Internacional del Agua (IWA, por las siglas en inglés de *International Water Association*) también está promoviendo el manejo descentralizado de las aguas residuales para los países en vías de desarrollo, y recientemente introdujo el concepto de *manejo de aguas residuales* (como alternativa al concepto de tratamiento de aguas residuales) como un enfoque más holístico. En su Conferencia sobre el Manejo Descentralizado de las Aguas Residuales en Asia en 2012, que se llevó a cabo con el apoyo de BORDA en la ciudad de Nagpur, India, dicho concepto fue ampliamente promovido. En vez de solamente hablar sobre la recolección, el tratamiento, y el vertimiento de las aguas residuales, se habló de la recolección, el tratamiento, la reutilización y el reciclaje del efluente tratado. Esta nueva visión del manejo integral de aguas residuales también incluye la planificación, financiamiento, promoción y regulación de todos los aspectos asociados al manejo de las aguas residuales, desde su generación hasta su último reúso o la dispersión o vertimiento final. Por dichas razones, en vez del término popular *plantas de tratamiento de aguas residuales* (PTAR), en este texto se usará la sigla SDMAR, que se refiere al (los) *sistema(s) descentralizado(s) para el manejo de las aguas residuales*.

1.2 EL PROPÓSITO DEL LIBRO

Las comunidades de países en vías de desarrollo, incluyendo países de América Latina, desean un saneamiento mejorado, con poblaciones más saludables, y son conocedoras del vínculo que existe entre el buen manejo de las aguas residuales y el mejoramiento en la salud pública. Además de ello, dichas comunidades con frecuencia tienen la capacidad económica para pagar por servicios de manejo adecuado de las aguas residuales e inclusive tienen la voluntad para realizar un pago justo.

Además, hay suficiente terreno disponible para implementar sistemas de manejo de aguas residuales donde no existe servicio de colecta, transporte, tratamiento y disposición final de efluentes; como complemento, los materiales de construcción están disponibles, la mano de obra calificada y los recursos para construir y mantener dichos sistemas. A veces, falta conocimiento para implementar un SDMAR de forma apropiada al contexto local. Infortunadamente, a veces solo se copia el diseño de otro proyecto para condiciones similares, adecuando los volúmenes según el número de personas a ser atendidas, pero no se considera qué tecnologías podrían ser las más apropiadas para el contexto social, económico, y ambiental de cada localidad.

Este texto pretende brindar la información necesaria para las comunidades que mejoren el saneamiento con un sistema de manejo de aguas residuales, para ello se presentarán los procedimientos y prácticas que pueden hacer del SDMAR una solución viable basada en la realidad de la comunidad. Se detallará un proceso que se puede utilizar para la toma de decisiones basadas en la naturaleza específica del proyecto a desarrollar. Este texto puede servir como manual, guía de campo, libro de texto y recurso general para quienes tienen el deseo de implementar un SDMAR. En particular, puede ser útil como una parte importante de los programas de formación de capacidades mediante actividades como las capacitaciones de apoyo (donde, empresas de servicios públicos más avanzadas -donantes- se unen a organizaciones prestadoras de servicios públicos menos avanzadas -beneficiarios- para compartir las mejores prácticas, entrenar y fortalecer actividades de aprendizaje). Los conceptos de este libro pueden servir como métodos efectivos para la enseñanza y la certificación de personal, también pueden ser de utilidad para procesos educativos a nivel universitario o para definir contenidos y competencias para certificación de personal entrenado.

Adicionalmente, este libro aborda la necesidad de mejores métodos de selección de tecnologías asociadas al manejo de aguas residuales, los cuales se logran a través del enfoque “del contexto específico” para la selección del SDMAR. El proceso explicado en el texto permite identificar qué tecnologías son más apropiadas dadas las características de la fuente y del sitio, considerando también las limitaciones de recursos propias de algunas comunidades; con

base en ello, una vez se complete el proceso de recopilación de datos, se pueden seleccionar las tecnologías apropiadas para satisfacer las necesidades específicas de la comunidad o del propietario.

El libro incluye listas de chequeo y procedimientos paso a paso para ayudar a los usuarios e implementadores de proyectos a recopilar datos necesarios para concebir e implementar un proyecto. También incluye estudios de caso para ilustrar las aplicaciones prácticas, así como herramientas, formularios y enlaces de internet para obtener información adicional que puedan ser utilizados por los implementadores de proyectos. Los estudios de caso destacan la forma en que otros implementadores de proyectos en escenarios específicos han recopilado y utilizado información relevante para implementar sus proyectos de manejo de aguas residuales.

Finalmente, las evaluaciones del sitio, el diseño y la implementación de sistemas de aguas residuales son servicios que pueden realizar tanto el sector privado y las entidades gubernamentales locales. Se espera que este texto sirva como una guía útil para las personas en diversos sectores u organizaciones que estén relacionados con la concepción e implementación de sistemas de manejo de aguas residuales, para simplificar sus tareas y mejorar sus resultados.

1.3 LA AUDIENCIA PARA ESTE TEXTO

Este libro está dirigido a beneficiar a tres audiencias principales: Proveedores de servicios de manejo de aguas residuales del sector privado; funcionarios reguladores del gobierno local y nacional encargados de supervisar el manejo de aguas residuales; y estudiantes universitarios y especialistas e investigadores de desarrollo, tales como aquellos dentro de las ONG's y grupos de la sociedad civil que trabajen para promover e incrementar mejoras en el saneamiento de comunidades. El fortalecimiento de capacidades para los proveedores del servicio de manejo de aguas residuales, incluyendo todos los niveles de tratamiento de efluentes, como el nivel primario (Figura 1.6), es importante para mejorar el saneamiento y aumentar el porcentaje de aguas residuales que reciban el tratamiento necesario y el manejo adecuado.



Figura 1.6. Pantalla para separación de cámaras en pozo séptico (A). Cámara de entrada y vista parcial de losa de cubierta de un pozo séptico (B). Obras localizadas en el entorno rural del departamento de Nariño – Colombia.

El grupo de individuos y propietarios de empresas que constituye la audiencia fundamental para este manual incluye: ingenieros y proveedores de servicios que estarán encargados de planificar los SMDAR actuales y futuros; contratistas a quienes se les solicite la instalación de los componentes del sistema de manejo de aguas residuales; personas que operan y mantienen los SDMAR, encargados de remover los lodos de reactores anaerobios tales como los tanques sépticos; los fontaneros y electricistas que apoyan a los contratistas en la instalación de los sistemas; y los proveedores de la tecnología para los SDMAR, quienes deben garantizar que los componentes que suministran son apropiados para las necesidades y condiciones específicas del proyecto.

Una segunda audiencia para este manual incluye aquellas personas responsables del manejo de aguas residuales en sus comunidades. Pueden ser funcionarios del gobierno, miembros de la comunidad, empresas de saneamiento, organizaciones o comités locales comunitarios. Dichas personas pueden manejar los planes de saneamiento local, hacer cumplir las leyes asociadas al manejo y disposición de las aguas residuales locales o supervisar la planificación e instalación de SDMAR.

La tercera audiencia para este manual incluye los estudiantes universitarios, tanto en el nivel de pregrado como de postgrado, y los trabajadores de desarrollo que promueven el saneamiento a través de los SDMAR. Los primeros proyectos de desarrollo en una comunidad o en una región frecuentemente se encuentran asociados a intervenciones de saneamiento. Los programas de desarrollo financiados por organizaciones internacionales en muchos casos comienzan su trabajo con la participación de las organizaciones locales para crear proyectos piloto. En vez de simplemente copiar la tecnología de un proyecto similar, el seguir un procedimiento “paso a paso” propiciará condiciones favorables para desarrollar sistemas adecuados a las condiciones locales y que sirva como un modelo de metodología a seguir para otros proyectos en la comunidad o en la región.

1.4 EL MODELO DE DESARROLLO DE LOS SDMAR

El Modelo de Desarrollo de los SDMAR (Figura 1.7) ofrece la base para el procedimiento “paso a paso” para la toma de decisiones informadas sobre las tecnologías más apropiadas. También sugiere un método para integrar dicho procedimiento en la estructura existente del gobierno local. Cada paso en el proceso podría estar asociado con una inspección física o una revisión de un plan de trabajo por parte de oficiales gubernamentales o especialistas capacitados, por ejemplo, a través de un programa de presentación de informes. La premisa del modelo es la siguiente:

Para determinar las tecnologías adecuadas para un SDMAR para un tipo específico de aguas residuales, primero hay que caracterizar adecuadamente la fuente de los efluentes, después se evalúa el sitio donde se realizará el manejo de las aguas residuales. Ambos pasos deben seguir los principios que se mencionarán a continuación.

La fuente de las aguas residuales debe ser caracterizada para determinar: el volumen de líquido a ser tratado; es decir el caudal de diseño del SDMAR; la concentración de materia orgánica y otros contaminantes en las aguas servidas, que junto al caudal permitirán determinar la carga orgánica producto de dicha agua residual; la variabilidad de las condiciones de la fuente con respecto al tiempo; y otros constituyentes o parámetros que caractericen el origen de las aguas residuales.

El lugar debe ser evaluado, ello implica determinar: las condiciones del sitio, incluyendo las propiedades del suelo, la pendiente y la topografía del terreno, la presencia y ubicación de aguas subterráneas y aguas superficiales, los aspectos relativos al uso del suelo, disponibilidad de servicios públicos, accesibilidad, normatividad sobre reutilización, así como regulaciones y otros aspectos que puedan limitar la capacidad del lugar para recibir y procesar aguas residuales. Ello indicará qué tipo de SDMAR podría ser el más indicado para el local en particular

El Modelo de Desarrollo de SDMAR está representado a continuación en la Figura 1.7.

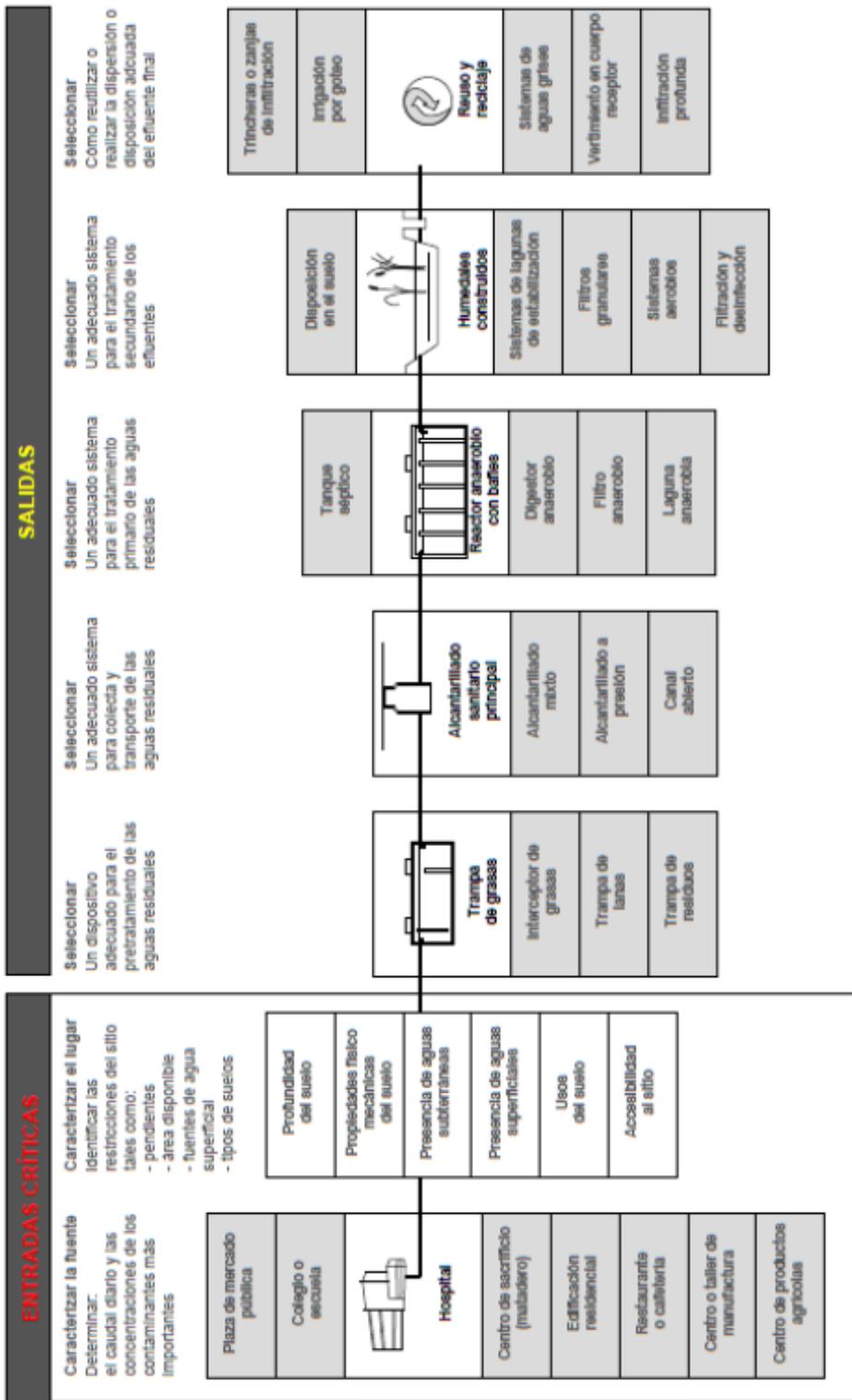


Figura 1.7. Modelo de Desarrollo de SDMAR.

El modelo requiere que personal idóneo caracterice primero la fuente de aguas residuales y luego evalúe el sitio para tomar decisiones respaldadas con argumentos técnicos sobre las tecnologías adecuadas. Afortunadamente, la caracterización de la fuente y las evaluaciones del sitio se encuentran dentro de las capacidades y atribuciones de los proveedores de servicios locales y a menudo se pueden lograr con un costo mínimo y en un breve período de tiempo. La información recopilada permitirá determinar, por ejemplo, la necesidad de unidades de pretratamiento, las configuraciones de alcantarillado más adecuadas y cuáles tecnologías de tratamiento y dispersión o reutilización podrían combinarse para lograr los resultados finales deseados.

1.5 CÓMO USAR LA VERSIÓN IMPRESA DE ESTE LIBRO

Este libro incluye en el texto, guías “paso a paso”, listas de chequeo, estudios de caso, aplicaciones prácticas y referencias para ampliación y verificación de informaciones presentadas en el libro.

En la versión electrónica de este libro, los usuarios encontrarán enlaces para informaciones que están disponibles en el sitio web WaterWiki. Todos los formularios y listas de control que se encuentran en el manual se pueden descargar e imprimir. La versión electrónica ofrecerá enlaces para obtener más detalles sobre los estudios de caso y otras referencias y se podrá explorar y descargar herramientas interactivas. Para ayudar al lector a navegar por esta información, los siguientes iconos dirigirán a los lectores a recursos y puntos clave externos; en la versión electrónica de este manual, haga clic en el ícono para enlazar directamente con la información. Los íconos que se usan en este libro son los siguientes:



Listas de Chequeo: Ayudan al usuario a llevar control de su avance en pasos importantes del proceso.



Estudios de caso: Son una forma importante de compartir información sobre cómo otras personas u organizaciones han abordado asuntos similares.



Recursos en Internet: Son recursos que se relacionan con los procedimientos, tecnologías e información general sobre los temas discutidos dentro del texto. Este ícono implica que los documentos fuente son proporcionados en el sitio web de WaterWiki o en hipervínculos.



Mejores prácticas: Son las lecciones aprendidas por otros profesionales en el manejo de aguas residuales para superar los retos impuestos por ciertos sistemas. El icono indica que los documentos fuente se encuentran en el sitio web de WaterWiki o en hipervínculos.

Los estudios de caso se presentan en cajas de texto de color café claro.

Las mejores prácticas se presentan en cajas de texto de color azul.

1.6 DEFINICIONES Y TÉRMINOS BÁSICOS

Los siguientes términos, definidos en parte por el *Consortium of Institutes for Decentralized Wastewater Treatment*- (CIDWT, 2009) en su glosario disponible en <http://www.onsiteconsortium.org/glossary.html>, se usarán en este texto:

Aguas residuales domésticas (efluentes domésticos, aguas servidas domésticas): aguas residuales con concentraciones típicas de origen residencial, o efluente de un tanque séptico, reactor anaerobio u otro dispositivo primario con DBO5 menor o igual a 170 mg/L; sólidos suspendidos totales (SST) menores o iguales a 60 mg/L; y concentración de grasas y aceites menor o iguales a 25 mg/L. Pueden incluir aguas residuales de locales comerciales o de servicios de alimentos –como restaurantes y cafeterías-, pero no desechos industriales.

Aguas servidas: residuos no tratados que consisten en aguas negras y aguas grises procedentes de inodoros, baños, lavaplatos, lavabos, lavanderías y otras instalaciones de fontanería en lugares de habitación o alojamiento, empleo o recreación humana.

Alcantarillado: también conocido como sistemas de recolección de alcantarillado sanitario, conformado por sistemas de tuberías, estaciones de bombeo y otras estructuras que reciben y transportan aguas residuales, bien sea por gravedad o por presión.

Alcantarillado mixto: alcantarillado destinado a recibir y transportar tanto aguas residuales como aguas lluvias.

Bacterias coliformes: grupo de bacterias que constituyen la mayoría de la flora intestinal de los animales de sangre caliente (incluyendo los géneros *Klebsiellasp*, *Enterobactersp*, *Citrobactersp*, o *Escherichiasp*) y que se usan como organismos indicadores de la contaminación del agua.

Bafle o deflector: en un tanque séptico, un deflector o bafle es una tubería, un tubo en “tee” o un segmento de pared en la tubería de entrada de un tanque, o cercano a la misma que se encarga de reducir la velocidad del flujo y dirigir el afluente por debajo de la superficie de las aguas residuales, aislar la espuma, aceites o grasas de la tubería de entrada y permitir la ventilación. Un deflector de salida es un tubo en “tee” o segmento de pared en o cerca de la tubería de salida de un tanque que se encarga de recolectar el flujo de la zona libre de espuma y material flotante, propiciar la salida del líquido tratado y permitir la ventilación.

Biosólidos: material orgánico al que se le ha extraído el agua, principalmente rico en nutrientes, generado como subproducto de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales y que puede ser reciclado (como por ejemplo en mejoramiento del suelo).

Caudal de diseño: es el volumen por unidad de tiempo de aguas residuales considerando los caudales promedio y pico diarios que el sistema de aguas residuales estará en condiciones de manejar.

Caudal de tiempo seco: corresponde al flujo de aguas residuales en un alcantarillado mixto durante época de clima seco. Dicho flujo consiste principalmente de aguas residuales sin incluir aguas lluvias.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): es la medida cuantitativa de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación bioquímica de la materia carbonácea en las aguas residuales; normalmente se mide después de un período de cinco días.

Demanda química de oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno requerida para la degradación de la materia orgánica en las aguas residuales que puede ser oxidada por un fuerte agente oxidante químico; normalmente medido a través de una prueba estándar usando ácido dicrómico como oxidante.

Desinfectantes de amonio cuaternario: son soluciones que contienen nitrógeno que se usan para matar microorganismos, comúnmente usados en hospitales, restaurantes y hogares; el uso excesivo de los mismos puede expresarse en un incremento significativo en la concentración de nutrientes en las aguas residuales.

Digestión anaerobia: degradación de los sólidos de las aguas residuales por medio de bacterias anaerobias, las cuales transforman la materia orgánica en sólidos inertes, agua, dióxido de carbono y metano. El metano puede servir como fuente de energía en la forma de biogás.

Efluente: líquido que fluye fuera de un componente o dispositivo.

Eliminación de lodos: es el proceso de limpiar o remover el lodo o residuos sépticos acumulados en una letrina, en un tanque séptico, reactor anaerobio o instalación de tratamiento de aguas residuales.

Espuma: es la capa de material flotante presente en una superficie líquida que puede incluir grasas y aceites (FOG, por sus siglas en inglés: fat, oil and grease) y otros residuos sólidos que flotan.

Excretas: residuos humanos compuestos por orina y heces.

Factor de Conversión de Aguas Residuales: Corresponde al porcentaje de agua potable que ingresa a una edificación y que se convierte en aguas residuales, considerando el volumen de agua que se utiliza para actividades al aire libre, tales como paisajismo o irrigación de jardines u otras actividades.

Facultativo: organismo que tiene la habilidad de vivir con o sin oxígeno libre.

Helminetos: organismos parásitos en forma de gusanos que se alimentan a partir de huéspedes vivos y producen huevos que persisten en el efluente de aguas residuales y lodos de residuos sépticos a menos que sean tratados de manera adecuada.

Impermeable: permite poco o ningún paso de fluido a través de sus poros.
Laguna de estabilización: excavación artificial forrada con suelos de muy baja permeabilidad o con un material sintético –principalmente geomembranas- rodeado de bermas. Las aguas residuales son tratadas con bacterias naturales que descomponen los residuos por medio de procesos físicos, químicos y biológicos. Los principales tipos de lagunas para tratamiento de aguas residuales son: laguna aerobia – poco profunda, que permite que el oxígeno disuelto penetre a través de la columna de líquido; laguna aireada - usa dispositivos mecánicos para transferir oxígeno disuelto al agua; laguna facultativa - posee zonas ricas en oxígeno, zonas deficientes en oxígeno, y lagunas anaerobias - donde hay ausencia de oxígeno disuelto en toda la columna de agua.

Lodo: material sólido precipitado con un contenido altamente mineralizado, generado por procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Metano (CH₄): un gas incoloro, inodoro e inflamable presente en el gas natural y formado por la descomposición anaerobia de materia orgánica. En el tratamiento de aguas residuales, el metano puede ser generado por el proceso de digestión anaerobia como un subproducto que se puede usar para cocinar, para calentamiento o para su conversión en electricidad.

Muestra al azar: muestra individual recolectada en un momento y un lugar en particular.

Muestra compuesta: consiste en muestras individuales combinadas recolectadas en el mismo punto en diferentes momentos; las muestras pueden ser de igual volumen o pueden ser proporcionales al caudal en el momento del muestreo.

Operación y Mantenimiento: las reparaciones y servicios de rutina y emergencia requeridos para mantener los sistemas de aguas residuales funcionando adecuadamente, que deben realizarse por personal autorizado o calificado.

Pretratamiento: cualquier componente o combinación de componentes que proporciona tratamiento a las aguas residuales antes de transportarlas hacia una fase de tratamiento adicional o hacia componentes de dispersión o reutilización del efluente. Con frecuencia, dicho dispositivo está diseñado para cumplir con los estándares de tratamiento primario, secundario, terciario y/o de desinfección, y puede incluir por ejemplo las trampas de grasa para uso en restaurantes, trampas de pelusa para usar en el lavado de ropa y trampas de residuos para usar en plazas de mercados públicos o donde predominan los sistemas de alcantarillado al aire libre.

Proveedor de servicios: corresponde a una entidad pública o privada dedicada a evaluaciones de sitio, diseño, construcción, inspección, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Incluye a aquellos que recolectan, transportan y dan tratamiento a residuos sépticos y lodos fecales.

Reactor anaerobio con baffles o deflectores: tanque séptico mejorado que usa compartimientos múltiples por los que las aguas residuales fluyen hacia arriba por el manto de lodos para atrapar sólidos, donde se retienen y reducen por digestión anaerobia.

Relación de carbono a nitrógeno C:N: es la relación entre la masa de carbono y la masa de nitrógeno en una sustancia. Lograr el balance adecuado mezclando varias combinaciones de desechos de plantas y animales permite alcanzar relaciones de C:N “ideales” que maximizan la descomposición microbiana en pilas de compostaje y la producción de metano en los digestores anaerobios.

Residuos Sépticos: residuos líquidos y sólidos (lodos) que se acumulan y que en última instancia deben ser removidos de los dispositivos de pretratamiento, tanques sépticos, fosas de infiltración, inodoros portátiles, letrinas o componentes similares.

Tratamiento primario: procesos de tratamiento físico que involucran la remoción de partículas, normalmente por medio de sedimentación y flotación con o sin el uso de coagulantes (por ejemplo, por medio del uso de un tanque séptico o un reactor anaerobio con deflectores).



Tratamiento secundario: procesos de tratamiento biológico y químico diseñados para remover materia orgánica.

Unidad de Tratamiento Aerobio (UTA): 1. Componente del tratamiento que utiliza oxígeno para degradar o descomponer aguas residuales con o sin medios mecánicos; 2. Término tradicionalmente utilizado para describir dispositivos que usan la introducción directa de aire a las aguas residuales por medios mecánicos para mantener las condiciones aerobias dentro del componente del tratamiento.

1.7 GUIA DE ESTUDIOS DE CASO

Para ilustrar y vincular los conceptos claves de SDMAR y los procedimientos para la toma de decisiones desde una perspectiva práctica, a continuación, se presenta una instalación real que se describe como modelo en el texto. En el desarrollo de los capítulos se comentará el procedimiento paso a paso” que fue utilizado por los propietarios de un centro médico, para seleccionar las tecnologías más adecuadas para el manejo de las aguas residuales según su contexto particular.



Centro Médico LORMA, ciudad de San Fernando, Filipinas

El Centro Médico LORMA está situado en la isla de Luzon en Filipinas del Norte, en la ciudad de San Fernando, perteneciente a la provincia de La Unión. Fue fundado por los Doctores Rufino N. Macagba y su esposa, en la Figura 1.8 se presenta una fotografía frontal del Centro Médico y algunos de los colaboradores; en la Figura 1.9 se presenta una imagen satelital del LORMA. Es una instalación de 136 camas con 450 trabajadores; los datos para el estudio de caso fueron reunidos a través de la observación personal del autor principal y entrevistas con el Dr. Macagba en 2009, 2010 y 2012.



Figura 1.8. . Mapa del Centro Médico LORMA
Fuente: (Google Earth, 2019).

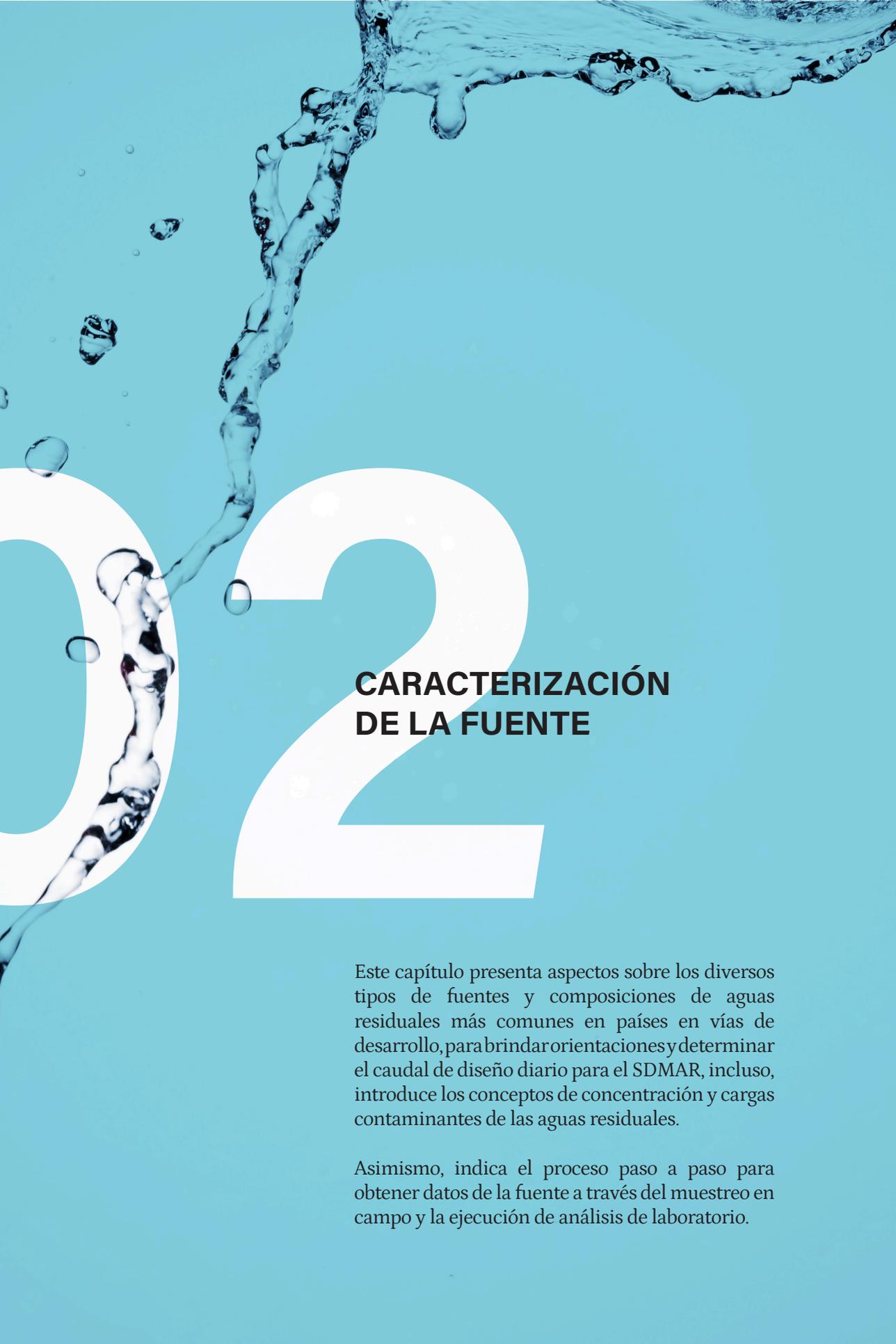


Figura 1.9. Centro Médico LORMA
Fuente: (Macagba, 2012)

El Centro Médico LORMA es un buen caso de estudio por las siguientes razones:

- Es típico de diversos puntos de fuentes de aguas residuales en países en vías de desarrollo;
- Al no existir planes para la implementación de un sistema centralizado para tratamiento de aguas residuales que atienda dicho sector de la ciudad, se hizo necesario recurrir a un enfoque de manejo de aguas residuales descentralizado (en el sitio);
- LORMA puede ser considerado como un sitio difícil, con un caudal relativamente grande de aguas residuales, un río en las proximidades que está sujeto a inundaciones (Carlatan Creek) y poco terreno disponible para un SDMAR; y
- Tiene actividades de servicio de alimentación y lavandería, junto con la generación de desechos médicos y peligrosos.

En este libro, el estudio de caso de LORMA será usado para ilustrar cómo influyeron tanto las características de las aguas residuales generadas por las actividades del hospital como el sitio para manejo de las aguas residuales en la elección de las tecnologías. De igual manera, se presentarán las razones para seleccionar las tecnologías escogidas.

A dynamic splash of water against a light blue background, with water droplets and bubbles scattered throughout. The splash originates from the top right and moves towards the bottom left, partially overlapping the large number '2'.

2

CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE

Este capítulo presenta aspectos sobre los diversos tipos de fuentes y composiciones de aguas residuales más comunes en países en vías de desarrollo, para brindar orientaciones y determinar el caudal de diseño diario para el SDMAR, incluso, introduce los conceptos de concentración y cargas contaminantes de las aguas residuales.

Asimismo, indica el proceso paso a paso para obtener datos de la fuente a través del muestreo en campo y la ejecución de análisis de laboratorio.

Fuentes típicas de aguas residuales



Centros comerciales



Plazas de mercado



Carnicerías



Cafeterías, restaurantes



Viviendas unifamiliares



Instituciones

Figura 2.1. . Algunas importantes fuentes de aguas residuales de origen residencial, institucional y comercial en diferentes tipos de comunidades.

PREÁMBULO

La Figura 2.1 presenta imágenes de la vida cotidiana en América del Sur, pero son aplicables también a la dinámica social de cualquier parte del mundo. Plazas de mercado, condominios y bloques residenciales, carnicerías, restaurantes, industrias procesadoras de alimentos, instalaciones institucionales como hospitales, colegios, batallones se encuentran en casi todas las comunidades urbanas o rurales. En el capítulo se discutirá que si bien estas son instalaciones comunes que forman parte integral de la vida diaria, cada una genera diferentes tipos y cantidades de aguas residuales. Por ejemplo, las aguas residuales de una carnicería y las de una vivienda son extremadamente diferentes, al punto que es difícil hacer comparaciones entre ellas. Pero es interesante que, aunque se encuentren fuentes de aguas residuales muy diferentes en una misma comunidad, no hay mucha diferencia entre las fuentes comunes, como plazas de mercado o bloques residenciales, situados en áreas geográficas diferentes. Es probable que un restaurante en Katmandú produzca aguas residuales similares a las de un restaurante similar en San Salvador o en San Juan de Pasto. Este hecho puede ser muy valioso para proveedores de servicios relacionados con el diseño o instalación de sistemas de aguas residuales y para propietarios que quieren mejorar el saneamiento de sus instalaciones. Los estudios de caso de manejo de aguas residuales muestran la forma cómo algunas personas abordaron los problemas que pueden ser similares a sus necesidades específicas. A través de Internet se puede acceder a una gran cantidad de información técnica y científica estructurada, así como lecciones aprendidas disponibles de un número cada vez más grande de estudios de caso.

Entre las diversas páginas y enlaces de internet donde el lector podrá encontrar recursos tales como libros técnicos, revistas científicas, estudios de caso y lecciones aprendidas que son compartidos de manera gratuita se encuentran los siguientes:

- <https://www.iwapublishing.com/news/knowledge-unlatched-19-ebooks-selected-openaccess>—Presenta un listado de libros de libre acceso facilitados por la Asociación Internacional del Agua –International Water Association- (La compañía editora de la primera versión de este texto, cuyo énfasis se concentró en las condiciones de países asiáticos);
- <https://directory.doabooks.org/discover?query=wastewater+treatment&locale-attribute=en>— En la página se presenta un listado de libros de libre acceso relacionados con el tratamiento de aguas residuales;
- https://iwaponline.com/open_access/pages/options#—La página presenta la relación de revistas técnicas y científicas de libre acceso facilitados por la International Water Association; cabe mencionar que la revista Ingeniería del Agua se encuentra disponible en idioma Español;
- <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/issue/archive>—La Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación,

desarrollo y práctica es una publicación electrónica cuatrimestral coeditada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), en ella se encuentra disponible una enorme cantidad de artículos científicos sobre tratamiento de aguas residuales, principalmente en Español y Portugués;

- <https://www.scielo.br/j/esa/grid/>— La Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental es una publicación electrónica bimestral editada por la Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES- de Brasil, en la que se encuentra disponible una gran cantidad de artículos científicos relativos a tecnologías para tratamiento de aguas residuales, principalmente en Portugués e Inglés;
- <https://abes-dn.org.br/cadernos-tecnicos-revista-esa-ict/>— La serie de libros Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental es una serie de publicaciones electrónicas editadas por la Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES- de Brasil, en la que se presentan algunas experiencias específicas relativas a tecnologías para tratamiento de aguas residuales y lodos sanitarios, disponible en portugués;
- <https://iris.paho.org/handle/10665.2/49654?locale-attribute=pt>— En la página del CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), que perteneció a la Organización Panamericana de la Salud se puede acceder a documentos técnicos sobre saneamiento, entre los que se encuentran tecnologías para tratamiento de aguas residuales y su reúso, disponibles en español;
- <http://www.susana.org/>— The Sustainable Sanitation Alliance (La Alianza de Saneamiento Sostenible), con el importante financiamiento de la Fundación Bill & Melinda Gates y el apoyo de cientos de socios. Los lectores pueden visitar su foro, donde pueden formular preguntas a un experto: <http://forum.susana.org/forum/>;
- <http://www.indiawaterportal.org/>— The India Water Portal (El Portal del Agua de India), por Arghyam (www.arghyam.org), una institución donante de dicho país. Se encuentran disponibles muchos estudios de caso y recursos, los cuales se pueden aplicar mucho más allá de las fronteras de la India.
- <http://www.solutionsforwater.org/>— Soluciones para el Agua es un producto del VI Foro Mundial del Agua. Se recomienda a los lectores tomarse un tiempo para visitar este sitio, fácil de explorar y de usar;
- www.sswm.info/— Sustainable Sanitation and Water Management (Manejo Sostenible del Saneamiento y el Agua). Es una excelente página con muchos estudios de caso y herramientas directamente relacionadas con los temas de este manual, se recomienda consultar sus recursos para información y aplicación práctica.

2.1 INTRODUCCIÓN

El primer grupo de insumos para la toma de decisiones encaminadas al diseño e implementación de SDMAR procede de la *caracterización de la fuente de las aguas residuales*. El entendimiento de las características físicas, químicas y biológicas de los efluentes y de cómo estas pueden cambiar en el tiempo sirve como guía en el proceso de diseño del SDMAR.

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de este cambio en un día entre semana en una vivienda de los EE. UU. donde se ilustra las fuentes más comunes de consumo doméstico y su variabilidad durante el día; entre las formas de demanda se encuentran: el uso externo, por ejemplo, para irrigación; el uso de grifos, como por ejemplo para lavado de manos, lavado de alimentos, su preparación y lavado de losa e implementos de cocina; usos para aseo personal en ducha; lavado de ropa; uso de unidades sanitarias. Por su parte, la Figura 2.3 ilustra un ejemplo de la variación del consumo en un hogar en el centro poblado de Salcedo, provincia de Puno – Perú, resultado del análisis de consumo diario y horario de 39 viviendas; el máximo consumo horario promedio registrado fue de 10,61 L/hab/h, y el consumo promedio horario anual de la población en estudio fue de 2,79 L/hab/d. Las aguas residuales se producen en una variedad de tasas de flujo –o caudales- (representadas por la altura de cada área etiquetada) y concentraciones, que oscilan entre débil y fuerte. Las composiciones de diversos parámetros de calidad del agua también pueden variar durante el mismo día. Estas y otras importantes características de la fuente se pueden agrupar como se presenta a continuación:

- **aspectos físicos:** caudal (tasa de flujo volumétrico), color, temperatura y pH; contaminantes biológicos: materia orgánica procedente de desechos humanos o animales, materia relacionada con alimentos y microorganismos, algunos de los cuales son patógenos; y
- **componentes químicos:** la mayoría se originan de jabones, desinfectantes, limpiadores y otros productos similares, así como varios desechos animales y residuos ricos en nitrógeno y fósforo.

Los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales varían ampliamente de una fuente a otra y a lo largo del tiempo. Este capítulo se centra en presentar insumos para entender la naturaleza específica de estas variables en cualquier fuente de aguas servidas. La caracterización de la fuente de aguas residuales se puede organizar en tareas separadas y comienza con determinar la composición de los efluentes.

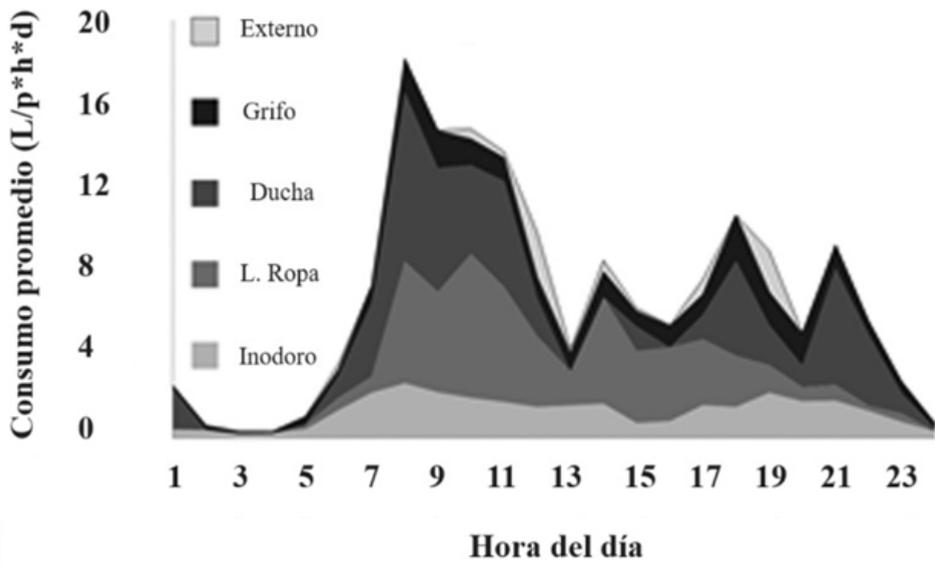


Figura 2.2. . Patrón de caudales por hora para una muestra de residencias unifamiliares de EE. UU. en un período de un día típico (Fuente: Adaptada de Beal & Stewart, 2014, p. 5).

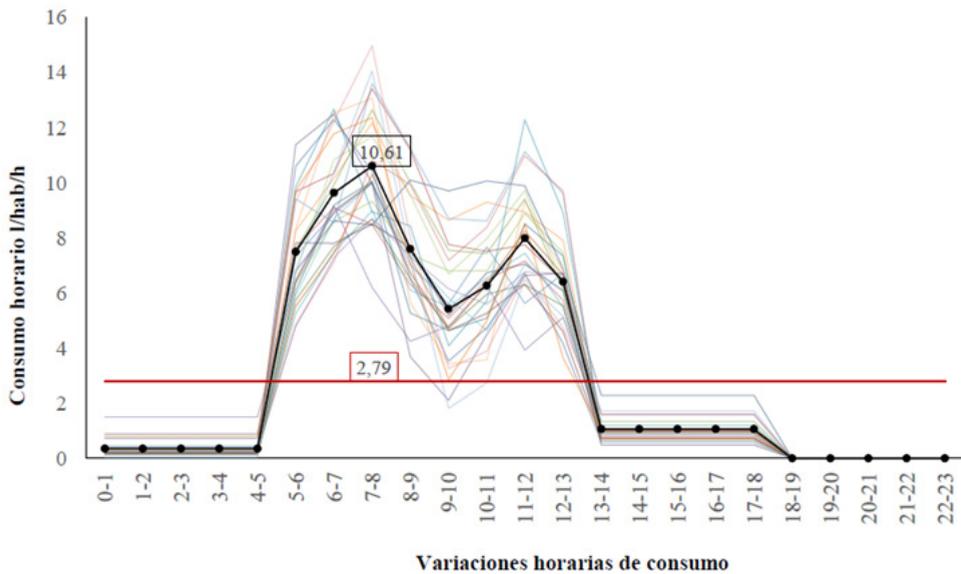


Figura 2.3. . Variaciones horarias de consumo de agua potable en el centro poblado de Salcedo, Puno - Perú (Fuente: Tomado de Huaquisto y Chambilla, 2019, p. 141).

2.2 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales provenientes de cualquier fuente podrán contener contaminantes que se encuentren dentro de las siguientes categorías:

- Orina y heces de humanos y animales.
- Residuos provenientes de procesos tales como la producción y preparación de alimentos y el lavado de utensilios, los cuales pueden contener grasas y aceites.
- Compuestos químicos orgánicos o contaminantes provenientes de operaciones comerciales tales como el lavado en seco.
- Compuestos químicos inorgánicos o contaminantes como pelusas provenientes de las operaciones de lavanderías y compuestos de enchapes metálicos, curtiembre de cuero o impresión, y
- Agua, que puede representar la mayor parte del flujo total. Un efluente con 1000 mg/L de contaminantes (considerado como un agua residual con alta concentración) está compuesto en un 99,9 % por agua.

2.2.1 Aguas negras y aguas grises

Se puede considerar que las aguas residuales, especialmente las de origen doméstico residencial, pueden estar compuestas ya sea por aguas negras, por aguas grises, o por una mezcla de las dos. Dado el reciente enfoque en un manejo más eficiente de los residuos humanos, orientado hacia la reutilización y reciclaje, los programas que separan el agua de inodoros (aguas negras) del agua de lavamanos, duchas y lavado de ropa (aguas grises), tal como se muestra en la Figura 2.4, se volverán más populares. Si bien es cierto que las aguas grises pueden contener menos materia orgánica y menores concentraciones de patógenos que las aguas negras separadas o las aguas servidas combinadas, estas aún deben ser manejadas de manera adecuada para evitar la transmisión de enfermedades o la contaminación de las fuentes de agua. En este texto, las aguas grises se consideran como aguas residuales; por lo tanto, el desarrollo de programas de manejo de aguas grises requiere la misma atención en identificar las características específicas de la fuente que las genera, así como el sitio donde serán tratadas, vertidas o reutilizadas.

En diversos países en vías de desarrollo, principalmente en Asia y África, la práctica constructiva más común es la de separar las aguas grises de las aguas negras en la fuente, por medio de una red de tuberías independiente. En América Latina tanto a nivel urbano como rural se utilizan los sistemas de alcantarillado separados, donde una red de canales o tuberías transportan las aguas lluvias para su disposición final en un cuerpo de agua receptor mientras que la otra red de tuberías recibe la combinación de todas las aguas residuales domésticas (tanto aguas negras como aguas grises) para su transporte a través de un sistema de tubería sanitaria hacia el lugar de tratamiento o de disposición

final. Inclusive en comunidades retiradas del perímetro urbano o en pequeños asentamientos poblacionales, donde se dispone de sistemas de tratamiento descentralizados se suele recurrir a la combinación de las aguas grises y aguas negras para su tratamiento unificado.

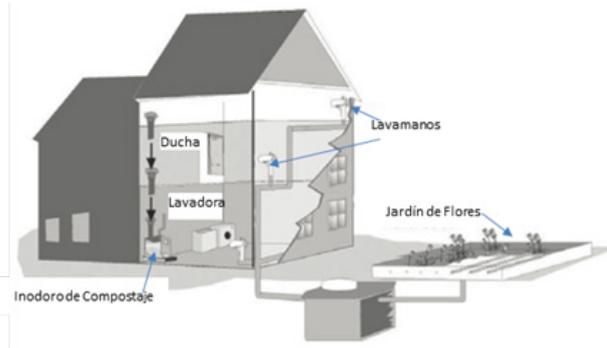


Figura 2.4. . Fuentes y tratamiento de aguas grises (Fuente: Adaptada de US EPA, 2002a, p. 3-19).

En el caso de la experiencia de países asiáticos y africanos después de la captación por separado de los efluentes, las aguas negras son enviadas a reactores anaerobios, tales como los tanques sépticos, para someterlas a tratamiento primario y las aguas grises son vertidas a canales abiertos de drenaje para su descarga directa sin recibir ningún tipo de tratamiento (Figura 2.5). Tales prácticas tienen dos impactos:

Las aguas negras se concentran en tanques sépticos u otras unidades de tratamiento y las aguas grises son eliminadas y no quedan disponibles para su eventual reutilización. Cuando se acumulan en la superficie del suelo o en una zanja, rápidamente pueden volverse sépticas, generando olores desagradables y posiblemente exponiendo a los humanos a agentes patógenos.



Figura 2.5. . Aguas grises separadas en la fuente y descargadas en una zanja de drenaje al aire libre, Palembang, Indonesia.

Cuando las aguas grises son tratadas de manera adecuada, se pueden usar en diversas actividades beneficiosas tales como irrigación de jardines y lavado (descarga) de inodoros. Sin embargo, el caudal, la concentración y la capacidad para obtener reúsos benéficos a partir de las aguas grises difieren considerablemente según la fuente. Por ejemplo, las aguas grises del lavado de ropa u otros flujos que están muy contaminados por jabones y desinfectantes pueden ser particularmente difíciles de tratar. Esto se describe en la discusión de las diferentes fuentes de aguas residuales en la siguiente sección.

2.3 CATEGORÍAS DE FUENTES DE AGUAS RESIDUALES

Existe una amplia gama de fuentes de aguas residuales típicas de las comunidades en los países en vías de desarrollo, las cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Edificaciones residenciales tales como viviendas unifamiliares, unidades multifamiliares y condominios.
- Mercados públicos.
- Centros de sacrificio (también denominados mataderos), carnicerías y otras operaciones de procesamiento de alimentos.
- Hospitales e instalaciones para atención de servicios de salud.
- Restaurantes, hoteles y centros turísticos.
- Oficinas, cárceles y edificios institucionales de uso diario, así como aquellos de uso menos regular tales como iglesias.
- Centros educativos escolares, incluyendo aquellos que disponen de servicios de alimentación y dormitorios, tales como los internados, seminarios, escuelas militares.
- Operaciones comerciales tales como salones de belleza, talleres de reparación de vehículos, fabricantes de metales, curtiembres y pequeñas comunidades o centros comerciales con fuentes combinadas.

Cada categoría de las fuentes anteriormente mencionadas tiene sus propios patrones relativos a las actividades que generan aguas residuales. Las instituciones educativas escolares, por ejemplo, con sus flujos altamente variables, presentan retos muy diferentes de aguas residuales que generan instalaciones como centros de sacrificio y carnicerías, los cuales presentan flujos más regulares, pero con mayores concentraciones de materia orgánica. También pueden existir grandes variaciones al interior de cada categoría; considere las diferencias entre un hotel localizado cerca del centro de una ciudad y un centro turístico ubicado en una playa, con una gran variabilidad del flujo estacional. Debido a las diferencias en las aguas residuales procedentes de operaciones residenciales, comerciales o institucionales, cada instalación debe ser evaluada por sí misma dentro del proceso de planificación de SDMAR.



Esta evaluación implica tener en consideración el volumen, concentración, composición y variabilidad del caudal de las aguas residuales. Para las instalaciones existentes, esto puede ser directamente determinado si hay datos disponibles de medidores de agua o del consumo general del líquido. Cuando dicha información no está disponible se puede obtener a partir de dispositivos tales como medidores de flujo y mediante el muestreo y análisis para determinar la concentración específica de los diversos contaminantes. Para las nuevas construcciones, evaluar la naturaleza de las aguas residuales que serán generadas requiere de estimaciones y de comparaciones con instalaciones similares ya existentes.

Estas secciones presentan el proceso paso a paso para caracterizar la fuente de las aguas servidas. Sin embargo, se presentarán primero las principales categorías comunes de fuentes de aguas residuales para ayudar al lector a identificar las condiciones generales para que las tome en cuenta cuando caracterice su fuente y posteriormente use la información reunida para diseñar el SDMAR.

2.3.1 Edificaciones residenciales

El SDMAR se puede usar para viviendas unifamiliares, bloques de viviendas para personas de bajos ingresos, urbanizaciones residenciales y urbanizaciones de casas unifamiliares múltiples. Las aguas residuales de origen doméstico pueden contener muchos tipos de compuestos químicos inorgánicos y orgánicos que se introducen al efluente a través de las actividades diarias. Inclusive viviendas unifamiliares o urbanizaciones de viviendas pueden tener concentraciones muy diferentes de materia orgánica y sólidos suspendidos en sus aguas residuales.

Adicionalmente, las tasas de flujo de aguas residuales de las viviendas están fuertemente relacionadas con el nivel socioeconómico, el número de residentes por unidad, la ubicación geográfica y la disponibilidad y el costo del agua potable. Por ejemplo, las urbanizaciones con suministro ininterrumpido de agua potable (agua las 24 horas, los siete días de la semana) usualmente tendrán flujos mucho más altos que las comunidades que recogen el agua en baldes en pozos comunales o colectan agua de lluvia para uso doméstico.

2.3.2 Plazas de mercado

Las típicas plazas de mercado en los países en desarrollo presentan actividades generadoras de aguas residuales que ocurren en diferentes lugares del mercado (Figura 2.6), las cuales pueden incluir:

- Puestos para el procesamiento, corte y venta de carne.
- Áreas donde se lleva a cabo el descamado y limpieza de pescado.
- Secciones para el corte y lavado de hortalizas.
- Lugares donde se preparan y consumen alimentos y donde se lavan utensilios, y servicios sanitarios públicos.



Figura 2.6. . Sección de hortalizas en la plaza de mercado “Los Dos Puentes” mercado público de San Juan de Pasto, Nariño – Colombia.

Los mercados públicos generan aguas residuales con mayores volúmenes de materia orgánica que las viviendas residenciales. Los puestos de preparación de alimentos contribuyen de manera significativa a la concentración de las aguas residuales al generar grasas y aceites, sólidos y materia orgánica. Estos puestos también producen residuos que deberían ser removidos por trampas de grasa y unidades para separación física de residuos como rejillas o cestas metálicas. Los sistemas de aguas residuales para plazas de mercado deben ser lo suficientemente flexibles para manejar la variación del flujo; desde un caudal casi nulo, cuando el mercado está cerrado, hasta caudales pico en los días de mayor actividad. Los sistemas de alcantarillado para las plazas de mercado a menudo están al aire libre, permitiendo el ingreso de aguas lluvias, residuos sólidos y escombros, situación que hace que el tratamiento de los efluentes sea más difícil. En la página siguiente se presentará un estudio de caso de cómo un diseñador abordó estas condiciones para el mercado público de *Alabang* en Filipinas.

2.3.3 Hospitales e instalaciones de atención de la salud

Las instalaciones médicas, que pueden tener residuos del cuidado de pacientes, servicios de preparación y suministro de alimentos, lavandería y limpieza y desinfección de las instalaciones, presentan efluentes y requisitos de tratamiento complejos. Los residuos médicos de las salas de atención y cuidado de pacientes y de salas de operaciones, los desechos peligrosos de laboratorios y aún los desechos radioactivos deben ser separados y dispuestos en instalaciones específicas para manejo de residuos fuera del sitio, que a menudo requieren permisos de organismos del gobierno central, departamental o municipal. Las operaciones de los servicios de alimentos y lavandería requieren de dispositivos de pretratamiento adecuados, incluyendo respectivamente trampas de grasa y pelusa. Adicionalmente, el uso de desinfectantes de amonio cuaternario en grandes cantidades puede inhibir e inclusive impedir el crecimiento de microorganismos benéficos en los sistemas de tratamiento, haciendo de esta manera menos eficiente el tratamiento biológico de las aguas residuales.



Estudio de Caso: Tratamiento de aguas residuales de plazas de mercado en Filipinas

El tratamiento de aguas residuales para plazas de mercado en Filipinas es complejo debido a la relativamente alta concentración de los efluentes y a la variabilidad de los caudales. El Mercado Público de Alabang, situado en la ciudad de Muntinlupa, es una de las mayores plazas de mercado del área metropolitana de Manila, con 1.448 puestos y operación las 24 horas del día. Con apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional en las labores de planificación y diseño, la ciudad construyó una planta de tratamiento de aguas residuales en febrero de 2006. Para cumplir con los estándares locales de vertimiento de efluentes, en la planta de tratamiento se combina tratamiento primario anaerobio, tratamiento secundario y pulimento con filtración usando medios de soporte de fibra de coco; también incluye un sistema de reúso de agua que permite la reutilización del efluente tratado para descarga de inodoros, irrigación de plantas y limpieza de calles.

Consideraciones de diseño

Cuando se diseñó la planta, el mercado tenía aproximadamente 4.800 vendedores y trabajadores activos y 4.500 clientes diarios. La generación media de aguas residuales era de 210 m³ de aguas servidas al día con una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de alrededor de 600 miligramos por litro (mg/L). Los sólidos suspendidos, así como las grasas y aceites también presentaban elevadas concentraciones. El efluente era descargado en el Río Alabang, que desagua en el lago “Laguna”, con límites de vertimiento de 50 mg/L de DBO.

Retos Específicos del Sitio

El desarrollo de una estrategia efectiva de manejo de aguas residuales para la plaza de mercado de Alabang requirió superar varias restricciones propias del lugar entre las que estuvieron:

- espacio disponible para instalaciones de tratamiento limitado (160 m²), ya que el sitio era utilizado como estacionamiento y zona de entrega;
- alta elevación relativa del punto de descarga respecto al área destinada para el tratamiento (desnivel desfavorable); y
- terreno inestable sobre el cual se podría realizar la cimentación de las instalaciones (pues el lugar era un antiguo relleno).

Debido a las altamente limitantes condiciones del sitio, la aplicación más práctica consistió en un sistema mecanizado. Fue totalmente financiado por

medio de una pequeña tarifa que se agregó a la cuota anual de los propietarios de los puestos de la plaza de mercado, lo que ayudó a lograr la recuperación total del costo en el término de tres años. Las instalaciones utilizan un reactor anaerobio con deflectores para el tratamiento primario, un sistema aerobio para el tratamiento secundario, y como tratamiento adicional de las aguas residuales se recurrió a un sistema de filtración de fibra de coco para así cumplir los estándares de reúso, tal como se ilustra en la Figura 2.7.



Figura 2.7 . Filtro de fibra de coco y reactor anaerobio con deflectores + filtro de flujo ascendente durante la construcción.

2.3.4 Centro de sacrificio

Los centros de sacrificio –conocidos también como mataderos- generan aguas residuales altamente concentradas, con niveles de DBO que algunas veces alcanzan de 10 a 20 veces (o más) los niveles de DBO de las viviendas residenciales. Buena parte de ello se debe a la sangre, pelaje, grasas y aceites y otros desechos orgánicos que fluyen hacia el desagüe. Muchos mataderos tienen corrales para mantenimiento temporal del ganado que se lavan periódicamente, por eso se envía aguas residuales de alta concentración al sistema de alcantarillado. Adicionalmente, algunos mataderos usan a menudo altos volúmenes de desinfectantes, los cuales pueden inhibir el crecimiento de microorganismos benéficos para procesos de tratamiento biológico de efluentes.

Aunque los aspectos anteriormente comentados ponen en evidencia que los centros de sacrificio normalmente requieren SDMAR muy robustos, se pueden generar subproductos valiosos a partir de los residuos de este tipo de instalaciones para sacrificio de animales. Por ejemplo, la sangre recolectada se puede usar en alimentos concentrados para animales, el proceso de digestión anaerobia de residuos puede ser usado para generar biogás, y los biosólidos procesados mediante compostaje se pueden utilizar como mejoradores de suelos. Si se procesan de manera adecuada, el manejo productivo de los subproductos también se podrá ver reflejado en la disminución de la concentración de las aguas residuales tratadas.



Centros de sacrificio y autoridad reguladora:

En muchos países, las plantas de sacrificio (también llamadas mataderos) están reguladas por los entes nacionales que tienen sus propios requisitos para saneamiento y manejo de aguas residuales. Por ejemplo, en Kenia, las condiciones sanitarias en los mataderos son supervisadas por el Subsecretariado de Salud Animal y Asuntos Agrícolas, adscrito al Ministerio de Medio Ambiente y Agua. En Filipinas, debido a las políticas de descentralización, la responsabilidad de regular el saneamiento de mataderos recae en los gobiernos locales.

Para el caso de Colombia, las condiciones sanitarias de las plantas de sacrificio es controlada por el Ministerio de la Salud y Protección Social, para ello entre las normas aplicadas se encuentra el Decreto 1975 de 29 de octubre de 2019, por el cual se adoptan medidas en salud pública en relación con las plantas de beneficio animal, de desposte y de desprese y se dictan otras disposiciones; así mismo se encuentra la Resolución 240 de 31 de enero de 2013, por la cual se establecen los requisitos sanitarios para el funcionamiento de las plantas de beneficio animal de las especies bovina, bufalina y porcina, plantas de desposte y almacenamiento, comercialización, expendio, transporte, importación o exportación de carne y productos cárnicos comestibles

Por su parte, el tratamiento y disposición final de las aguas residuales en Colombia es oportunamente autorizado a través del permiso de vertimiento de efluentes otorgado por la autoridad departamental competente, representada por las Corporaciones Autónomas Regionales, que, por ejemplo, para el caso del departamento de Nariño la asume CORPONARIÑO. La legislación colombiana vigente relativa a vertimientos se encuentra en la Resolución 631 de 17 de marzo de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones; dicha resolución se encuentra disponible en el enlace: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>.

En Ecuador, el control de los mataderos lo realiza la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD) <https://www.gob.ec/agrocalidad>, adscrita al Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca.

En Perú, la regulación y control de las plantas de sacrificio es realizada por la Autoridad Nacional en Seguridad Agraria a través del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) <https://www.gob.pe/senasa>, adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

En Brasil, el ente que regula y controla el sacrificio de animales para consumo humano es la Secretaría de Defensa Agropecuaria <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/defesa-agropecuaria>, adscrita al Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

En Argentina, el control de las actividades de sacrificio de animales en mataderos lo realiza el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) <https://www.argentina.gob.ar/senasa>, organismo descentralizado adscrito a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos del Ministerio de Economía y Producción.

En general, entender la reglamentación definida por la legislación e identificar la autoridad reguladora es un importante primer paso para cumplir con los requisitos de saneamiento.

2.3.5 Hoteles, centros turísticos y restaurantes

Con una moderadamente alta variabilidad en las concentraciones y caudales de aguas residuales, la industria hotelera, de instalaciones turísticas y restaurantes presenta retos para los SDMAR. Los efluentes de los servicios alimenticios y de lavandería, típicos de estas instalaciones, requieren más unidades de pretratamiento que las aguas servidas de las viviendas residenciales. La variabilidad del flujo diario y estacional también puede ser mayor y podría depender del tipo de establecimiento de comida o alojamiento. La Tabla 2.1 muestra cómo el tipo de establecimiento de servicios alimentarios se relaciona con el intervalo de las comidas, el flujo y la variabilidad, basado en gran parte en la cantidad y método de lavado de platos.

Tabla 2.1. Clasificación de restaurantes, intervalos de comidas y niveles de servicio relacionados.

Tipo de establecimiento	Intervalo promedio para las comidas	Notas
Comidas rápidas	30–45 minutos	Los platos y cubiertos de único uso (desechables) reducen el lavado de platos y el flujo producido.
Restaurante	60 minutos	Normalmente, presenta la mayor cantidad de <u>grasa</u> por cliente. Lavado completo de platos y cubiertos. Típicamente representa la mayor cantidad de <u>aguas residuales</u> generadas por cliente
Genas por diversión	90–120 minutos	Servicio completo, probablemente con bar. Presenta picos en los flujos asociados a eventos semanales o menos frecuentes. Generalmente se encuentra el nivel más alto de <u>variabilidad del flujo</u> por cliente.

Los hoteles y centros turísticos presentan variabilidades de flujo diferentes a los restaurantes debido a las temporadas altas y bajas. Sus necesidades de manejo de grasa y de la pelusa proveniente de las lavanderías son muy específicas. En esta categoría existen razones adicionales para preocuparse por el manejo de los efluentes, puesto que en algunos lugares tales como los hoteles de playa y centros turísticos hay una tendencia a la descarga de aguas residuales con un mínimo de tratamiento directamente al mar. Dicha situación puede ser negativa para el establecimiento si los huéspedes perciben olores, observan la descarga de aguas residuales con un manejo deficiente o si creen que las aguas recreacionales están contaminadas. Por esta razón, los propietarios de los centros turísticos con frecuencia tienen convicción de los beneficios del manejo adecuado de las aguas residuales y a menudo son los primeros interesados en adoptar y apoyar los programas de SDMAR.

2.3.6 Edificios para oficinas y centros de culto

Las aguas residuales de los edificios de oficinas están relativamente menos concentradas y poseen flujos regulares y predecibles, en esta categoría los mayores caudales se presentan durante las horas laborales normales. Con frecuencia, los caudales de aguas residuales de las oficinas se calculan usando el número de trabajadores por turno y el número de turnos en un período de 24 horas. También podría incluirse en el cálculo la presencia o ausencia de: (1) servicio de alimentación (y si es servicio completo con lavado de utensilios); (2) duchas; y (3) salas de reuniones (con la llegada de visitantes).

Las iglesias, mezquitas y otros centros de adoración también son un buen ejemplo de instalaciones de uso regular que también presentan flujos diarios y semanales predecibles. Sus caudales contrastan con los de las instalaciones de trabajo tradicionales, por la naturaleza de los servicios de adoración típicos de la semana. Existen épocas de mayor afluencia de fieles, donde se generan caudales con los picos más severos, por ejemplo, en Semana Santa, en el caso de la religión católica.

2.3.7 Escuelas y colegios

Las escuelas poseen caudales altamente variables y presentan problemas desafiantes para el manejo de sus efluentes. Las aguas residuales descargadas durante un día escolar promedio pueden ser el flujo típico, pero el sistema también debe estar en capacidad de manejar caudales bajos durante los fines de semana y caudales pico durante eventos especiales. Los métodos de equalización del flujo, que usan tanques y bombas para moderar los caudales pico uniformizándolos con el tiempo, tal como se describen en la Sección 2.6.1, pueden ayudar a abordar este asunto. Además, los sistemas deben reiniciarse rápidamente tras condiciones prolongadas sin flujo, típicas de las vacaciones escolares. Aparte de las preocupaciones del caudal, las escuelas con predios grandes pueden considerar programas de reutilización donde el efluente tratado y rico en nutrientes puede usarse para irrigar jardines y zonas verdes.

2.3.8 Otras instalaciones comerciales

Muchas otras instalaciones comerciales, agrícolas e industriales generan diversos tipos de aguas residuales. Algunas de las fuentes comunes pueden incluir:

- Salones de belleza.
- Talleres de reparación automotriz y estaciones de combustible (gasolineras).
- Lavaderos de vehículos.

- Curtiembres y fabricación de artículos de cuero.
- Actividades de alimentación de animales en confinamiento, y
- Servicios odontológicos y de reparación de joyas, entre otras.

El diseño de SDMAR para estas instalaciones requiere una cuidadosa caracterización de la fuente para evaluar adecuadamente el volumen, las concentraciones, la variabilidad del caudal y en especial la eventual presencia de compuestos químicos con potencialmente alta toxicidad. Comparar estas instalaciones con operaciones similares, revisar literatura técnica y científica del área y consultar con grupos comerciales específicos de la industria puede ayudar a proveer información útil para estimar los datos de referencia relacionados con las aguas residuales que se pretende tratar.

2.3.9 Sistemas de aguas residuales comunitarias

Los sistemas de manejo de aguas residuales comunitarias reciben flujos de diversas fuentes que pueden incluir descargas residenciales y/o comerciales junto con aguas lluvias. Los flujos de aguas servidas pueden ser separados de las aguas lluvias por medio de alcantarillados sanitarios, o pueden ser combinados con las aguas lluvias por medio de alcantarillados mixtos, que es con frecuencia lo que ocurre en varios países en vías de desarrollo. Cuando se conectan alcantarillados mixtos a plantas de tratamiento, a menudo disponen de sistemas de desbordamiento de excesos de flujo, los cuales están diseñados para descargar dichos excesos a fuentes de agua superficiales durante tormentas significativas cuando los niveles del flujo exceden el caudal de diseño de la planta de tratamiento. En tales casos, las aguas residuales diluidas también deberán cumplir con los estándares de vertimiento establecidos por los entes reguladores oficiales.

Los proyectos de sistemas de alcantarillados comunitarios suelen usar múltiples pasos para tratar las aguas residuales, incluyen dispositivos de pretratamiento instalados en locales específicos (como rejillas, cestas metálicas, trampas de grasa), dispositivos de tratamiento primario como tanques sépticos o reactores anaerobios, o interceptores en viviendas individuales y edificios, y mecanismos secundarios (incluyendo reactores aerobios y filtros aireados) y de desinfección para intensificar el tratamiento de los efluentes.

Los sistemas de tratamiento comunitarios presentados aún se enmarcan en la definición de SDMAR, pues pueden resolver problemas asociados al manejo y tratamiento de aguas residuales usando sistemas diseñados e implementados localmente. El siguiente estudio de caso presenta un modelo importante de cómo una ciudad aborda los flujos de aguas residuales no regulados de las zonas residenciales existentes.



Tanque interceptor con estación de bombeo y SDMAR en la ciudad de San Fernando, Filipinas



Figura 2.8. . SDMAR comunal que usa un tanque de tratamiento EcoTank™ seguido por un filtro de grava, ciudad de San Fernando, Filipinas.

Un interceptor para colecta de aguas servidas sirve como SDMAR comunitario para unas 55 casas y pequeñas tiendas dentro en San Fernando. Las aguas lluvias y las aguas servidas combinadas que fluyen por la zanja de desagüe comunal son capturadas en un tanque de concreto y bombeadas a las instalaciones de tratamiento. Las aguas residuales poseen baja concentración con altas cargas hidráulicas y están controladas por un sistema de rebose para evacuación de excesos de flujo por aguas lluvias.

Este sistema interceptor usa un tanque de captación y almacenamiento temporal, así como una bomba para enviar las aguas residuales al tanque de tratamiento “EcoTank” (Figura 2.8). Durante condiciones normales, la totalidad del flujo combinado de aguas residuales y aguas lluvias es bombeado al EcoTank, que es una unidad similar a un tanque séptico, fabricada por Premier Products Co. de Tailandia (<https://www.premier-products.co.th>); por su parte, el efluente del EcoTank pasa a un filtro de grava para tratamiento secundario. En condiciones de tormenta, se desvía el tanque y las aguas residuales se descargan directamente en el río. La dilución de las aguas servidas cumple con todos los estándares reglamentarios para vertimientos durante los eventos de descarga directa. Este sistema es un buen modelo para capturar y tratar aguas residuales de áreas sin conexión a una red de alcantarillado principal; dicho tipo de sistemas interceptores del alcantarillado han sido reconocidos por los líderes de la ciudad de San Fernando y se pretende implementar este modelo en otras comunidades.

2.4 PASO 1: DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO

Determinar el caudal de diseño es clave para el proceso de planificación del SDMAR, ya que influye en el tamaño de todos los componentes de recolección, transporte, tratamiento, dispersión y reutilización o descarga del efluente. Los tres métodos para determinar el caudal de diseño, que se describirán por extenso en las siguientes secciones son:

1. Medir el flujo de una instalación existente usando datos reales de consumo de agua procedentes de medidores de agua u otros dispositivos de aforo tales como baldes o vertederos, y ajustarlo por medio de un factor de conversión de aguas residuales.
2. Comparar el flujo de una fuente propuesta, con datos conocidos a partir de una instalación similar ya existente, y
3. Usar tablas y valores estándar para generación de aguas residuales para los procesos que estarán presentes en la instalación.

2.4.1 Medición del flujo

La primera opción para determinar el caudal de diseño, que es la opción más fácil, corresponde a instalaciones existentes que están conectadas a sistemas de suministro de agua con medidores. Para los sistemas con medidores el flujo de diseño es el consumo de agua diario promedio durante condiciones de caudal pico en un período de siete días consecutivos. Si comúnmente se realizan actividades al aire libre que usen agua en tuberías tales como irrigación o lavado de vehículos, esta cifra se ajusta aplicando un factor de conversión de aguas residuales (que según la normatividad colombiana se denomina “Factor de Retorno”, cuyo valor suele oscilar entre 0,7 y 0,8) para así contabilizar el agua recibida pero no convertida en aguas residuales.

Se recomienda que el período pico de siete días consecutivos se obtenga de la medición de un mínimo de tres meses de datos durante la época de mayor consumo. Ya que los caudales de diseño deberían ser conservadores, calcular los caudales pico ayuda a asegurarse de que las aguas residuales se manejarán adecuadamente en los momentos de mayor uso. Los estimados de caudal pico pueden ser más precisos siguiendo la convención ingenieril de determinar cargas pico de una y cuatro horas. En general, el procedimiento básico para determinar el consumo de agua pico promedio de 7 días requiere leer al medidor y registrarlas en un formulario. Al incluir el concepto de capacidad (ocupación) y dividir el consumo de agua entre esa fracción, tal como se muestra en la Tabla 2.2. Se dan los datos de consumo de agua ajustados necesarios para derivar los promedios de siete días.

Tabla 2.2. Ejemplo del procedimiento para determinar el consumo de agua pico de siete días a partir de una fuente hipotética.

Día	Consumo de agua (m ³)	Porcentaje de la capacidad de la instalación al efectuar la medición	Consumo de agua ajustado al 100 % de la capacidad	Consumo promedio de siete días consecutivos (m ³)
1	3,5	75 %	4,7 (= 3,5/0,75)	
2	4	80 %	5,0	
3	4	80 %	5,0	
4	4,2	85 %	4,9	
5	5	90 %	5,6	
6	5	90 %	5,6	
7	6	95 %	6,3	5,3
8	5,5	92 %	6,0	5,49 ≈ 5,5



Guías para determinar los datos promedio del consumo de agua de 7 días:

Siempre tome las lecturas del medidor de agua a la misma hora, cada día.

Como una revisión para verificar que el promedio del pico de 7 días es apropiado para el período de pruebas, determine el caudal promedio para todo el período de mediciones (3 meses como mínimo). El caudal promedio no debería exceder el 70 por ciento del promedio pico de 7 días. Si se excede, ajuste el valor pico preliminar para cumplir con la condición del 70 por ciento tomándolo para que sea el producto del caudal promedio de 3 meses.

Para las instalaciones que no cuentan con un servicio de agua con medidor, la metodología para calcular el flujo de diseño es más difícil. Se requiere monitorear cuidadosamente las actividades de consumo de agua en la instalación, estimando el volumen de agua utilizado durante cada actividad, multiplicándolo por el número de veces que la actividad se realiza durante un día normal en el mes pico, y sumando esos valores para todas las actividades para obtener el volumen diario total. Por ejemplo, si se va a conectar las descargas de un inodoro al SDMAR, determinar el volumen de agua utilizado durante cada descarga y multiplicarlo por el número de descargas en un día (para todos los inodoros de las instalaciones), con ello se obtendrá el volumen diario generado por ese concepto. Si bien es cierto que este método es menos exacto que usar los datos de medidores de agua, es sencillo y no requiere el uso del Factor de Conversión de Aguas Residuales que se describe a continuación.

2.4.1.1 Factor de conversión de aguas residuales

El Factor de Conversión de Aguas Residuales (FCAR), o Factor de Retorno, evalúa cuánto del agua total que ingresa a una instalación se convierte realmente en aguas residuales que fluyen o deberían fluir hacia un SDMAR. Para instalaciones con suministro de agua mediante tubería a presión, se relaciona con el porcentaje de uso de agua para actividades en exteriores tales como irrigación de áreas verdes extensas, irrigación de jardines o lavado de vehículos. El planificador del sistema debería estimar el FCAR para disminuir el caudal de diseño y reflejar cuánto del flujo que se midió inicialmente no ingresa en el sistema de alcantarillado de la edificación. Esto permite el diseño y montaje de instalaciones más pequeñas, más adecuadas y económicas.

A continuación, se presenta el sencillo cálculo para encontrar el FCAR. Una vez obtenido el factor, debe ser multiplicado por el caudal pico promedio de 7 días para así obtener el caudal de diseño:

$$\text{FCAR} = \frac{(\text{Agua medida total} - \text{Agua consumida para exteriores})}{\text{Agua medida total}} * 100\%$$

En la mayoría de situaciones, es aconsejable calcular el FCAR en vez de usar valores estándar, porque los FCAR están basados en las condiciones climáticas y económicas específicas del lugar en estudio. Si el usuario no usa mucha agua conducida por tubería para regar el jardín o lavar el auto -dos ejemplos de uso en exteriores-, la mayoría del flujo medido será aguas residuales, lo que significa que el caudal de diseño es muy cercano o igual al caudal medido para consumo. Una situación similar podía aplicarse en condiciones de tiempo fresco y húmedo, ya que el uso de agua para riego en exteriores será minimizado.

Este efecto del clima se encontró en un estudio del uso de agua residencial de EE. UU. llevado a cabo en 12 ciudades y con más de 1.000 cuentas de usuario. Para las comunidades en climas más cálidos y secos, el consumo de agua en exteriores alcanzó entre el 59 % y el 67 % del consumo total, mientras que ese rango osciló entre el 22 % y el 38 % para hogares en climas más frescos y húmedos. En general, el porcentaje promedio del agua medida que fue destinada para uso en exteriores en la muestra del estudio fue del 58 % (Mayer et al., 1999). Esto muestra cómo el FCAR -que calculado para este caso sería 1 menos 0,58, que arroja un resultado de 0,42- puede ser muy bajo y disminuir grandemente los caudales de diseño en comparación con los caudales medidos, poniendo así mucho menos carga en un SDMAR.

El cálculo de FCAR es sencillo y se puede hacer rápidamente siguiendo el procedimiento mostrado en la Tabla 2.3, relacionada con el seguimiento al consumo de agua para exteriores. En ella se muestra cómo se pueden ingresar

y multiplicar los datos para obtener valores en términos de número de litros por actividad. Al promediar estos valores por la muestra del período pico de siete días usado en la Tabla 2.2 se obtiene el valor del “Agua Consumida para Exteriores” que es el valor desconocido en la ecuación del FCAR.

Tabla 2.3. Registro de actividades mensuales para dar seguimiento al consumo de agua en exteriores.

Fecha	Actividad	Duración	Caudal medido o estimado (L/min)	Consumo estimado (L por actividad)
2 de marzo	Lavado del auto	30 minutos	10	300
5 de marzo	Irrigación de jardines	45 minutos	10	450
8 de marzo	Irrigación del jardín	25 minutos	10	250

2.4.2 Recopilar y aplicar datos de proyectos similares

Cuando no se dispone de datos reales del consumo de agua se puede recurrir a una segunda opción, que consiste en estimar el caudal de diseño investigando instalaciones similares para verificar si su consumo de agua es medido y puede ofrecer buenas estimaciones. Hay que encontrar la comparación adecuada, para ello se recomienda determinar con exactitud el número de miembros de la familia servidos, la demanda de agua relativa, los cambios de caudal en el tiempo y otros aspectos relativos al uso del agua. Si el sistema de comparación se planificó, evaluó y monitoreó efectivamente, el estudiar el sistema por sus características del flujo consumido podría añadir más valor que analizar las lecturas del medidor de consumo de agua o usar valores de tablas estándar, procedimiento descrito a continuación.

2.4.3 Uso de tablas estándar de valores de generación de aguas residuales

El tercer método para determinar el caudal de diseño para el SDMAR consiste en usar tablas estándar que estiman la generación de aguas residuales por unidad analizada; la unidad de estudio puede referirse al número de dormitorios en una vivienda residencial, al número de empleados en un centro comercial o a la cantidad de ocupantes en un hotel. Aunque es cierto, los valores de generación de aguas residuales pueden variar de un lugar a otro o aún entre instalaciones similares en el mismo lugar, las tablas estándar pueden proporcionar una base sólida para ajustar los valores a las condiciones locales. Las Tablas 2.4 y 2.5 presentan valores típicos de consumo y posterior generación de aguas residuales para aplicaciones comunes de tipo comercial e institucional.

Dichos valores han sido utilizados en algunos países de América Latina y sirven como referencia inicial para usar con criterio diferenciado para condiciones locales específicas.

Tabla 2.4. Consumo de agua típico de algunos establecimientos comerciales.

Establecimiento	Unidad	Rango de caudal (L/unidad.día)
Aeropuerto	Pasajero	8 - 15
Alojamiento	Residente	80 - 150
Baño público	Usuario	10 - 25
Bar	Cliente	5 - 15
Sala de cine/teatro	Asiento	2 - 10
Despacho	Empleado	30 - 70
Hotel	Huésped	100 - 200
	Empleado	30 - 50
Industria (solo aguas residuales sanitarias)	Empleado	50 - 80
	Cliente	4 - 20
Cafetería	Máquina	2.000 - 4.000
Lavandería - comercial	Máquina	1.500 - 2.500
Lavandería - automática	Baño	1.000 - 2.000
Tienda	Empleado	30 - 50
	Baño	1.600 - 2.400
Tienda de departamento	Empleado	30 - 50
	m ² de área	5 - 12
	m ² de área	3 - 10
Mercado	Vehículo servido	25 - 50
Puesto de gasolina	Porción	15 - 30
Restaurante	Empleado	30 - 50
Centro comercial	m ² de área	4 - 10

Fuente: (Adaptada de von Sperling, 2012, p. 80).

Tabla 2.5. Consumo de agua típico de algunos establecimientos institucionales

Establecimiento	Unidad	Rango de caudal (L/unidad.día)
Clínica de reposo	Residente	200 - 450
Escuela	Empleado	20 - 60
- con cafetería, gimnasio, duchas	Estudiante	50 - 100
- con cafetería, sin gimnasio y duchas	Estudiante	40 - 80
- sin cafetería, gimnasio y duchas	Estudiante	20 - 60
	Cama	200 - 1000
	Empleado	20 - 60
Hospital	Recluso	200 - 500
Prisión	Empleado	20 - 60

Fuente: (Adaptada de von Sperling, 2012, p. 80).



Uso de valores estándar para determinar el volumen de aguas residuales:

- Cuando use tablas estándar sobre valores de generación de aguas residuales, tales como los presentados en las Tablas 2.4 y 2.5, note que el factor de conversión de aguas residuales ya está indicado al igual que los factores de consumo pico a corto plazo. Simplemente será necesario multiplicar el número de unidades analizadas por el caudal generado por unidad y sumar dichos valores para calcular el caudal de diseño.
- Los gobiernos locales o regionales pueden disponer de fuentes de datos sobre el consumo de agua o la generación de aguas residuales. Se recomienda discutir los datos del proyecto con funcionarios de las autoridades locales e indagar si tienen datos útiles que se puedan aplicar al proyecto.

2.5 PASO 2: EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS RESIDUALES

Las características de las aguas residuales se basan en la concentración de varios parámetros contaminantes presentes en los efluentes. Aunque es cierto que las fuentes de aguas residuales comerciales o industriales pueden contener altos niveles de contaminantes químicos o sólidos en suspensión, la principal preocupación es la concentración de materia orgánica. Pese a que existen varias definiciones de aguas residuales fuertes y débiles, las cuales son todas relativas a la fuente de los efluentes y el contexto reglamentario local, los valores que se muestran en la Tabla 2.6 ofrecen valores de referencia.

Tabla 2.6. Características típicas de las aguas residuales municipales de los EE.UU. con valores en mg/L.

Parámetro	Débil	Medio	Fuerte
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	110	220	400
Sólidos suspendidos totales (SST)	100	220	350
Nitrógeno total (N)	20	40	85
Fósforo total (P)	4	8	15

Fuente: (Adaptada de National Small Flows Clearinghouse, 1997, p. 7).

La tabla presenta valores tomados de estudios de aguas residuales municipales en los Estados Unidos y puede ser útil para comparar la concentración de las aguas residuales de un proyecto con dichos valores promedio y en función de ello sugerir la presencia de problemas o estrategias para un manejo mejorado. Por ejemplo, tener aguas residuales más débiles que el promedio puede indicar infiltración excesiva de agua del suelo hacia el sistema de alcantarillado, o el ingreso de un exceso de agua potable en las aguas residuales (tal vez debido a inodoros con fuga). Las aguas residuales excesivamente fuertes en comparación con los valores promedio pueden indicar la necesidad de implementar tecnologías de pretratamiento para así reducir la materia orgánica en la fuente. Los estándares para la concentración relativa de las aguas residuales también se pueden usar para identificar tecnologías apropiadas; por ejemplo, los tanques sépticos se suelen aplicar principalmente para aguas residuales con concentraciones bajas a medias, mientras que los reactores aerobios pueden ser una mejor elección para aguas residuales con concentraciones medias a altas. Ya que las opciones anteriormente comentadas son susceptibles de ser usadas tanto para soluciones de viviendas unifamiliares como para instalaciones institucionales o unidades multifamiliares es importante disponer de informaciones como las que presenta la Tabla 2.7 en función del número de personas que hacen uso de un servicio, el número de unidades de vivienda, el número de habitaciones, inclusive el número de unidades sanitarias de cada caso.

Tabla 2.7. Cargas típicas de DBO5 en varios tipos de instalaciones.

Tipo de Instalación	DBO (g/unidad/día)
Bloque de apartamentos	79,5/unidad de vivienda
Casa de huéspedes	63,6/persona
Iglesia, sin cocina	9,1/asiento
Club campestre	94,5/miembro
Domicilio unifamiliar	77,3/persona
Empleado, adicional	18,2/empleado
Fábrica, sin duchas	33,2/empleado
Fábrica, con duchas	37,7/empleado
Hospital	235,5/cama
Hotel	56,8/habitación
Edificio de oficinas, sin alimentos	22,7/empleado
Restaurante	9,5/cliente
Restaurante, con bar	14,1/cliente
Escuela, con cafetería	19,1/estudiante
Centro comercial, sin alimentos	22,7/empleado
Almacenes	378,2/servicios sanitarios
Teatro	4,5/asiento

Fuente: (Adaptado de On site Sewage Treatment Program Staff – University of Minnesota, 2011, p. 5-57 y 5-28)

También es importante estimar la carga orgánica porque se usa con frecuencia para dimensionar el sistema de tratamiento y limitar la efectividad de algunas tecnologías, que mejor usan aguas residuales con ciertos rangos de DBO. Por

ejemplo, para el dimensionamiento de lagunas de estabilización de aguas residuales se utilizan las tasas de carga orgánica volumétrica (g de DBO/m³*día) o superficial (kg de DBO/hectárea*día) como parámetros de diseño. Subestimar la carga orgánica puede resultar en el tamaño equivocado de la laguna de estabilización y en la falla total del sistema de tratamiento. Para evitar esto, es necesario estimar adecuadamente los niveles de carga orgánica. Al igual que con la evaluación del caudal de diseño, esto se puede hacer bien sea colectando muestras de aguas residuales para analizar la DBO a nivel de laboratorio, usando valores estándar o aplicando los datos obtenidos por los operadores de instalaciones similares.

Para instalaciones existentes, se pueden hacer los análisis de laboratorio para DBO₅ siguiendo las guías para muestreo y análisis que se presentan en secciones posteriores de este texto. Para coleccionar información útil para instalaciones nuevas, se puede recurrir a identificar una instalación similar y muestrear sus aguas residuales para determinar las concentraciones de DBO. Si ambos métodos no son posibles, se puede usar valores estándar relativos a unidades de instalación, como los de la Tabla 2.7, cuyos datos se pueden usar para estimar la concentración de la DBO como sigue:

$$DBO_5 (mg / L) = \frac{\text{Valor de Tabla 6} * \text{Número de unidades} * \frac{1000mg}{g}}{\text{Caudal} \left(\frac{L}{d} \right)}$$



Revisión con caso de estudio LORMA - estimación del caudal de diseño y de la carga orgánica

Ya que los datos del medidor de agua y de concentración de DBO₅ no estuvieron disponibles para determinar el caudal y las características del agua residual, se usaron los valores estándar de las Tablas 2.5 y 2.7 para estimar la carga orgánica en LORMA. Ya que LORMA es un hospital moderno, los valores de las tablas estándar se usaron sin ajuste; sin embargo, para determinar el caudal de diseño se adoptaron los valores del extremo inferior del rango. El caudal de diseño (en L/d) y la carga orgánica se calcularon como se indica a continuación:

19 L/empleador/d (Tabla 2.5) * 450 trabajadores	= 8.850 L/d;
470 L/cama/d (Tabla 2.5) * 136 camas	= 63.920 L/d;
Caudal de diseño diario total	= 72.770 L/d.
18,2 g DBO ₅ /empleador/d (Tabla 2.7) * 450 trabajadores*	= 113 mg DBO ₅ /L;
1000 mg/g / 72,770 L/d	
235,5 g DBO ₅ /cama/d (Tabla 2.7) * 136 camas * 1000	= 440 mg DBO ₅ /L;
mg/g / 72,770 L/d	
Concentración promedio de materia orgánica diaria total	= 553 mg DBO₅/L.

2.6 PASO 3: CUANTIFICACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL FLUJO

La variabilidad del flujo es una consideración importante en la selección de tecnologías de SDMAR y un factor crucial en el proceso de caracterización de la fuente. Los hoteles, centros turísticos y escuelas son buenos ejemplos de cómo los caudales de aguas residuales pueden cambiar drásticamente según el día de la semana, la temporada del año, durante eventos especiales o en días feriados. La variabilidad se puede identificar estudiando las lecturas de los medidores de agua, cuando están disponibles, o a través de los métodos para determinar el caudal de diseño a los que se hace referencia a continuación. Esta información ayudará a los diseñadores a escoger tecnologías o estrategias apropiadas que se puedan usar para homogenizar el caudal para reducir picos y facilitar diseños basados en condiciones de flujo promedio.

2.6.1 Ecuación del caudal

La ecuación del flujo se refiere al uso de tanques grandes y sistemas de bombeo para recolectar, almacenar y descargar de manera uniforme cantidades controladas del agua residual hacia los componentes del SDMAR a intervalos regulares. Dicha alternativa suele ser benéfica porque permite que los consultores basen los diseños del sistema en caudales promedio en vez de hacerlo mediante caudales pico, y las condiciones de flujo uniforme son más fáciles de tratar, lo cual resulta en un mejor desempeño del equipo de tratamiento.

La ecuación se usa normalmente para flujos que presentan gran variabilidad durante el día o la semana; los conceptos se pueden aplicar algunas veces a una mayor escala para caudales con variabilidad estacional. Por ejemplo, los tanques de almacenamiento pueden capturar todo el caudal de aguas residuales de la temporada pico y liberarlo de manera uniforme durante el resto de meses en los que se presentan caudales bajos, o inclusive cuando hay ausencia de flujo. Dependiendo de la meta del sistema, especialmente si el efluente tratado es para ser reutilizado para irrigación, este escenario puede ser deseable ya que el efluente se puede almacenar para uso durante la temporada de cultivo.

La ecuación del flujo se puede incorporar a una diversidad de diseños; pero primero se requiere estimar el grado de variabilidad del flujo según los datos del caudal obtenidos antes en la evaluación de la fuente. A continuación, se presenta un ejemplo de cómo están relacionados el caudal de diseño y la ecuación del flujo, mientras que las consideraciones tecnológicas para la ecuación del flujo se encuentran en el Capítulo 4.



Ejemplo de ecualización del flujo para una iglesia:

Al igual que los colegios y escuelas, las iglesias u otros sitios de adoración pueden tener patrones únicos de flujo de aguas residuales durante la semana. Se podrá notar la diferencia en los flujos de días de semana versus los fines de semana en el siguiente ejemplo. Todos los días de la semana, menos los tres que se mencionan presentan flujos cercanos a cero; con base en lo anterior, los flujos se pueden ecualizar como se presenta a continuación:

Día	Asistentes	Flujo diario
Domingo	200 miembros	4.000 L
Miércoles	50 miembros	1.000 L
Sábado	100 miembros	2.000 L

Total semanal = 7.000 L

Ciclo de ecualización = 1 semana (7 días)

Caudal diario ecualizado = $7.000 \text{ L} / 7 \text{ días} = 1.000 \text{ L/d}$

Asumiendo que este es el período típico de 7 días para la iglesia, el caudal de diseño es igual a 1.000 L/d, caudal muy inferior al caudal pico de 4.000 L/d. Al diseñar tanques sépticos y otros componentes del SDMAR para el caudal promedio, en este caso, de 1.000 litros diarios, comparado con el caudal pico de 4.000 L/d, se requerirá de un SDMAR mucho más pequeño y más barato; sin embargo, es necesario considerar el costo del tanque de almacenamiento y la bomba que suministrará el flujo de manera controlada.

2.7 NUTRIENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES

Los nutrientes son moléculas que las bacterias, plantas y animales necesitan para vivir y crecer. En aguas residuales, los nutrientes tales como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) pueden ayudar a sostener el crecimiento de microorganismos beneficiosos que realizan el tratamiento. Sin embargo, altos niveles de ciertos nutrientes en las aguas residuales pueden contaminar los acuíferos y las aguas superficiales, lo cual puede generar impactos significativos en la salud de quienes dependen de dichas fuentes de agua para suplir sus necesidades domésticas.

Ya que los nutrientes están en las aguas superficiales y son necesarios para el crecimiento de las plantas, no sorprende que las aguas residuales tratadas se usen como una importante fuente de nutrientes para fines agrícolas. Cuando se aplica de forma segura, los efluentes tratados pueden complementar o reemplazar a los fertilizantes químicos. En un mundo con poblaciones en rápido crecimiento, el vínculo entre el reciclaje de nutrientes de las aguas residuales y el logro de la seguridad alimentaria probablemente se volverá cada vez más fuerte, por ello reciclar el efluente tratado rico en nutrientes



proveniente de las aguas residuales es una estrategia importante para los SDMAR. Especialmente en ámbitos agrícolas, esto podría ser una buena razón o factor motivador para animar a las personas a invertir en la instalación de un sistema de manejo de aguas residuales.

2.7.1 Nitrógeno

La orina es una fuente principal de N en las aguas residuales. En los efluentes crudos el nitrógeno está casi totalmente en la forma de amoníaco. Cuando el amoníaco se mezcla con el oxígeno atmosférico o del suelo, se puede convertir en nitrato a través de un proceso microbiano llamado nitrificación en el que intervienen comunidades bacterianas de los géneros nitrosomonas y nitrobacter. Si bien algunos de los nitratos se liberan hacia la atmósfera en la forma de nitrógeno gaseoso a través de otro proceso microbiano llamado desnitrificación, la acumulación de nitratos en los acuíferos puede ocurrir cuando la descarga incontrolada de aguas residuales ingresa a los mismos.

Los acuíferos contaminados por nitratos, al ser usados para suministro de agua potable, pueden conducir a graves problemas de salud. Las altas concentraciones de nitratos en el agua potable han sido vinculadas con ciertas formas de cáncer, así como con una enfermedad conocida como metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul). Por esta razón, se deben mantener límites apropiados (distancias horizontal y vertical mínimas) entre los puntos de descarga de aguas residuales y los pozos y acuíferos.

El nitrógeno total de Kjeldahl, que es la suma de N orgánico y amoníaco, a menudo es asociado con desinfectantes de amoníaco cuaternario usados en grandes cantidades en algunas instalaciones comerciales. La presencia de altos niveles de nitrógeno total es otro problema para el diseño de SDMAR. En el caso particular de la legislación colombiana sobre vertimiento de aguas residuales domésticas en cuerpos de agua receptores, definida por la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 de Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia, 2015a) no se definen valores máximos permisibles para compuestos de nitrógeno; sin embargo, la norma considera necesaria la exigencia del “análisis y reporte” de los parámetros Nitratos (N-NO₃-), Nitritos (N-NO₂-), Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃) y Nitrógeno Total (N), así como el seguimiento de las condiciones ambientales de los sistemas acuáticos receptores de aguas residuales. Ello permitirá observar el comportamiento de tales parámetros sobre el cuerpo receptor, y tomar acciones oportunas por parte de las autoridades ambientales competentes, en caso de presentarse condiciones no deseadas.

2.7.2 Fósforo

El fósforo (P) es necesario para el ciclo de vida de las plantas acuáticas como las algas, que pueden ser un riesgo sanitario o poco atractivas para quienes viven cerca de cuerpos de agua o usan los cursos fluviales. En el caso de las algas verde azules, se pueden generar subproductos tóxicos; las cianobacterias pueden liberar toxinas que podrían afectar la piel, el hígado o el cerebro, entre otros órganos. El crecimiento de tales organismos en el agua que se utiliza para consumo humano potable crea problemas para la salud humana y pueden afectar negativamente a las especies que viven en los cuerpos de agua.

El P de los detergentes y fertilizantes y el N de los fertilizantes y residuos humanos presentan importantes retos para quienes manejan aguas residuales. El uso extendido de N y P, y los efectos negativos en los ecosistemas acuáticos como resultado de la operación de inadecuadas unidades de tratamiento, disposición final o dispersión de aguas residuales, los convierten en un aspecto clave a ser considerado en el proceso de planificación de SDMAR. Sin embargo, varios gobiernos de países en desarrollo aún no han implementado estándares sobre límites de presencia de nutrientes; tan pronto lo hagan, muchos administradores y operadores de SDMAR deberán cuantificar y reducir los altos niveles de estos en sus sistemas para cumplir con los estándares reglamentarios y proteger la salud pública. Sin embargo, determinar los tipos y niveles de nutrientes en el efluente tratado puede ser conveniente en sí mismo, especialmente si se planifica la reutilización de los efluentes con fines agrícolas.²

² Puede encontrar más información acerca de N y P en aguas residuales y acerca de los procesos generales para removerlos en Sasse (1998).



Planificación del SDMAR para la reducción de nutrientes:

Los diseñadores de SDMAR en ambientes acuáticos limpios, cerca de centros pesqueros importantes, o donde se usan aguas subterráneas para suministro de agua potable, deben percatarse de las concentraciones de nutrientes en el efluente tratado cuando planifiquen actividades de dispersión, descarga o reutilización. Remover los nutrientes del efluente mediante la absorción utilizando especies vegetales agrícolas o de jardines y ornamentación puede ser la medida de control más conveniente y económica, para ello considere lo siguiente:

- Varias tecnologías de SDMAR pueden reducir las cargas de nutrientes y aún convertir algunas en biomasa vegetal, tal como se describe en el Capítulo 4.
- La aplicación del efluente de aguas residuales debidamente tratadas en el suelo se debe monitorear cuidadosamente para verificar que se está aplicando la cantidad apropiada y que no se genera escorrentía superficial directa, lo cual podría contaminar fácilmente las aguas superficiales.



Estudio de Caso - Reciclaje de nutrientes en la escuela primaria de Putatan, Mutinlupa, Filipinas

Las aguas residuales de la Escuela Primaria de Putatan en Filipinas son tratadas inicialmente por medio de un reactor biológico de fibra de coco. Una vez tratado, el efluente es descargado en el jardín para irrigar una variedad de cultivos con fines alimenticios y no alimenticios (Figura 2.9). Tanto los estudiantes de la escuela como el personal que labora en ella se percataron de que las plantas que recibieron el efluente tratado crecieron mucho más rápido y que estaban mucho más sanas que las que únicamente recibieron agua potable. Según J.E.T. Pabilonia, investigador principal del proyecto con énfasis en el uso de fibra de coco, “Reciclar los nutrientes que se encuentran en el efluente de aguas residuales irrigando las plantas en niveles moderados es una forma de lograr dos objetivos: mantener la contaminación por nutrientes fuera del medio ambiente y usarlos para producir cosechas valiosas”.



Figura 2.9. J.E.T. Pabilonia en el proyecto demostrativo de aguas residuales de la Escuela Primaria de Putatan, Muntinlupa, Filipinas.

2.8 OTROS CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Se debe considerar al menos tres contaminantes adicionales típicos de las aguas residuales al diseñar un SDMAR a saber: - Las grasas y aceites provenientes de las instalaciones de servicios o procesamiento de alimentos; - La pelusa de las lavanderías comerciales; - Los residuos sólidos que ingresan al flujo de aguas residuales, o desechos provenientes de la preparación de hortalizas, corte de carnes o desescamado de pescados, que normalmente se llevan a cabo en los mercados públicos. Estos temas se describen con mayor detalle más adelante y en la sección sobre tecnologías de pretratamiento en el Capítulo 4.

2.8.1 Grasas y aceites

Las grasas y aceites son contaminantes comunes en las aguas residuales. Si no se controlan, la acumulación de grasas y aceites puede conducir a obstrucciones e incrustaciones en los equipos utilizados aguas abajo para el tratamiento de las aguas residuales. Los programas que fomentan la separación y recolección de grasas y aceites pueden recolectar y proveer cantidades comerciales de esta importante materia prima utilizada para fabricar productos tales como el sebo y el biodiesel. También, las grasas y aceites recolectadas se pueden utilizar directamente como fuente de combustible para calefacción o para cocinar. Para manejar este tipo de residuos se debe usar trampas de grasa en los establecimientos dedicados a la preparación o fabricación de alimentos o donde se realiza el lavado de utensilios tales como restaurantes, hospitales, centros turísticos y escuelas.

2.8.2 Pelusa

La pelusa está compuesta de partículas de fibras textiles, principalmente de algodón, lana y lino. Durante el lavado de prendas de vestir, la pelusa se acumula en el agua de lavado y aguas abajo puede obstruir las tuberías de desagüe, así como algunos equipos usados en el tratamiento de las aguas residuales. En las operaciones de lavado comercial, la acumulación de pelusa puede formar un volumen importante del lodo en los tanques sépticos o en reactores anaerobios. La eliminación de pelusa en la fuente mediante trampas de pelusa es muy buena práctica de manejo, por ello se recomienda usar trampas de pelusa en cualquier negocio que lava ropa, incluyendo instalaciones públicas de lavandería, hospitales, hoteles y colegios con internado.

2.8.3 Residuos sólidos

En el contexto del tratamiento de aguas residuales, los residuos sólidos son una amplia categoría de desechos sólidos que pueden terminar en el sistema de alcantarillado, ya sea a través de los inodoros o de canales de alcantarillado



al aire libre. Los locales comerciales, recintos institucionales y en general los lugares que generan residuos sólidos deberían usar separadores de sólidos para atrapar dicho tipo de materiales antes de que puedan ingresar a la tubería de alcantarillado. Los mercados públicos son buenos ejemplos donde las actividades asociadas a la venta de hortalizas, carne y pescado pueden generar altos volúmenes de sólidos en las aguas residuales; dichas instalaciones deberían usar trampas de sólidos o residuos en tuberías especialmente diseñadas.

2.9 ALGUNOS PARAMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

Es posible que se requiera de un pretratamiento de las aguas residuales antes de su descarga en el sistema de recolección de un SDMAR, ello debido a condiciones extremas asociadas a las propiedades físicas o químicas de los efluentes. El adecuado pretratamiento para solucionar aspectos relativos a dichas propiedades (y los componentes de la Sección 2.8) puede ser necesario porque:

- Ayuda a proteger el medio ambiente, la salud pública y la seguridad
- Ofrece condiciones laborales seguras para los trabajadores de los servicios de alcantarillado
- Protege las instalaciones para recolección y tratamiento de las aguas residuales contra daños debido a la descarga accidental o intencional de ciertos contaminantes
- Previene la introducción de sustancias que bloquearían u obstruirían el sistema de recolección y transporte
- Previene la introducción de contaminantes en el sistema de colecta, lo cual podría interferir con el proceso de tratamiento de aguas residuales o pasar la planta de tratamiento y presentar una eventual amenaza para la salud
- Mejora la oportunidad de reusar y reciclar aguas municipales tratadas y biosólidos.

Las siguientes secciones presentan informaciones sobre algunos parámetros de calidad del agua de importancia en ciertas aguas residuales.

2.9.1 Temperatura

La temperatura de las aguas residuales es un factor fundamental en la velocidad y eficiencia de las funciones asociadas al tratamiento biológico del SDMAR. A mayores temperaturas, la actividad microbiana se acelera, lo que se refleja en una mayor capacidad para descomponer y estabilizar los contaminantes. Esto mejora el funcionamiento de los métodos de tratamiento biológico del SDMAR. Las bajas temperaturas disminuyen la actividad microbiana y prolongan la cantidad de tiempo que las aguas residuales deberán pasar por el proceso biológico, situación que incrementa los costos de construcción

y operación de los sistemas de tratamiento. Los diseñadores de sistemas de manejo de aguas residuales operados en climas fríos o templados deben tener en consideración este importante factor. Las lagunas de estabilización para tratamiento de efluentes y los digestores anaerobios son buenos ejemplos de sistemas de tratamiento biológico cuyo desempeño es altamente sensible a la temperatura. Un sistema de lagunas que puede requerir del orden de 45 días para lograr un tratamiento adecuado en un clima tropical podría requerir de 60 a 90 días en climas templados o fríos. Se recomienda al lector seguir la guía de diseño para la variabilidad de temperatura, que se discutirá en el Capítulo 4.

2.9.2 pH

La acidez o basicidad de un líquido se define como su pH, el cual oscila entre el valor más ácido de cero al valor más básico de 14, y donde 7 representa el valor neutro. Entender cómo el pH afecta los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales, específicamente a las comunidades bacterianas que degradan la materia orgánica, los sólidos y los patógenos, es importante para el éxito de tales sistemas. Las bacterias operan mejor a un pH entre 6,8 y 7,2. Si el pH de las aguas residuales baja a 6,0 o se eleva por encima de 8,5, el metabolismo y la respiración de las bacterias se ven afectados negativamente y su actividad se hace significativamente más lenta, reduciendo el desempeño del tratamiento.

Algunas aguas residuales de ciertas fuentes comerciales e industriales pueden tener descargas con valores de pH extremos. En algunos casos, tener un pH superior a 7 es ventajoso para el tratamiento; un ejemplo es donde los valores de pH cercanos a 8,0 son óptimos para que ocurra la nitrificación, situación planificada para el manejo de aguas residuales donde el N es un problema. Para adoptar estrategias generales de pretratamiento para aguas residuales ácidas o básicas se recomienda concentrarse en la neutralización, que consiste en la adición de suficientes ácidos o bases para llevar el pH de las aguas residuales lo más cerca posible a 7,0. Para corregir el pH en soluciones ácidas y acercar su valor a la neutralidad se suele utilizar cal como agente amortiguador.

El nivel de pH se verifica introduciendo en el agua un medidor manual de pH o una cinta de prueba y observando el valor registrado en el pH metro o el cambio de color en la cinta, que luego se compara con una escala de pH. Para monitoreo de aguas residuales de tipo residencial se suele incluir la medición del pH pues ayuda a identificar si algunos productos químicos de uso doméstico están siendo utilizados y descargados de manera excesiva en el desagüe. Para efluentes de origen comercial o industrial, el monitoreo cuidadoso del pH puede ayudar a detectar posibles problemas generados por valores extremos de dicho parámetro, tales como la inhibición o muerte microbiana, antes de que se vuelvan graves y lleven a un desempeño deficiente del SDMAR.

2.9.3 Componentes químicos en las aguas residuales que pueden presentar retos

Los diseñadores y operadores del sistema de aguas residuales deben ser cuidadosos con las descargas químicas que contengan elementos además de N y P. Productos tales como blanqueadores, hormonas del crecimiento inyectadas al ganado y otras sustancias agrícolas o comerciales también pueden inhibir o matar los microorganismos que impulsan los procesos biológicos para tratamiento de aguas residuales al interior de las tecnologías de SDMAR, tales como los que desarrollan los biofiltros y los biodigestores.

Los productos químicos usados de las operaciones de lavanderías comerciales, enchapado metálico y curtiembres representan graves amenazas para el adecuado funcionamiento del SDMAR. Las instalaciones de lavado en seco (dry-cleaning) suelen usar productos químicos que pueden categorizarse como ácidos, bases, oxidantes, solventes u otros compuestos orgánicos, los cuales podrían ser tóxicos para los microorganismos. En algunos casos se debe evitar la mezcla de tales productos ya que podría causar reacciones adversas o explosiones, tales como las generadas cuando se combina el cloro con el amoníaco. La operación apropiada de dichas instalaciones requiere la total separación de estos residuos químicos del resto del flujo de aguas residuales.

El tipo de contaminación química más común en el tratamiento biológico de las aguas residuales se debe a los efectos antibacterianos del cloro, que es el principal componente de los blanqueadores. Los sistemas de tratamiento anaerobio, tales como los tanques sépticos y los reactores anaerobios con deflectores no suelen requerir de la neutralización de concentraciones típicas de blanqueadores domésticos usados en entornos residenciales dadas sus bajas concentraciones. Sin embargo, aquellas instalaciones que usan mayores cantidades de desinfectantes tales como hospitales, centros de atención de la salud e inclusive centros de sacrificio de animales, pueden necesitar el uso dispositivos de pretratamiento apropiados para proteger los sistemas de tratamiento biológico que se localizarán aguas abajo.

2.10 MUESTREO Y ANÁLISIS

En las secciones anteriores se evaluaron el caudal, la concentración de las aguas residuales y los contaminantes más comúnmente encontrados en los efluentes. A menudo es útil, especialmente en los grandes sistemas de manejo de aguas residuales, recolectar datos reales sobre el caudal, la concentración y la carga de contaminantes de las aguas residuales para tener una base más exacta para la toma de decisiones de diseño. Esto se puede hacer a través del muestreo y análisis de parámetros de calidad del agua tanto a nivel de campo (in situ) como a nivel de laboratorio. Aunque la actividad de muestreo pueda parecer sencilla, se debe evitar dificultades y errores para obtener datos exactos

y confiables. Esta sección describe estrategias de muestreo y análisis cuyo uso deben considerar los diseñadores de SDMAR para caracterizar de forma precisa las fuentes de aguas residuales.

Dado que el muestreo de campo y los análisis de laboratorio suelen ser caros, es importante asegurarse de que la inversión a realizar reporte datos exactos y de alta utilidad. Para maximizar la efectividad de las actividades de recopilación de datos, se describirán los siguientes pasos:

1. Preparación de un plan de muestreo
2. Recolección de muestras representativas
3. Manejo y conservación apropiada de muestras
4. Uso de la cadena de custodia y procedimientos apropiados de identificación de muestras
5. Garantía de la calidad de los procedimientos en el campo.

2.10.1 Preparación de un plan de muestreo

- El plan de muestreo es un documento escrito que describe:
- Por qué las muestras son necesarias
- Qué información será obtenida
- Quién recolectará las muestras en el campo y cómo y cuándo lo hará
- Dónde serán tomadas las muestras para análisis
- Cómo serán conservadas y transportadas las muestras de forma segura al laboratorio.

El propósito del plan de muestreo, que debería prepararse independientemente del tamaño del proyecto, es asegurarse de que los efectos de los eventos de muestreo se han considerado adecuadamente. Esto permite lograr la última meta; recolectar de forma segura muestras representativas de las aguas residuales a monitorear, conservarlas adecuadamente y llevarlas al laboratorio en los tiempos de espera requeridos.



Coordinar el muestreo con el laboratorio seleccionado:

Es recomendable que el laboratorio que será responsable de conducir los análisis esté involucrado en las primeras etapas de la planificación del evento de muestreo. El laboratorio debería suministrar los frascos o recipientes de muestreo, los agentes preservantes, las etiquetas y los formularios respectivos. Con frecuencia, el laboratorio puede proveer personal de muestreo capacitado por un pequeño costo adicional. Para obtener los mejores resultados posibles, se recomienda recurrir a un laboratorio autorizado por

una agencia reguladora del orden local o nacional y que tenga la respectiva certificación de sus procesos. Se recomienda verificar con el laboratorio cada aspecto asociado al plan de muestreo para garantizar la conformidad antes del evento de muestreo.

2.10.2 Recolección de muestras representativas

Para todos los programas de muestreo, con excepción de los más complejos, las muestras de aguas residuales pueden ser recolectadas por medio de los siguientes métodos en orden ascendente desde el punto de vista de exactitud y costo:

- Muestra al azar: muestra simple tomada en un momento específico
- Muestra compuesta: es la mezcla de dos o más porciones de muestra que representan un flujo de efluentes en un período de tiempo.
- Muestra compuesta ponderada por el flujo: muestra que consiste en dos o más porciones donde el tamaño de la porción es proporcional al caudal en el momento en que la fracción fue recolectada. Como un ejemplo, si el caudal en el tiempo A es dos veces el del tiempo B, el volumen de la porción de la muestra para el tiempo A debería ser dos veces el del tiempo B.

Las muestras tomadas al azar deberían usarse cuando la calidad de las aguas residuales no varía mucho en el tiempo. Se recomienda tomar varias muestras al azar en tiempos diferentes del día y en diferentes días de la semana para tratar de determinar las concentraciones de contaminantes promedio relativas a la variabilidad del flujo. En contraste, las muestras compuestas y compuestas ponderadas por el flujo son recomendadas cuando se requieren datos más exactos o cuando las concentraciones de los componentes de las aguas residuales son muy variables. El muestreo compuesto usualmente requiere equipo de muestreo y dispositivos automatizados para medir el flujo, para realizar este tipo de muestreo se recomienda contratar personal capacitado para tal fin.



Evitar los errores de muestreo:

Los errores más comunes en las pruebas de ensayos para caracterización de aguas residuales son usualmente resultado de la contaminación del muestreo, la conservación o transporte deficiente de las muestras y/o la falta de suficiente homogenización durante las pruebas. Para minimizar los errores de muestreo se debe entrenar al personal sobre los mejores procedimientos a seguir o se recurre a la contratación de personal adscrito a un laboratorio certificado.

2.10.3. Adecuado manejo y preservación de las muestras de campo

Las aguas residuales contienen microorganismos patógenos, por ello las muestras de campo deben ser recolectadas y manejadas de forma higiénica. El equipo de protección del personal, mediante mascarillas y guantes de látex (e idealmente, protección para los ojos), se debe usar en todo momento durante la recolección y manejo de muestras de agua; a continuación, se ilustran algunas imágenes relativas a la colecta y manejo de muestras para análisis de algunos parámetros de calidad del agua (Figura 2.10).

a)



b)



c)



d)



e)



f)



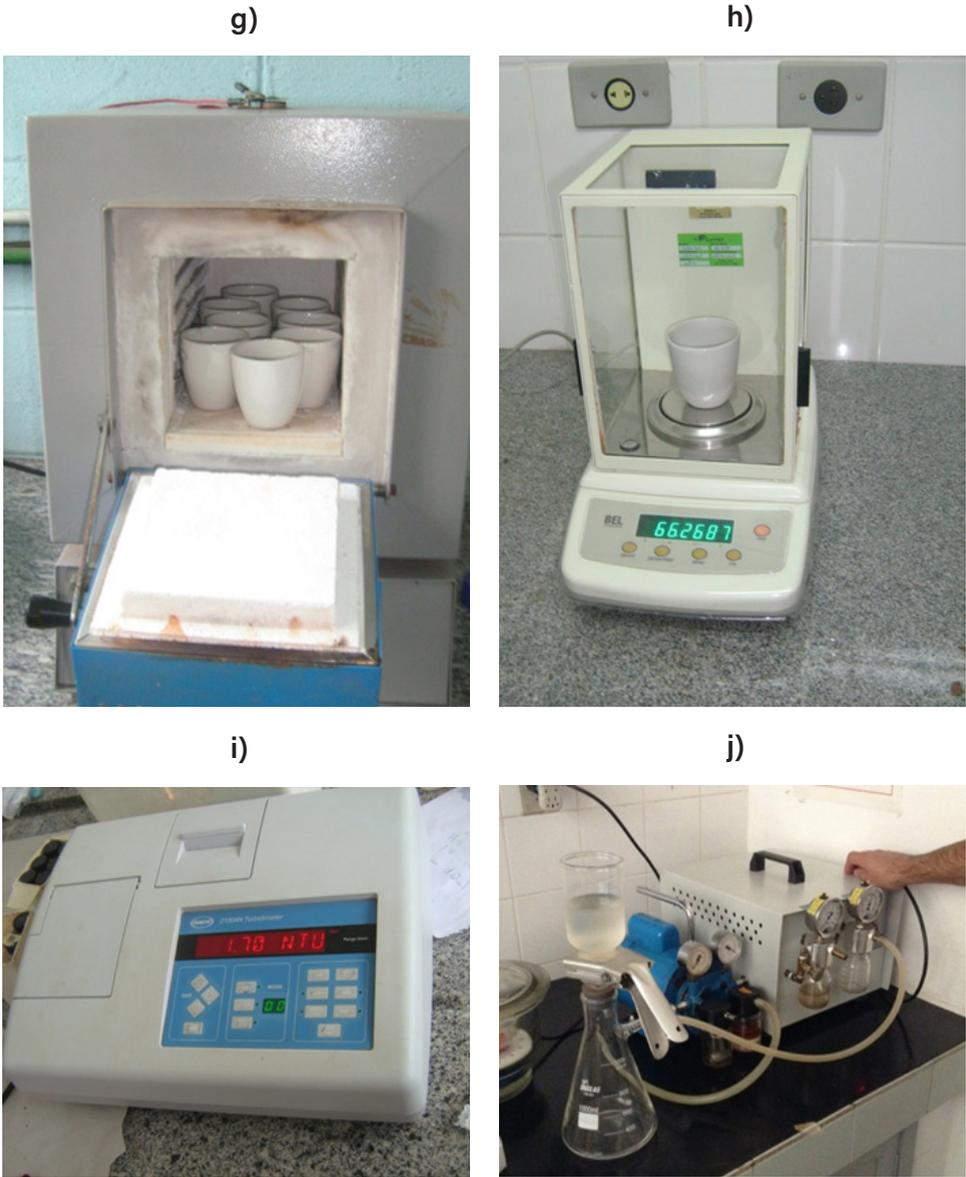


Figura 2.10. . Imágenes sobre el muestreo y manejo de muestras para análisis de calidad del agua.

En las fotografías de la Figura 2.10 se puede apreciar: a) el muestreo a nivel de superficie de agua proveniente de una laguna artificial libre de contaminación; b) el muestreo del agua de un riachuelo contaminado por aguas residuales urbanas; c) agua residual doméstica efluente de tratamiento primario de la cual se tomará una muestra para su caracterización; d)

medición in situ de los parámetros de calidad del agua pH, oxígeno disuelto y temperatura por medio de una sonda multiparámetro en una fuente de agua superficial contaminada; e) conservación de muestras de agua en campo con ácido sulfúrico para realizar el análisis de oxígeno disuelto; f) muestras de agua sometidas a análisis de DBO; g) mufla utilizada para determinación de sólidos volátiles y sólidos fijos en muestras de agua y de lodo; h) lectura de masa de un crisol en el análisis de sólidos totales en aguas residuales; i) turbidímetro para medición de la turbidez en muestras de agua; j) filtración de muestras de agua con bomba de vacío para separación de material en suspensión.

Las muestras de aguas residuales se degradan rápidamente y deben conservarse adecuadamente para transportarlas al laboratorio y su procesamiento oportuno. Esto se debe realizar en el tiempo de espera, específico para cada tipo de prueba. El laboratorio contratado debe proporcionar instrucciones y materiales para la adecuada conservación de las muestras en el campo hasta su transporte y entrega al laboratorio. Además, se debe revisar junto con el laboratorio los detalles específicos acerca estos dos métodos primarios:

- Conservación en una hielera a 4°C, recomendable para análisis de microorganismos patógenos y para el ensayo de DBO (tiempo de espera de 6 horas), así como para ensayos de sólidos totales y sólidos volátiles, usualmente con tiempos de espera de hasta siete días.
- Conservación a través del uso de ciertos compuestos químicos, usualmente ácido sulfúrico o nítrico, para análisis de nitrógeno, fósforo y otras pruebas relacionadas con químicos, usualmente con períodos de espera de siete días.³

³ Para obtener más información acerca de las metodologías de muestreo se recomienda consultar la Guía para monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y aguas subterráneas publicadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2002), que pertenece al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia, para ello el lector puede ingresar al siguiente link:

https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf. Adicionalmente, para efectos de ampliar informaciones sobre las metodologías de muestreo, conservación y almacenamiento de muestras se recomienda consultar a IDEAM (2007) en el enlace:

http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-Oe123479d428, así como a Fulhage et.al. (1993) en <http://extension.missouri.edu/p/G1895>.

SECCIÓN DE LABORATORIOS CADENA DE CUSTODIA		Codigo: LSE-PT01-F-048 Página: 2 de 2 Revisión: 0 Vigente a partir del: 2022-03-09														
ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DEL MUESTREO (MUESTREOS DESARROLLADOS POR EL LABORATORIO)										CONTROL DE TRANSFERENCIAS DE MUESTRAS, TRANSPORTE Y RECEPCIÓN						
BLANCO DE EQUIPO										T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BLANCO DE CAMPO										T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BLANCO DE VIAJE										T1	T2	T3	T4	T5	T6	
CADENA DE CUSTODIA (RESPONSABLE MUESTREO, TRANSPORTE Y RECEPCIÓN)																
ESPACIO DILIGENCIADO POR EL LABORATORIO																
		NOMBRE Y APELLIDO				FECHA		HORA		ESTADO		FIRMA		OBSERVACIONES		
RESPONSABLE DEL MUESTREO								INICIO		FIN						
RESPONSABLE DEL TRANSPORTE																
RESPONSABLE DE LA ENTREGA AL LABORATORIO																
RESPONSABLE DE LA RECEPCIÓN																
VERIFICACIÓN DE CONTROLES DE CALIDAD EN RECEPCIÓN DE MUESTRAS																
INGREDIENTES	MUESTREO															
	CLORURO DE NITRÓGENO	AMONIO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
TIPO DE RECIPIENTE	FRASCO PLÁSTICO										FRASCO ÁMBAR			FRASCO ÁMBAR		
CÓDIGO DE MUESTRA																
TEMPERATURA DE REFRIGERACIÓN °C																
NÚMERO DE RECIPIENTES/ VOLUMEN																
VERIFICACIÓN DE PH Y OD																
MUESTRAS ETIQUETADAS Y SELLADAS	SI		NO		MUESTRAS APTAS PARA SER RADICADAS		SI		NO		VERO BIFENIL		SI		NO	
RECOMENDACIONES Y NOVEDADES RECEPCIÓN DE MUESTRAS:																

Figura 2.11. . Formulario de Cadena de Custodia de Laboratorios Certificados de la Universidad de Nariño - Colombia), Parte 2.

2.10.5 Aseguramiento de la calidad/control de calidad

El aseguramiento de la calidad y el control de calidad se refieren a las políticas, procedimientos y actividades establecidas para garantizar la confianza en la exactitud de los datos. El aseguramiento y control de calidad se aplican a los procedimientos de campo y a los de laboratorio para el muestreo de aguas residuales, descrito en estas secciones.

2.10.5.1 Aseguramiento y control de calidad en el campo

Las siguientes prácticas se recomiendan para minimizar errores y garantizar la calidad de los eventos de muestreo que se realicen en campo. Las actividades asociadas al muestreo y monitoreo de parámetros de calidad del agua en campo están generalmente bajo el control del muestreador, para ello se presentan las siguientes recomendaciones:

- Uso de procedimientos operativos estándar para la recolección y análisis de muestras
- Uso de la cadena de custodia y procedimientos para identificación de muestras

- Estandarización, calibración y verificación de instrumentos
- Entrenamiento para técnicos de muestreo y analistas
- Garantía de conservación, manipulación y descontaminación apropiadas
- Uso de muestras de control de calidad tales como blancos de campo por duplicado y enjuague oportuno y eficiente de equipos.

2.10.5.2 Aseguramiento y control de calidad en laboratorio

Los laboratorios que ofrecen el servicio de análisis de parámetros de calidad del agua deben tener planes de aseguramiento y control de calidad actualizados y disponibles, a solicitud de los usuarios o las autoridades pertinentes. El plan de aseguramiento y control de calidad del laboratorio debe mencionar los procedimientos usados para garantizar que sus prácticas internas son válidas y siguen los estándares del área de trabajo respectiva. Generalmente, los clientes de laboratorios contratados pueden solicitar copias de los planes de aseguramiento y control de la calidad y verificar que cumplen con los estándares mínimos.

Se recomienda usar la lista de control de muestreo y análisis (Tabla 2.8) para dar seguimiento a las actividades clave para la recolección de datos a nivel de campo y de laboratorio.

Tabla 2.8 Lista de control de muestreo y análisis.

Lista de control del plan de muestreo	S	N
Hay un plan de muestreo por escrito		
El número de muestras, las pruebas analíticas y los sitios de muestreo han sido identificados en el plan.		
Se ha establecido contacto con el laboratorio que llevará a cabo el análisis, se han revisado los procedimientos y se han programado oportunamente los servicios.		
Se han recibido todos los envases para muestreo, los preservantes de muestras, etiquetas, hieleras y formularios de la Cadena de Custodia.		
La(s) persona(s) que conducirá(n) el muestreo ha(n) recibido entrenamiento en los procedimientos apropiados.		
Se ha proporcionado el entrenamiento en salud y seguridad ocupacional, así como el equipo de protección del personal requerido.		
El acceso a los sitios de muestreo está abierto y sin restricciones de acceso.		
Se organizó la logística para transportar las muestras al laboratorio y se hará en los tiempos de espera requeridos.		
El laboratorio está autorizado para llevar a cabo el trabajo requerido y tienen un plan de aseguramiento y control de la calidad.		

2.11 REVISIÓN DE LOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Una vez completada la recolección de datos y/o ensayos y colectadas las informaciones pertinentes para conocer la naturaleza del flujo de aguas residuales en estudio, revise los hallazgos. Los efluentes deben ser descritos con base en las siguientes características:

- Carga hidráulica
- Carga orgánica
- Variabilidad del flujo
- Nutrientes y otros contaminantes problemáticos de las aguas residuales tales como aceites y grasas, pelusa y residuos sólidos
- Características físicas y químicas
- Otras condiciones específicas del sitio que podrían generar impacto en el diseño u operación del SDMAR.

Después de revisar cada característica, es fundamental asegurarse de que los resultados están documentados para fines presentes y futuros y se recomienda llevar un registro por escrito de las condiciones de referencia. Las informaciones ofrecen una base para evaluar los cambios que puedan surgir en los caudales o modificar las condiciones o procesos de instalaciones comerciales e industriales. Los registros escritos son muy útiles para justificar el cumplimiento de actividades o requisitos normativos.

La Tabla 2.8 puede utilizarse para resumir los supuestos y hallazgos obtenidos como resultado de un muestreo y análisis de un efluente. Para ejemplificar dicha situación, la tabla se completa ca continuación con los datos recolectados para el estudio de caso de LORMA y representa la base del diseño del SDMAR adoptado para el manejo de sus aguas residuales.



Estudio de caso de LORMA - revisión de las características de la fuente:

Ya que el caudal de diseño y la carga orgánica ya habían sido determinados previamente, fue necesario revisar otras características de la fuente de aguas residuales:

- Variabilidad: Existe una variabilidad mínima en el caudal. Por lo general, la mayoría de camas del hospital se encuentran ocupadas y las instalaciones operan 7 días a la semana, 365 días al año;
- Grasas y aceites: Hay preparación de alimentos, se ofrece el servicio de suministro de alimentos y se realiza el lavado de utensilios en el hospital, por ello se puede suponer que se genera aceites y grasas; por lo tanto, será necesario implementar algún tipo de trampa de grasas o de interceptor de tales residuos;
- Pelusa: En el hospital hay lavandería de ropa, por ello será necesario el manejo de la pelusa;

- Residuos sólidos y desechos médicos y peligrosos: En LORMA, todos los desechos médicos y peligrosos son recolectados, almacenados y manejados separadamente del flujo de aguas residuales, el hospital cuenta con sistemas de tubería de alcantarillado sanitario a flujo libre, cuyos tramos se encuentran totalmente aislados, por ello el eventual ingreso de residuos sólidos al flujo de aguas residuales no se considera como un posible problema;
- Nutrientes: No hay actividades que sugieran concentraciones excesivamente elevadas de nutrientes, tales como fertilizantes u otros compuestos de N o P, por ello que no se necesita un enfoque especial para el tratamiento de los efluentes;
- Aspectos físicos y químicos: el pH y la temperatura no se encuentran en valores extremos; sin embargo, es muy frecuente el uso de blanqueadores y soluciones de cloro para la limpieza de superficies, por ello se debería considerar dicha situación para la selección de las tecnologías de tratamiento primario y secundario.

Estas condiciones se mencionan en la Tabla 2.9 y representan los hallazgos del estudio de caracterización de la fuente.

Tabla 2.9. Formulario de caracterización de la fuente y resumen (ejemplo del estudio de caso de LORMA)

Parámetro	Descripción	Valor de la fuente
Caudal	¿Cuál es el flujo diario de aguas residuales?	72.770 L/d
Carga orgánica	¿Cuál es la carga de la DBO de la fuente de aguas residuales?	553 mg DBO5/L
Variabilidad del flujo	¿Varía el flujo de la fuente diariamente, semanalmente o por temporada y sugiere la necesidad de igualación del flujo?	No
Grasas y aceites	¿Hay actividades de servicio de alimentos, fabricación de alimentos o lavado de utensilios?	Sí
Pelusa	¿Hay actividades comerciales de lavado de prendas de vestir?	Sí
Residuos sólidos	¿Hay actividades especiales que introducen partículas de residuos sólidos que no se pueden manejar, así como residuos peligrosos?	No - los desechos peligrosos y médicos son separados
Nutrientes	¿Hay requisitos normativos para la reducción de nutrientes en el efluente, o inquietudes al respecto?	No
Aspectos físicos	¿Hay temperaturas o aspectos inusuales del pH del flujo debido a actividades comerciales?	No
Aspectos químicos	¿Hay otros componentes químicos de las actividades comerciales que pueden estar en las aguas residuales?	Se usan altos niveles de desinfectante de amonio cuaternario

En el Capítulo 4, el lector podrá apreciar cómo fueron utilizados estos datos, junto con las informaciones del sitio, obtenidos por medio de los ejercicios que serán descritos en el Capítulo 3 para determinar las opciones de tecnologías adecuadas para el SDMAR.

03

**EVALUACIÓN
DEL SITIO**

Este capítulo introduce aspectos asociados a la importancia del plano del lugar donde se ejecutará el proyecto, además, presenta los procedimientos paso a paso para evaluar suelos, lo cual ayuda a determinar el potencial de un sitio para dispersar el efluente de aguas residuales, y en tal sentido, identifica las limitaciones relativas a las aguas subterráneas y superficiales;

Por lo tanto, describe otros factores importantes en la evaluación del sitio, incluyendo el uso del suelo en terrenos aledaños, conflictos con los servicios básicos y el acceso al SDMAR; y considera cómo la intención de reutilizar o reciclar los residuos del tratamiento de aguas residuales puede incidir positivamente en las decisiones asociadas al tipo de tecnologías a adoptar.

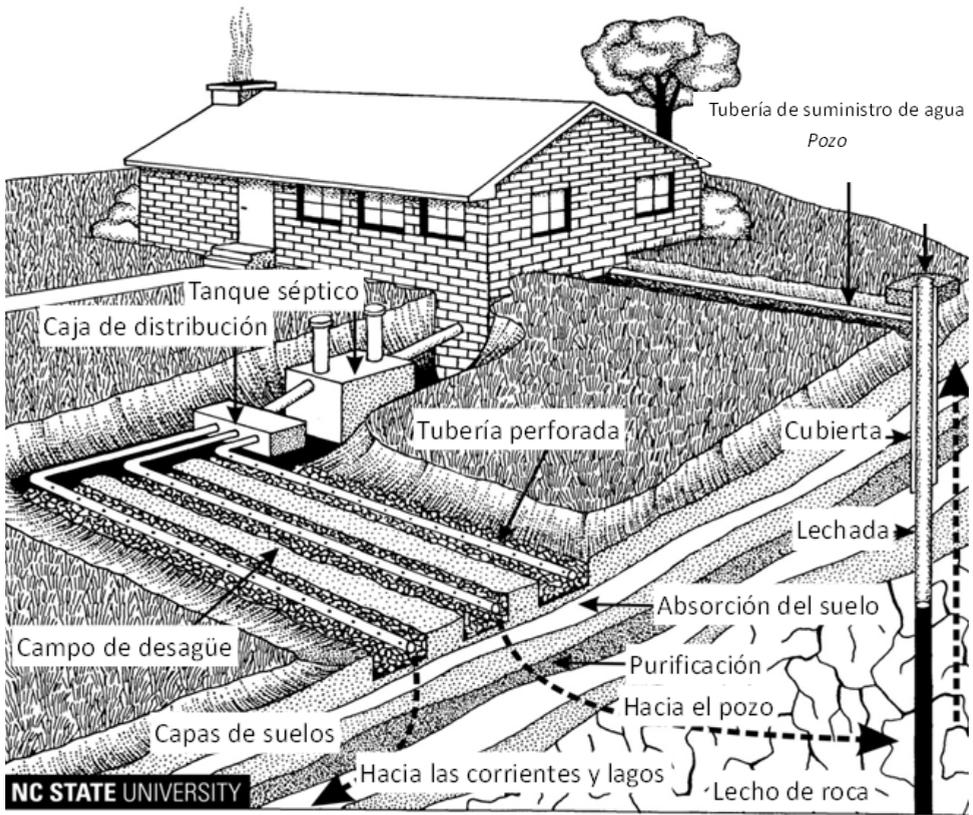


Figura 3.1. Ilustración sobre características del lugar y secuencias de paso del agua a través de suelo que guían la selección de tecnologías de SDMAR con disposición en el suelo como parte del proceso de evaluación del sitio (Fuente: Adaptada de Hoover et al., 2016, p. 2).

PREÁMBULO

La Figura 3.1 ilustra la forma en la que las aguas residuales fluyen desde una vivienda unifamiliar a través del tanque séptico y después hacia un sistema de disposición en el suelo. En este caso, el sistema de disposición en el suelo corresponde a un campo de drenaje con zanjas o trincheras de absorción, que consiste en una excavación rellena con gravilla de granulometría favorable para que el efluente reciba tratamiento adecuado a medida que pasa por el suelo.

La imagen recuerda que la infraestructura que está sobre el suelo es una parte de lo que se debe considerar al diseñar un sistema de manejo de aguas residuales, ya que a veces no solo debe restringirse al estudio del suelo como elemento de cimentación; en ese sentido, y en algunos casos, los suelos también pueden ser parte del sistema de tratamiento de los efluentes. Mediante la ayuda de excavaciones de prueba en el suelo (denominadas “apiques”), se puede descubrir las diferentes capas de suelos que servirán de referencia para la selección de las tecnologías más apropiadas para un proyecto en particular. Este capítulo cubre la evaluación de características tanto superficiales como subsuperficiales del sitio del proyecto, lo cual se usa para seleccionar y diseñar las tecnologías de SDMAR y para suministrar informaciones sobre características fisicomecánicas del suelo al constructor (tales como la resistencia al esfuerzo cortante y la presencia de aguas subterráneas o de lechos de roca), antes de que se lleve a cabo la ejecución constructiva del sistema.

En algunas partes de América Latina, los tanques sépticos son instalados sin un fondo debidamente impermeabilizado. Dicho tipo de construcciones no corresponden a tanque sépticos, sino a pozos de infiltración. Sin embargo, hay diferentes términos que se utilizan para describir un pozo con tales características, y a veces se confunden entre dichos términos; entre los más utilizados están: tanque séptico, fosa séptica, pozo séptico, pozo ciego, y pozo negro. Aunque se usan tanques sépticos cerrados, el efluente del tanque se descarga directamente mediante un canal hacia una quebrada, un río, o a un cuerpo hídrico receptor. Los pozos de infiltración sirven para separar a las personas del material fecal, pero no realizan una labor eficiente en cuanto al tratamiento de las aguas residuales a medida que se desplazan por el suelo hacia el acuífero. En muchas partes del mundo, dichos sistemas son responsables de la contaminación de los acuíferos que suministran agua potable a parte de la población. Un sistema mejorado incluye un tanque séptico (o una fosa séptica) herméticamente sellado, seguido por un adecuado sistema de drenaje. Al menos, la temática abordada en este capítulo contribuirá a disipar la idea de que los pozos de infiltración son mecanismos suficientes para manejo de aguas residuales; así se pretende ofrecer más informaciones que mejoren la elección del mecanismo de tratamiento de los efluentes.

Algunas de las técnicas de evaluación del sitio y de los suelos que se presentan en este capítulo no requieren de acceso a equipo altamente especializado y pueden desarrollarse en el sitio por parte de profesionales entrenados. Las informaciones a obtener permiten que el investigador determine rápidamente la aptitud o no de los suelos para un tratamiento de aguas residuales por medio de disposición en el sitio o a través del uso del suelo como parte del tratamiento; y en caso de que el terreno sea adecuado, permite determinar la cantidad de aguas residuales que se puede aplicar de forma segura a un área específica de terreno. Dicho conocimiento se puede usar para un SDMAR que infiltre el efluente tratado o que lo reutilice para irrigación de jardines o cultivos. Entender ese tipo de características de los suelos es un componente clave del proceso de evaluación del sitio y una característica primordial de este capítulo. Enseñar esta metodología paso a paso es una de las herramientas que se pueden utilizar para desarrollar la capacidad de los proveedores de servicios locales para la amplia aplicación de las tecnologías de SDMAR en países en desarrollo, uno de los objetivos fundamentales de este texto.

3.1 INTRODUCCIÓN

El segundo grupo de insumos necesarios para la toma de decisiones relativas a un SDMAR se obtiene mediante la evaluación del sitio donde se llevará a cabo el manejo de los efluentes. La preparación de un plano del lugar y el entendimiento de las características clave del sitio tales como propiedad de los terrenos, pendiente del terreno y topografía, recursos hídricos, usos del suelo y vocación según planes de ordenamiento territorial, puntos de conexión de servicios básicos cercanos y acceso general al sitio, son vitales para elegir las tecnologías más apropiadas. Las secciones y la lista de control que se presentan a continuación pueden ayudar a que el investigador del sitio organice las actividades y las conduzca en un proceso paso a paso.

La siguiente lista de control ayudará a que los proveedores de servicios den seguimiento a las actividades de evaluación del sitio.

Paso	Actividad	S	N
1	Obtención de datos de referencia sobre el propietario y la propiedad.		
2	Ejecución de un levantamiento topográfico planimétrico y altimétrico con toma de detalles que puedan ser relevantes para el proyecto.		
3	Preparación de un plano del lugar, a escala, que ilustre los linderos de la propiedad, las edificaciones existentes, las pendientes del terreno y otras características que se pueden usar para estimar el área de terreno disponible y entender sus características.		
4	Ejecución de apiques o sondeos y evaluación de la disposición del horizonte de suelo, la profundidad y el espesor de los estratos de suelo.		

5	Evaluación de los suelos para constatar su estructura, textura, consistencia, permeabilidad y otras propiedades físico mecánicas y diligenciamiento completo del formulario de informe con los respectivos datos del suelo.		
6	Determinación de la profundidad a la que se encuentran las aguas subterráneas, las alturas de oscilación del nivel freático u otras condiciones limitantes e identificación de las menores profundidades a las que se presentan dichas condiciones.		
7	Determinación de las pendientes del lugar y la posición del relieve y componentes del paisaje. Determinación de la tasa de infiltración a largo plazo –TILP- (conocida también como LTAR, por las siglas en inglés de <i>Long term acceptan cerate</i>)- para cada horizonte del suelo.		
8	Determinación de la elevación de las aguas superficiales, su variación estacional, e identificación de las planicies aluviales y los drenajes superficiales.		
9	Evaluación del uso de la tierra y las características hídricas del terreno analizado y sus áreas circundantes, incluyendo la ubicación de pozos y aguas superficiales.		
10	Ubicación de las acometidas y los puntos de conexión de los servicios básicos, así como eventuales estructuras preexistentes de SDMAR en la propiedad.		
11	Verificación que el sitio esté libre de penalidades y sin ninguna restricción legal.		
12	Identificación de los usos finales deseados tanto para el efluente del SDMAR como para los residuos tratados.		
13	Reconocimiento de cualquier tipo de restricciones de cumplimiento a reglamentaciones vigentes, así como de zonificación, uso de la tierra, o de descarga superficial (vertimiento).		

3.1.1 PASO 1 - Información de Referencia

El proceso paso a paso para evaluar el sitio comienza buscando información documental o cartográfica institucional. En este paso se recomienda reunir toda la información que sea posible acerca del terreno y la tenencia de este. Se debe buscar mapas de zonificación o evaluación en las oficinas gubernamentales locales; en el caso de Colombia, para informaciones del orden nacional se puede recurrir al Instituto Geográfico Agustín Codazzi y a nivel local se puede recurrir a la Oficina de Registro de Instrumentos Públicos de cada municipio.

3.2 PASO 2 - ELABORACIÓN Y USO DE UN ESQUEMA DEL PLANO DEL LUGAR

Un plano del sitio ayuda al proveedor de servicios a planificar las características tecnológicas clave del SDMAR. El esquema a escala sirve como herramienta para describir todas las características físicas del sitio en un solo plano. Se usa para determinar la ubicación y características de las

estructuras existentes y futuras del sitio, para estimar el área de la superficie disponible para los componentes del SDMAR y verificar el cumplimiento de las distancias mínimas reglamentarias a pozos, cursos de agua y otros elementos de importancia similar. También se usa para esquematizar la secuencia del flujo de las aguas residuales crudas a medida que se mueven desde la fuente hacia el sistema de tratamiento, y a través de las unidades constitutivas de dicho sistema de tratamiento, hasta llegar al punto de descarga, reúso, dispersión o vertimiento final.

Un esquema del plano del sitio (por ejemplo, para LORMA en la Figura 3.2) debe identificar los linderos de la propiedad, pozos, distancias mínimas, estructuras físicas, edificaciones, pendientes e información topográfica, planicies aluviales y desagües, donde fue realizado el estudio de suelos, y las ubicaciones en el sitio donde se podría instalar la infraestructura del SDMAR. También brinda información relativa a las pendientes y aspectos topográficos propios del sistema. El plano se dibuja a escala y debe facilitar la lectura o determinación de las dimensiones por medio del uso de un escalímetro o regla común en medio impreso; al tratarse del medio magnético su interpretación y manejo con precisión será facilitado utilizando software para CAD (computer aid design: diseño asistido por computador). Los planos del lugar adecuadamente elaborados son muy efectivos para comunicar información acerca de un proyecto a los reguladores, contratistas, participantes u otras partes interesadas.

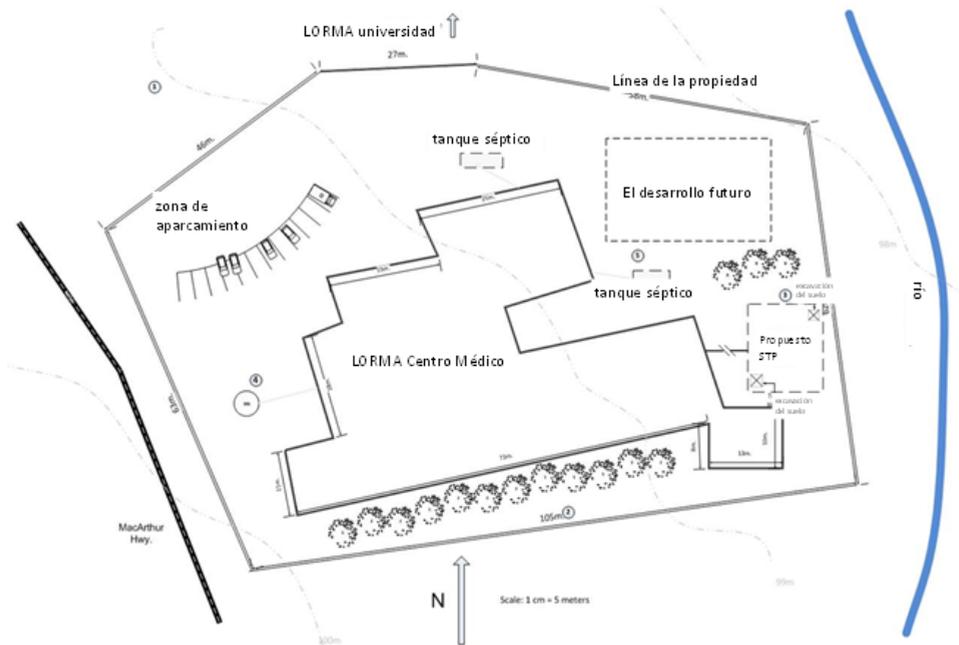


Figura 3.2. Ejemplo de esquema preliminar del plano del sitio del Centro Médico LORMA.

1. Las curvas de nivel que indican las pendientes del terreno. Están basadas en un punto fijo al que se le asignó un valor arbitrario de 100 m a partir del cual se pueden determinar las diferencias de nivel respectivas y medir todas las pendientes en el terreno;
2. Dimensiones de la propiedad. Con frecuencia se pueden obtener de los registros de usos de la tierra en las oficinas del gobierno local, pero cuando se tenga alguna duda, un levantamiento formal puede ayudar a verificar o identificar los linderos reales del terreno;
3. Apiques de prueba (ubicación de las perforaciones ejecutadas para el estudio de suelos). Se trazan en el plano del terreno, en círculos numerados del 1 al 5, los cuales ayudan a identificar la variabilidad de las características del suelo a nivel subsuperficial;
4. Ubicación de todos los pozos y tuberías de agua en la propiedad en cuestión y en terrenos vecinos. Estos deben ser identificados y estar oportunamente marcados debido a la necesidad de cumplir con los requisitos de distancias mínimas para evitar contaminación de cursos de agua o de sistemas de transporte de agua potable;
5. Ubicación de los tanques sépticos existentes. Esto ayuda a identificar los lugares de vertimiento o descarga de aguas residuales existentes, lo que le permite al diseñador planificar eficazmente la disposición de las tuberías de alcantarillado y la ubicación para otros componentes del sistema.

3.2.1 Procedimiento para elaborar un esquema del plano del sitio

Como complemento a lo que normalmente se realiza por medio de un levantamiento topográfico completo con su respectivo geo-referenciamiento y toma de datos con alta precisión a continuación se menciona el proceso paso a paso simplificado para crear un plano del sitio (el cual se menciona en la lista de control a continuación):

1. Escoja una escala apropiada. Debe elegir una unidad de escala que permita que el plano esté representado de la mejor manera posible en el papel. Con frecuencia se usa una medida de 1 cm para representar 1 m, 5 m o 10 m (escalas 1:100, 1:500 y 1:1000, respectivamente). La escala adecuada permite que un revisor verifique las dimensiones del plano y que el proveedor de servicios calcule fácilmente las distancias y las áreas, lo cual es crítico para diseñar y dimensionar los alcantarillados y componentes del sistema de tratamiento.
2. Identifique el norte magnético o el norte geográfico en el plano del sitio y represéntelo con una flecha. Esta norma común de la ingeniería permite que el revisor del esquema visualice más fácilmente el sitio.
3. Dibuje los linderos (límites) de la propiedad y dimensiónelos. Los funcionarios del gobierno local a menudo son fuentes de información



relativa a la ubicación de los linderos de la propiedad. Si se desconoce la ubicación exacta de los límites de una propiedad, será necesario un levantamiento topográfico formal. El mapeo total y completo de los límites de la propiedad ayudan a garantizar que los componentes del SDMAR sean instalados en los lugares correctos.

4. Represente gráficamente y a la escala adecuada todas las edificaciones, caminos, carreteras, ríos, taludes, planicies aluviales, bancos de corte y demás características del terreno que podrían tener un impacto en el SDMAR. Para ello se miden las distancias entre los elementos usando un escalímetro, escuadras y un compás. Por lo general, se requieren dos medidas para ubicar un punto en el plano del sitio.
5. Ubique futuras urbanizaciones, edificaciones o estructuras. Los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas residuales se convertirán en elementos permanentes del lugar. Es importante considerar cómo se desarrollará el sitio en el futuro, no solamente para planificar adecuadamente los volúmenes adicionales de aguas residuales, sino también para asegurarse de que el desarrollo futuro no estará limitado debido a deficiencias en la ubicación y dimensionamiento del SDMAR.
6. Dibuje las curvas de nivel (líneas que unen puntos del terreno con igual cota o altitud) para así identificar las pendientes y las características topográficas.
7. Ubique todos los apiques, sondeos y demás perforaciones de pruebas relacionadas con el estudio de suelos. Asígneles números para poderlos comparar con los registros de perforaciones del suelo.

Se necesita suficiente información topográfica para establecer el perfil hidráulico que, en caso de presentar pendiente excesiva, puede tener impactos significativos en el desarrollo de sistemas a flujo libre. Proporcionar una topografía exacta también ayudará al proveedor de servicios a:

- Seleccionar las mejores rutas para la tubería del alcantarillado o el sistema de transporte de líquido a flujo libre.
- Determinar si con solo el efecto de la gravedad se puede lograr que las aguas residuales fluyan como se desea.
- Determinar si los elementos especiales tales como tramos de alcantarillado con las cámaras de caída y pozos de limpieza o de inspección (Figura 3.3) que se usan para evitar obstrucciones, se pueden instalar o si se necesitarán estaciones de bombeo.

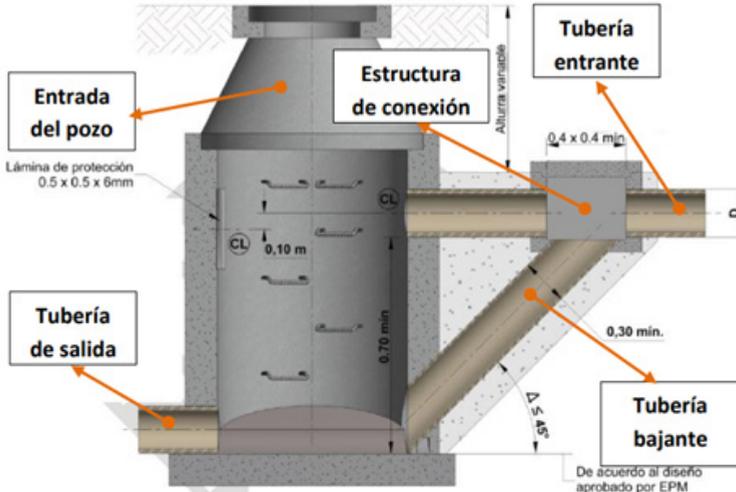
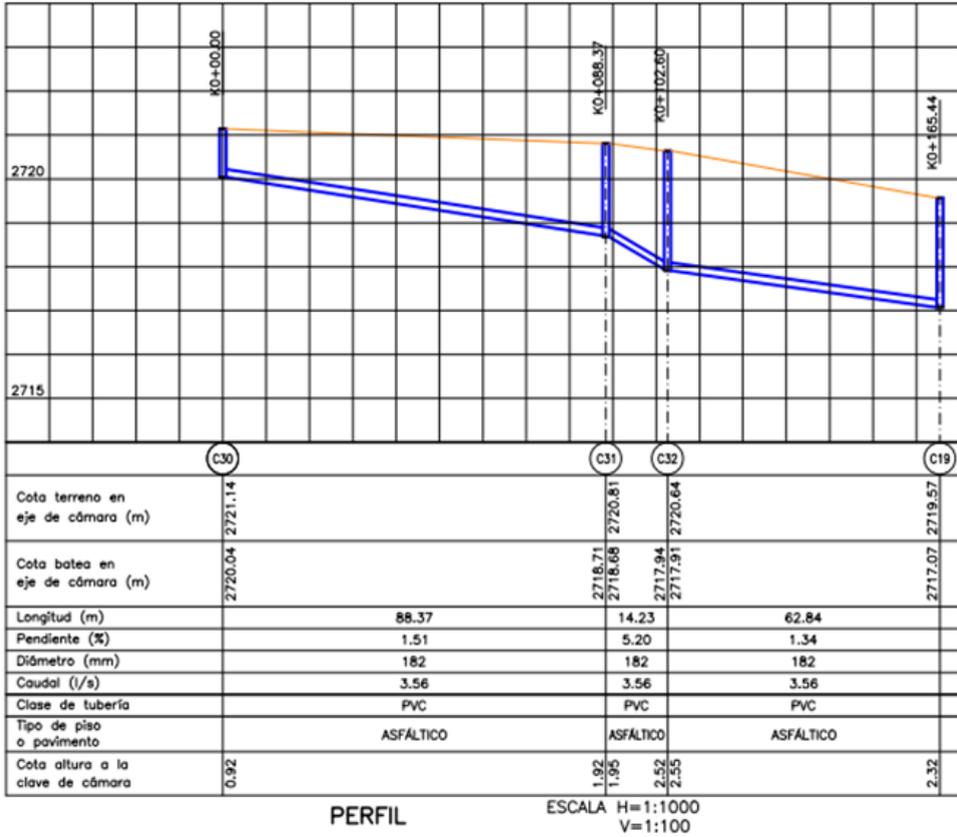


Figura 3.2. . Perfil de tramos de alcantarillado con cambio de pendiente -A-; Partes que componen una cámara de caída con bajante -B- (Fuente: Palacios-Cruz, 2019, p. 13).

8. Ubique las tuberías de agua potable, pozos, captaciones de agua potable y otros elementos relacionados con el agua destinada a consumo humano. Tales elementos críticos requieren un apego estricto a las distancias mínimas a los componentes del SDMAR para garantizar la protección de la salud pública. Revise con el funcionario encargado de las regulaciones locales o siga las distancias mínimas que se proporcionan como una guía preliminar en la Tabla 3.1.
9. Ubique otros servicios básicos, incluyendo cableado eléctrico, tuberías de gas natural, cables telefónicos, de TV por cable, cables del servicio de internet y datos y sus puntos de conexión. Si se desconocen las ubicaciones subterráneas de los servicios básicos, es necesario contratar un servicio de localización de los mismos o excavar cuidadosa y progresivamente orificios pequeños de poca profundidad para identificar las tuberías subterráneas de los servicios básicos con el fin de evitar peligros y responsabilidades por daños durante las excavaciones.
10. Verifique que todos los elementos tengan las dimensiones apropiadas. Revise la distancia y los ángulos de los límites de la propiedad y la distancia lineal de los linderos del terreno a los elementos claves para la ubicación del SDMAR.
11. Registre los nombres y dirección del propietario, el número de lote u otras informaciones de identificación catastral del lugar. Identificar los propietarios de los lotes que se encuentren alrededor del terreno en cuestión.
12. Proporcione un mapa o direcciones para llegar al sitio, que podrán ser útiles para los reguladores, contratistas y trabajadores de entregas de material.

Tabla 3.1. Distancias mínimas recomendadas de los componentes del sistema de aguas residuales.

Elemento a considerar para determinar la distancia mínima	Componente del SDMAR		
	Unidad de tratamiento	Zanjas de infiltración	Pozo de infiltración
Estructura	1,5 m	2,5 m	3 m
Límite de la propiedad	1,5 m	1,5 m	3 m
Límite de la propiedad cuando hay pozos	15 m	15 m	15 m
Tubería de agua potable de abastecimiento	3 m	8 m	8 m
Pozo	30 m	30 m	50 m
Zanja de desagüe o talud de corte	5 m	15 m	15 m
Corriente superficial/estanque	10 m	30 m	30 m
Reservorio de agua potable	20 m	70 m	70 m
Servidumbre de carretera	1 m	2 m	3 m

Fuente: (Adaptado de: County of San Diego, 2010, p. 13).

La Tabla 3.1 presenta algunas de las distancias mínimas comunes para sistemas descentralizados para tratamiento de aguas residuales o para el tratamiento de efluentes en el sitio. Dichas distancias mínimas se consideran desde el sistema de aguas residuales hasta las características o elementos sensibles del lugar y deben utilizarse salvo se den las distancias mínimas definidas por la legislación de cada país, estado o municipio. Las distancias mínimas hacia otros elementos tales como taludes de tierra en bancos de corte, pendientes, piscinas u otras características similares deben estar basadas en consideraciones específicas del sitio tales como tipos de suelos y otras condiciones que podrían permitir que las aguas residuales lleguen a la superficie o de otra forma ejerzan algún impacto en las características del sitio.



Consecuencia de ignorar las distancias mínimas

La Figura 3.4 muestra un área con tratamiento de efluentes mediante zanjas de infiltración, dicha zona fue erosionada por el Río Klamath, localizado en el estado de California, EE.UU. En este caso, el campo de infiltración sufrió erosión cuando el río cambió su curso trayendo con ello serias consecuencias. Las tuberías de infiltración blancas que se aprecian en la imagen (ahora abandonadas) estaban descargando aguas residuales directamente en el río produciendo alta contaminación en el sector. Dichos problemas pueden evitarse adoptando con rigor las distancias mínimas requeridas y evaluando con exactitud las planicies aluviales sin restringirse únicamente al curso del lecho del río.



Figura 3.4. . Zanjas de infiltración instaladas demasiado cerca de un río.

Los proveedores de servicios pueden verificar la ubicación y la naturaleza de los aspectos clave del sitio usando la siguiente lista de control del plano del sitio:

Paso	S	N
El plano del sitio se elaboró usando una escala de ingeniería reconocida.		
Se ilustra la flecha indicando el norte.		
Se muestran todos los linderos o límites de la propiedad, están acotados y se mantienen las distancias mínimas recomendables.		
Se identifican los futuros desarrollos del lote.		
Se han diagramado pendientes y topografía con curvas de nivel.		
Se muestran las tuberías de agua de abastecimiento, pozos para agua potable o para agricultura y las acometidas a los sistemas de agua públicos.		
Se ilustra la ubicación de los sitios de servicios públicos básicos tanto localizados a nivel aéreo como enterrado y sus puntos de conexión.		
Se presenta la ubicación de los apiques, sondeos, perforaciones de prueba y demás ensayos sobre los suelos.		
Se proporciona el nombre y dirección del propietario y la designación del lote.		
Se han revisado de nuevo las características del sitio, los linderos de la propiedad y otros aspectos para verificar las dimensiones y los ángulos		
Se ha suministrado información acerca de los lotes aledaños y un mapa con indicaciones para llegar al sitio.		
Se ilustran las carreteras, calles, cuerpos de agua, edificaciones y otros elementos del sitio potencialmente importantes.		

3.2.2 Estimativa del área de terreno disponible para los componentes del SDMAR

Cuando se necesita trabajar sobre planos en medio físico y no en medio magnético sobre un archivo en CAD se puede recurrir al procedimiento que se explica a continuación. Analizar el plano del sitio debidamente dimensionado es el mejor método para identificar espacios disponibles en el lote donde pueden ser ubicados los componentes del SDMAR. El área disponible de tales espacios se puede estimar simplemente usando un escalímetro o con una regla y una calculadora. El terreno disponible debería estar relativamente a nivel o lo más horizontal posible, cumplir con todos los requisitos de distancias mínimas y estar ubicado en un área que no restrinja el desarrollo futuro del lote. Sin embargo, donde existan limitaciones de terreno, los proyectos pueden ser diseñados para usar varias áreas en el lote para el SDMAR. Los componentes de tratamiento como los tanques sépticos se localizan cerca de las edificaciones y los campos de reutilización o dispersión se ubican en lugares más alejados, conectados con sistemas de alcantarillado por gravedad o mediante sistemas a presión (donde sean necesarios). Por esta razón, se requiere la identificación de todos los potenciales lugares con características adecuadas.



Estimación del área de terreno disponible para el(los) posible(s) sitio(s) del SDMAR:

El plano del lugar es especialmente útil para este ejercicio. Una vez que todas las características y distancias mínimas estén registradas en el esquema, se puede apreciar el área de terreno disponible para el SDMAR. En algunos casos, el área disponible tendrá forma cuadrada o rectangular y el área disponible se calcula al multiplicar la longitud por el ancho respectivo; para formas más complejas e irregulares se puede dividir el área en diferentes formas geométricas tales como cuadrados, rectángulos y triángulos. Si el plano se encuentra representado a una escala apropiada, será sencillo calcular las áreas de cada forma y sumarlas para determinar la disponibilidad total de terreno.

3.2.3 Identificación de las características del sitio

Cuando se dibujado y revisado el plano del sitio, investigar los aspectos físicos naturales y antrópicos del lote, entre los que se encuentran los que se listan a continuación.

Los factores físicos incluyen:

- Propiedades de los horizontes del suelo tales como profundidad, estructura, textura, consistencia, permeabilidad y resistencia
- Restricciones asociadas a las aguas subterráneas y superficiales
- Disposición de las pendientes del terreno.

Los factores relativos a las actividades humanas incluyen:

- Uso de la tierra y zonificación del lote y áreas aledañas.
- Acceso a servicios básicos, eventuales conflictos asociados a ellos y cualquier componente de SDMAR que ya pudiera estar presente en el sitio.
- Preocupaciones sobre la accesibilidad del sitio.
- Requisitos normativos para vertimiento y otros asuntos normativos que pueden tener un impacto en el diseño o instalación del SDMAR.
- Metas deseadas para el uso final del efluente y los residuos tratados.

El punto final, consistente en analizar las opciones para reutilizar y recuperar residuos del tratamiento, no solo da información valiosa al proceso de toma de decisiones sobre la tecnología a usar, sino que también podría ayudar a reducir

los costos a largo plazo. El valor de los subproductos del tratamiento de aguas residuales puede no ser muy evidente en pequeñas cantidades; sin embargo, en caso de producir una cantidad significativa de subproductos, como los biosólidos, puede volver comercialmente factible su aprovechamiento posterior.

El equipo para procesamiento de residuos del tratamiento de aguas residuales (Fig. 3.5), tales como los lodos fecales, puede ser costoso. En áreas agrícolas, donde el uso de biosólidos tratados como mejoradores del suelo es deseable, el colectivo de propietarios del SDMAR puede unirse para adquirir y operar el equipo, utilizando los ingresos generados para financiar y operar dicho equipo como una alianza de negocios. Son pocas las aplicaciones exitosas de los programas de reutilización y reciclaje de aguas residuales financiadas por los ingresos que generan; pero, realizar un estudio de mercado antes de comprar el equipo puede ayudar a los desarrolladores a entender mejor los costos y las posibles oportunidades.



Figura 3.5. . Máquina secadora y peletizadora de lodos sanitarios del municipio metropolitano eThekwini en Sudáfrica.

3.3 PASO 3 - EVALUACIÓN DE LOS SUELOS

Conocer las características más relevantes de los suelos del lugar es vital para la adecuada planificación, diseño e instalación del SDMAR. Esta afirmación es aplicable para todos los tipos de SDMAR, y no únicamente para los sistemas que dependerán de los suelos para la dispersión de efluentes. Si los estratos de suelos son superficiales (someros) o profundos (altos espesores), si están saturados o se encuentran húmedos por temporada, alterados por excavaciones anteriores o inestables, influye mucho en la selección e instalación de la tecnología para manejar las aguas residuales. En esta sección se describen pasos necesarios

para determinar si el sitio es adecuado para instalar un SDMAR; obtener esta información antes de instalar los tanques sépticos y otros componentes del sistema evita costosos rediseños y medidas extremas para instalar sistemas en sitios con condiciones deseables.

Reportar los datos recolectados en una hoja de registro de exploración del suelo (como se ilustrará en el Apéndice del texto con un énfasis especial para identificar terrenos con aptitud para dispersión de las aguas residuales en el suelo) proporciona un método estructurado para el acceso e interpretación de los datos, lo cual ayudará al investigador a identificar las limitaciones que pudieran afectar el desarrollo del SDMAR. Las siguientes secciones presentan conceptos relativos a las excavaciones para evaluación del suelo, la pendiente y el paisaje; por su parte, el Apéndice contiene información adicional y un estudio de caso.

3.3.1 Actividades involucradas en la evaluación de suelos

A continuación, se presentan los pasos para llevar a cabo el proceso de evaluación de suelos desde el punto de vista geotécnico; se describirá cada uno de ellos en suficiente detalle para su ejecución, mayores informaciones podrán encontrarse en el Apéndice y las referencias bibliográficas correspondiente. Los pasos para la evaluación de suelos incluyen:

Ejecutar apiques, también conocidos como calicatas o zanjas (excavaciones superficiales, realizadas para examinar el perfil del subsuelo, identificar la profundidad del nivel freático y tomar muestras alteradas e inalteradas) o sondeos geotécnicos (perforaciones de pequeño diámetro, realizadas por rotación o por percusión, que permiten llegar a grandes profundidades y obtener muestras de suelo).

- Identificar los horizontes de los suelos.
- Evaluar la profundidad y el espesor de cada horizonte.
- Identificar las características de los suelos que forman cada horizonte analizando muestras de cada uno de dichos horizontes (en la Figura 3.6 se ilustra una muestra de material térreo), buscando determinar entre otras las siguientes propiedades del suelo:
 - Textura
 - Estructura
 - Consistencia
 - Color.
- Identificar la profundidad a la que se encuentren condiciones limitantes, tales como lechos de roca o zonas de saturación
- Considerar la pendiente y la posición del paisaje del lugar en estudio.
- Estimar la tasa de infiltración a largo plazo (TILP) del suelo o la cantidad de efluente que se puede aplicar a un área de tratamiento.



Figura 3.6. . Bloque de suelo tomado como muestra inalterada, el material contiene principalmente arcillas y limos y pequeñas porciones de materia orgánica, de la muestra se suelo se obtendrán informaciones para planificar el SDMAR.

3.3.2 Apiques y sondeos o perforaciones de suelo

El primer paso en el procedimiento de evaluación de suelos consiste en excavar agujeros para la exploración del suelo (apiques) o efectuar perforaciones de mayor tamaño en el terreno (sondeos). Esta actividad expone los horizontes del suelo y permite hacer pruebas de las diferentes capas (estratos) y la observación de la profundidad a la que se podrían encontrar factores limitantes tales como mantos de roca y zonas de saturación. Este proceso es necesario para todo tipo de SDMAR que pueda incluir la instalación de tanques, lagunas, zanjas o donde se planifican campos de infiltración en el suelo



Excavación del apique - proceso y consideraciones de seguridad:

- Tenga precaución cuando excave apiques para evitar que estos colapsen, especialmente si están situados en suelos arenosos o en áreas donde se espere la presencia de aguas subterráneas. Los trabajadores deben usar prendas de seguridad tales como casco rígido y zapatos apropiados y seguir las instrucciones de manejo del equipo de seguridad.
- Los apiques serán excavados a una profundidad mínima de 1,2 m para las áreas propuestas para zanjas de infiltración, o por lo menos 0,3 m por debajo de la profundidad propuesta de cualquier perforación para tanques, lagunas o fosas. Si se encuentra una capa de suelo impenetrable u otro tipo de condiciones limitantes (como las asociadas a humedad por presencia de nivel freático) antes de alcanzar esas profundidades, se

debe registrar cuidadosamente tales condiciones en el formato de registro del orificio de prueba antes de pasar a la ubicación del siguiente posible apique. Si se alcanzan las profundidades antes mencionadas sin encontrar una condición limitante, registre los resultados de la profundidad en el formulario y proceda al análisis de los horizontes del suelo.

- Para pequeños sistemas, excave un apique en la zona donde se localizaría un tanque séptico y dos apiques en el área de las posibles zanjas de infiltración, de pequeñas lagunas de estabilización o reservorio propuestos. Realice más excavaciones de prueba para los sistemas más grandes o en áreas donde se cree que las condiciones de los suelos subsuperficiales sean variables. Trate de excavar los agujeros de tal manera que permita que los rayos del sol lleguen a la pared lateral principal durante el período de observación para que las diferencias sutiles del color del suelo se puedan apreciar fácilmente.
- Cuando las excavaciones deban permanecer abiertas durante la noche, protéjalas con cercos o por lo menos márquelas con cinta de precaución u otras barreras para prevenir y mantener alejadas a las personas y animales.
- Haga una rampa en un extremo de cada apique que permita el ingreso para una evaluación de los estratos de suelo a corta distancia. Los trabajadores no deberían ingresar a un apique a una profundidad mayor de 1,5 metros por debajo del nivel del terreno, a menos que la excavación esté protegida por puntales (estabilización de la pared lateral del agujero instalando soportes de madera o acero) o esté excavado con pendientes adecuadas en sus paredes laterales. Los trabajos alrededor del borde del agujero se deberían efectuar de forma tal que se prevengan derrumbes, especialmente si los suelos son inestables o si contienen material granular como arena o grava suelta. Los objetos pesados no deberían descansar en la zona cercana a la abertura de la excavación.
- Llene los agujeros de prueba después de la última inspección para que no representen riesgos.

3.4 PASO 4 - IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS HORIZONTES DEL SUELO

Para explorar el suelo se suele recurrir a la excavación manual progresiva de material desde la superficie hacia las capas más profundas, para ello es común practicar perforaciones con una geometría controlada, como los apiques de sección cuadrada o rectangular, cuya delimitación superficial se aprecia en la Figura 3.7a, y cuya ejecución concluida se presenta en la Figura 3.7.b. En la Figura 3.7.c se aprecia una excavación mecanizada por medio del uso de una retrocargadora.



a)



b)



c)

Figura 3.7. Programación y ejecución de un apique para caracterizar un perfil de suelos. Delimitación superficial (a), apique concluido (b), excavación mecanizada (c).

Los suelos contienen partículas de diferentes tamaños que se combinan en capas del material (horizontes) con estructuras y texturas características (Figura 3.8). Esta condición influye en la capacidad de transmitir agua, cuantificada como la tasa de infiltración a largo plazo. Los horizontes se desarrollan con el tiempo a través de la acción del humedecido y secado, la penetración de raíces de plantas, el congelamiento y descongelamiento (en ciertas regiones con las cuatro estaciones y con inviernos extremadamente fríos) y por acción de los minerales.



Figura 3.8. Los horizontes del suelo con frecuencia son únicos en términos de color y textura y se pueden identificar fácilmente

La evaluación de suelos requiere identificar los horizontes presentes en el apique, permite clasificar las propiedades de los horizontes que influyen en la TILP y otros aspectos importantes para aplicar el SDMAR. La clasificación describe la profundidad y espesor, textura, estructura, consistencia y color de cada horizonte, características que se describen a continuación.

3.4.1 Profundidad y espesor del suelo

La determinación de la profundidad y el espesor de los horizontes del suelo es un proceso visual sencillo. Los horizontes de los suelos son aproximadamente paralelos a la superficie, con límites y diferencias obvias de color y textura que se aprecian al explorar el(los) apique(s). Raspar partículas sueltas con un destornillador, cuchillo o pala hace que estas diferencias sean aún más claras. Una vez que los horizontes se han identificado, su profundidad y espesor se miden con respecto a un punto o nivel de referencia fijo usando una cinta métrica estándar. Los valores se registran y los horizontes se usan para guiar los análisis que se comentarán después, que deben realizarse para cada estrato de suelo y diligenciarse por separado en un formulario de registro (ilustrado en el Apéndice) usado para describir formalmente el sitio, las características de los suelos del perfil estratigráfico y para estimar la tasa de infiltración a largo plazo.

3.4.2 Textura del suelo

Para conocer las características del suelo hay que obtener muestras representativas de cada estrato. Dependiendo de algunas propiedades particulares del tipo de suelo que conforma cada estrato es factible tomar dos tipos de muestra: Muestras alteradas, resultado del material que se desmorona al realizar la excavación en cada estrato, y que se pueden tomar del fondo del hueco como se observa en la Figura 3.9.a; Muestras inalteradas, que se pueden tallar desde la pared de la excavación obteniendo bloques de suelo, tal como se muestra a continuación en la Figura 3.9.b:

La textura se refiere a la naturaleza arenosa, limosa o arcillosa del suelo, lo cual influye principalmente en cuán rápido puede pasar el agua a través de este (su permeabilidad). Por lo tanto, la textura se basa en la composición de partículas de arena, limo y arcilla en una muestra dada. Hacer una evaluación correcta de la textura del suelo es vital, ya que esta característica determina la TILP de referencia que será ajustada por las otras características que se describirán más adelante.

Asociada a la textura se encuentra la granulometría del suelo, la cual se obtiene pasando muestras de los suelos a través de tamices o cribas con diferentes aberturas de malla estandarizadas que separan las partículas por tamaño en tres categorías principales: 0,05 a 2,0 mm, correspondientes a

arenas; 0,002 a 0,05 mm para los limos; y $< 0,002$ mm correspondiente a las arcillas. Realizar pruebas sobre varias muestras de suelos en el horizonte ayuda a determinar qué porcentaje de los horizontes corresponde a arena, limo o arcilla. Entonces, esos valores se usan para ubicar las líneas de la cuadrícula en el Triángulo de la Textura del Suelo –o Triángulo Textural– (Figura 3.10) para encontrar la textura de los horizontes.



Figura 3.9. Toma de muestras para análisis y caracterización de suelos. (a) Excavación y toma de muestras alteradas, (b) tallado y futura extracción de una muestra inalterada de suelo por medio de un bloque.

La textura se refiere a la naturaleza arenosa, limosa o arcillosa del suelo, lo cual influye principalmente en cuán rápido puede pasar el agua a través de este (su permeabilidad). Por lo tanto, la textura se basa en la composición de partículas de arena, limo y arcilla en una muestra dada. Hacer una evaluación correcta de la textura del suelo es vital, ya que esta característica determina la TILP de referencia que será ajustada por las otras características que se describirán más adelante.

Asociada a la textura se encuentra la granulometría del suelo, la cual se obtiene pasando muestras de los suelos a través de tamices o cribas con diferentes aberturas de malla estandarizadas que separan las partículas por tamaño en tres categorías principales: 0,05 a 2,0 mm, correspondientes a arenas; 0,002 a 0,05 mm para los limos; y $< 0,002$ mm correspondiente a las arcillas. Realizar pruebas sobre varias muestras de suelos en el horizonte ayuda a determinar qué porcentaje de los horizontes corresponde a arena, limo o arcilla. Entonces, esos valores se usan para ubicar las líneas de la cuadrícula en el Triángulo de la Textura del Suelo –o Triángulo Textural– (Figura 3.10) para encontrar la textura de los horizontes.

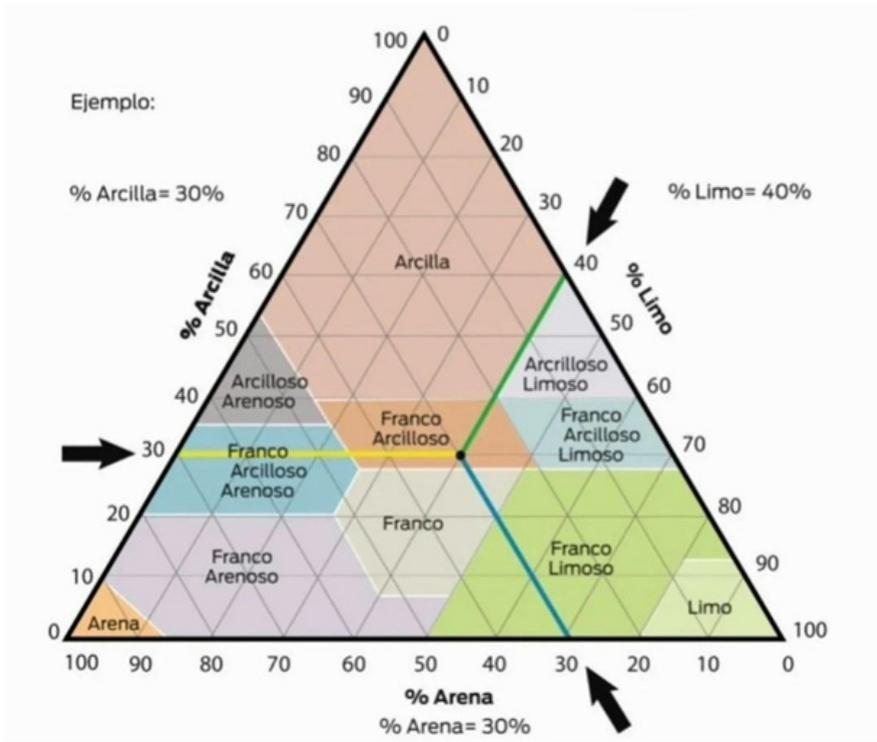


Figura 3.10. Triángulo Textural del Suelo

Un método alternativo para reconocer un tipo de suelo en particular, que no posea mezcla de diversos materiales, y que es muy fácil de aplicar pues no requiere el uso de tamices consiste en estudiar sensorialmente una muestra de suelo húmeda y juzgar su textura basándose en que:

- La arena se puede percibir como partículas de características angulares entre los dedos
- El limo al tacto se siente como talco o harina
- La arcilla es un polvo muy fino, que en estado húmedo permite formar cilindros largos y delgados entre los dedos.

Con la práctica, esta sencilla técnica puede rendir resultados bastante buenos. Un método sensorial más avanzado (Figura 3.11) que puede mejorar la exactitud implica humedecer el suelo, forzarlo para formar cilindros y evaluar su longitud y suavidad para determinar la textura de esa muestra de suelo. Con un poco de práctica se puede adquirir destreza en la rápida determinación de la textura del suelo en el campo. Los procesos de evaluación sensorial de suelos junto con otras sugerencias orientadoras se describen detalladamente en los recursos enumerados en las referencias al final de este capítulo y en el Apéndice.

En la Figura 3.11 se presenta un diagrama de flujo que indica los pasos a seguir para analizar la textura del suelo de manera sensorial.

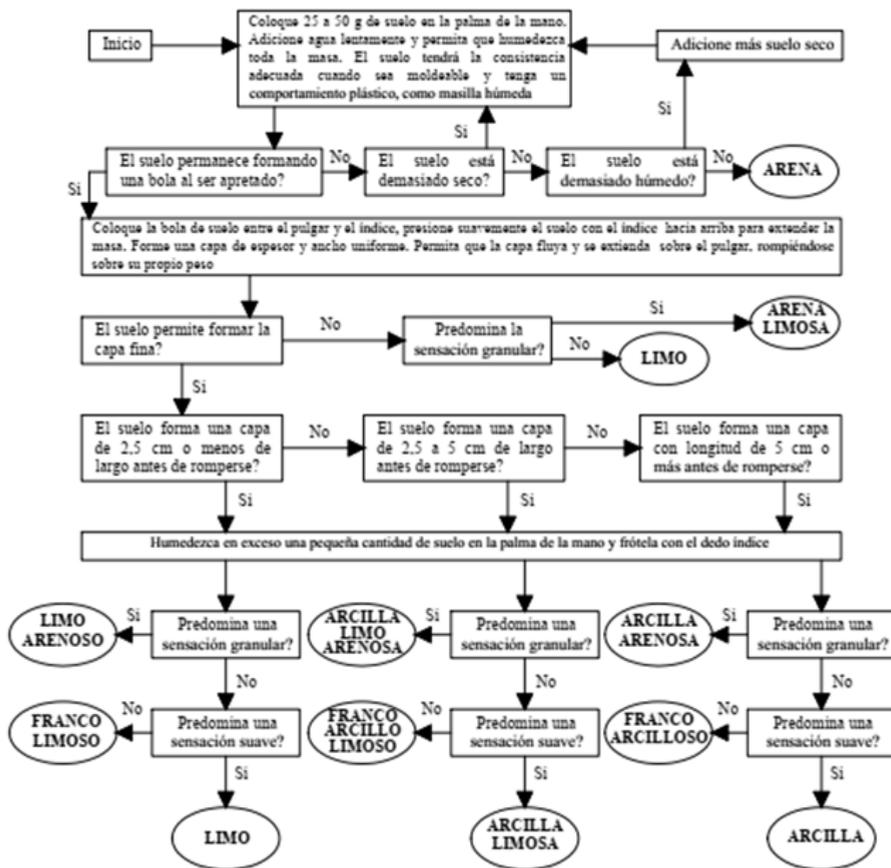


Figura 3.11. Procedimiento para analizar la textura del suelo de manera sensorial (Fuente: Comunicación personal: Lindbo, 2011).⁴

La relación entre los horizontes de los suelos, la presencia o ausencia de abruptos cambios de textura y la cantidad de compactación dentro del horizonte del suelo puede inclusive tener mayor influencia en la tasa de infiltración a largo plazo del suelo que la propia textura. Para el caso particular de sistemas de tratamiento mediante aplicación de aguas residuales en el suelo, conocer la textura no es suficiente para diseñar adecuadamente un sistema o predecir cómo funcionará en el tiempo; solo sirve para establecer un rango de TILP a usar para propósitos de diseño. Los otros aspectos de la

⁴ David Lindbo, profesor en North Carolina State University, Soil Science Department.

evaluación de suelos que se describen a continuación ayudarán a manejar mejor esta determinación y suministrarán conocimiento importante sobre características físico mecánicas de los suelos.

3.4.3 Evaluación de la estructura del suelo

Mientras que la textura del suelo describe el porcentaje de arena, limo y arcilla, la estructura del suelo describe cómo estas partículas están distribuidas en formaciones de material térreo más grandes, conocidas como agregados. El grado, tamaño y tipo de agregados del suelo, que se describen a continuación, afectan la forma cómo el agua se moverá a través de los suelos, lo que quiere decir que al igual que la textura, la estructura del suelo se relaciona directamente con qué tan bien los suelos dispersarán y tratarán las aguas residuales a largo plazo (y por lo tanto, los factores en el cálculo de la TILP). Los tres componentes de la estructura del suelo son:

1. el grado de homogeneidad, asociado al nivel de distribución aleatoria de más de un tipo de suelo en el estrato;
2. el tamaño del agregado, que oscila entre muy fino a muy grueso; y
3. el tipo de agregado según su forma (que se muestra en la Figura 3.12).

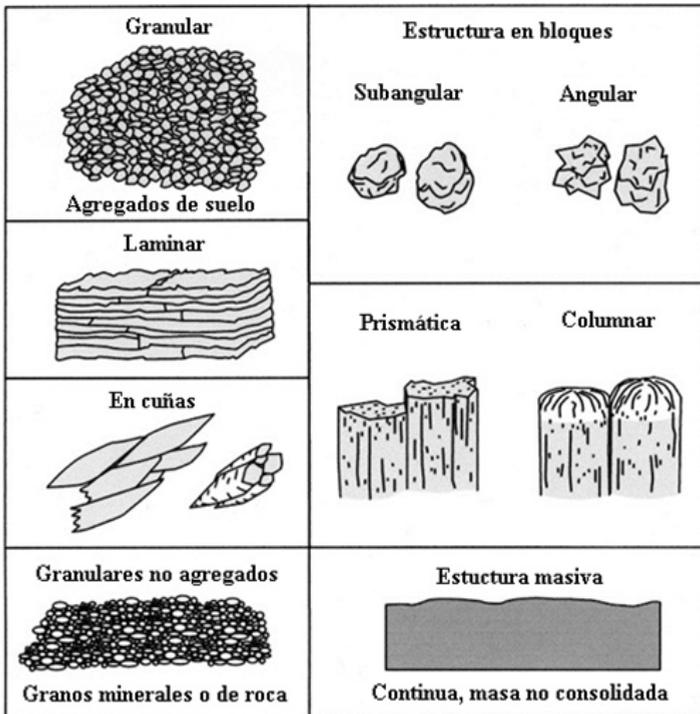


Figura 3.12. . . Tipos comunes de agregados de la estructura del suelo.
Fuente: (Adaptada de Lindbo, 2009, p. 58).



Las estructuras de los suelos toman años en formarse y pueden ser fácilmente alteradas o destruidas. Esto puede tener un impacto significativo en cuán bien los suelos funcionarán en un SDMAR con el tiempo. Por eso, los sistemas de disposición de efluentes basados en su aplicación en el suelo, instalados en sitios previamente alterados deben diseñarse considerando dicha situación. Las prácticas de construcción deficientes durante el proceso de instalación que pudieran destruir la estructura del suelo, tales como excavar durante temporadas excesivamente húmedas, deben evitarse. El Apéndice describe la estructura del suelo y los otros parámetros estudiados dentro de la metodología completa para clasificar suelos.

3.4.4 Consistencia del suelo

La consistencia del suelo describe cuán fácil es deformar o romper los agregados individuales del suelo. Mide la presencia de partículas de arcilla en el suelo que pueden contraerse o expandirse cuando se mojan y cuán probable puede ser modificar la estructura del suelo durante la construcción o instalación del SDMAR. Ambas condiciones pueden afectar negativamente el desempeño del sistema a largo plazo. Al igual que con las otras propiedades del suelo, el Apéndice contiene más información sobre la consistencia del suelo y cómo puede influenciar en el cálculo de la TILP.

3.4.5 Estudios formales de suelos y sus propiedades fisicomecánicas

Los ensayos comentados reportan características del suelo enfatizando su potencial aprovechamiento como disposición final del efluente para usarlo como opción de pulimento. Sin embargo, el conocimiento de la textura, la estructura y la consistencia del suelo no sustituyen la realización de estudios con el rigor técnico que suministren una clasificación ingenieril precisa y la determinación de las características fisicomecánicas del suelo, no solo con fines de eventual uso para vertimiento del agua residual, sino también para su uso como material de construcción o de soporte.

A continuación, se presenta un breve listado de ensayos que se pueden realizar en campo, o principalmente a nivel de laboratorio, junto con algunas imágenes alusivas que sirven de referencia para describir ensayos estandarizados para caracterizar el suelo y evaluar las características fisicomecánicas del material térreo. Las descripciones por extenso de dichos ensayos pueden ser encontradas en literatura tradicional sobre mecánica de suelos de fácil acceso en el contexto latinoamericano tales como: el texto de Joseph Bowles (1981) es el manual de ensayos de laboratorios de suelos con fines de ingeniería más utilizado en el mundo y se encuentra disponible en su versión en español; la serie de libros de los ingenieros Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (1990 a, b, c) hacen un recorrido desde los ensayos geotécnicos más

comunes hasta sus aplicaciones con diversos fines de ingeniería; finalmente, textos como los de Das (2014), Lambe y Whitman (1987) y Peck et al. (1988) presentan fundamentos sobre la importancia de parámetros asociados a la caracterización y las propiedades físicomecánicas de los suelos para sus aplicaciones en ingeniería.

3.4.5.1 Caracterización granulométrica de suelos

Para realizar la caracterización del tamaño de las partículas que conforman los suelos se recurre a los ensayos de granulometría. Para separar la fracción gruesa de la fina de los suelos se recurre al ensayo de granulometría por tamizado, que permite el paso de la muestra de suelo mediante tamices de dimensiones estandarizadas en las que se retendrá cierta fracción de suelo, como se aprecia en las Figuras 3.13a, donde se presenta el lavado previo, y 3.13b y 3.13c, donde se ilustra la serie de tamices y el material separado; dicho ensayo también suministra valiosas informaciones sobre la presencia de los diversos tamaños de partículas en los suelos gruesos para así clasificarlos como cantos rodados, gravas, gravillas, arenas gruesas, medias o finas y la combinación de los mismos. La denominación de los tamices obedece a dos criterios fundamentales, el primero de ellos a la abertura entre las mallas que puede reportarse en pulgadas (por ejemplo 4", 2 1/2", 1", 1/2", 1/4"), en milímetros o micrómetros (por ejemplo 90 mm, 50 mm, 37,5 mm, 4,75 mm, 1 mm, 425 μ m, 150 μ m, 75 μ m....); el segundo criterio se aplica a los tamices menores o iguales a 5,6 mm, en ese caso se le atribuye un número al tamiz y corresponde al número de orificios que caben en una pulgada lineal (por ejemplo en el tamiz No. 4, cuya abertura es de 4,75 mm, caben exactamente 4 orificios, lo cual quiere decir que en una pulgada cuadrada caben 16 orificios).

Como complemento a lo anterior, y para determinar el tamaño de las partículas finas se recurre al ensayo de granulometría por hidrómetro (Figura 3.13d), que se basa en la preparación de una suspensión del suelo fino en agua (Figura 3.13e) con la adición de un agente defloculante para evitar la aglomeración de partículas, generalmente hexametáfosfato de sodio. Con las informaciones obtenidas a partir de los ensayos antes mencionados se procede a la representación gráfica de la distribución de tamaños de las partículas del suelo para así obtener la denominada "curva granulométrica", la cual se registra en un formato como el que se presenta en la Figura 3.13e.

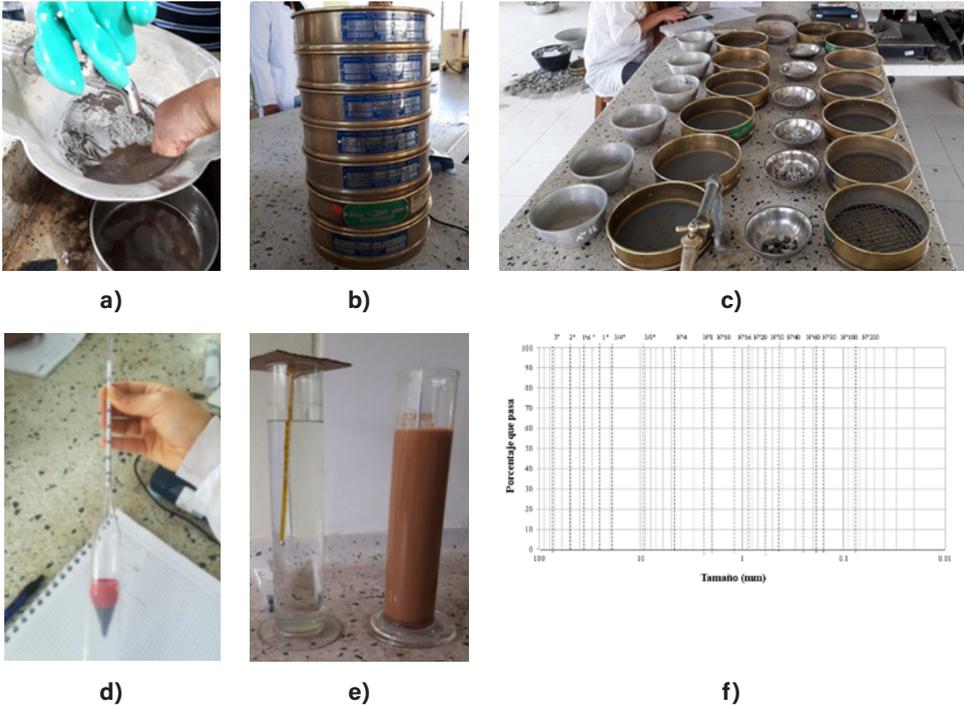


Figura 3.13. . . Imágenes sobre la caracterización granulométrica de suelos mediante granulometría por tamizados (a, b y c) y por medio del hidrómetro (d y e) y del formato para diligenciamiento de la curva granulométrica.

3.4.5.2 Clasificación de suelos finos - Límites de consistencia

Cuando se trata de un suelo fino; es decir un suelo limoso (pasante del tamiz No. 40) o un suelo arcilloso (que pasa por el tamiz con abertura de 0,075 mm -o tamiz No. 200-) se requiere de dos ensayos de laboratorio adicionales: límite líquido y límite plástico, denominados límites de consistencia o “límites de Atterberg”, que permitan la precisa clasificación del suelo fino. Para determinar el límite líquido se utiliza del orden de 100 gramos de pasante del tamiz No. 40 y se lo humedece progresivamente (Figura 3.14a) hasta formar una masa de humedad uniforme, se recurre al aparato denominado Cazuela de Casagrande (Figura 3.14b) donde se dispone una pequeña muestra de suelo a la que se le practica una ranura de dimensiones estandarizadas y se somete a caída libre, contabilizando el número de golpes necesarios, hasta que los dos lados de la ranura se vuelvan a juntar en una distancia del orden de 13 mm (Figura 3.14c) para posteriormente calcular la humedad respectiva del suelo para tal condición sometiéndola al secado y calculando su diferencia de masa en estado húmedo y seco. Para determinar el límite plástico se usan fracciones del suelo usado en el límite líquido, se moldean manualmente cilindros de 3 mm de diámetro y se determina la humedad desde la que empieza a desmoronarse los cilindros (Figura 3.14d). Con la diferencia entre

las humedades obtenidas para el límite líquido y el límite plástico se calcula el índice de plasticidad, y con dicho valor graficado en el eje de las ordenadas y el límite líquido en el de las abscisas se ingresa a la denominada gráfica de plasticidad del United States Soil Conservation Service –USCS- en la cual se obtiene la clasificación del suelo fino (Figura 3.14e).

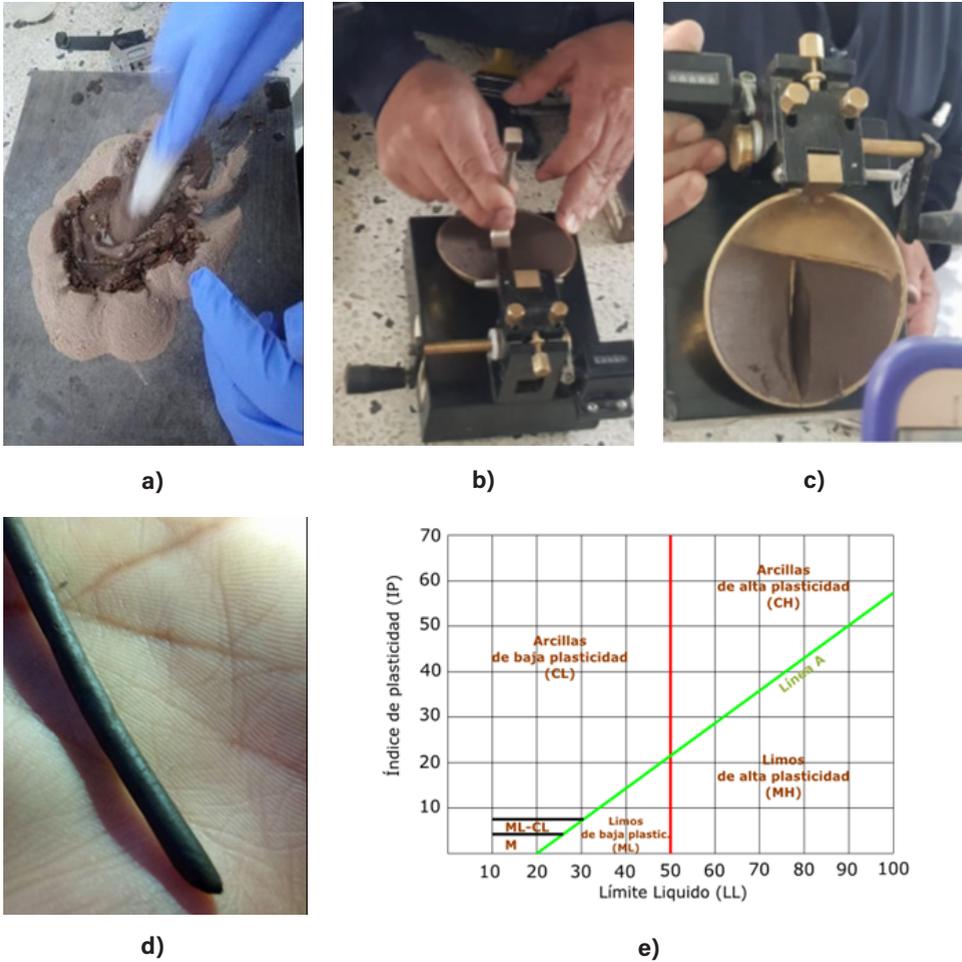


Figura 3.14. . . Imágenes sobre los límites de Atterberg para caracterización de suelos finos en términos del límite líquido (a, b y c), del límite plástico (d) y de la carta de plasticidad del USCS (e).

3.4.5.3 Medición de la permeabilidad de los suelos

Para conocer con precisión las características de permeabilidad de los suelos se puede realizar ensayos de campo como la permeabilidad “in situ”. Para tal fin se practican perforaciones de geometría conocida como la circular o la rectangular (Figura 3.15a) hasta la profundidad correspondiente al estrato a

evaluar; posteriormente se llena el orificio con agua hasta la parte superior del estrato estudiado y se repone líquido completando nuevamente la cantidad de agua hasta que se sature el suelo que lo rodea (Figura 3.15b), después del lograr la saturación del suelo se registra la disminución del nivel del líquido cada ciertos periodos de tiempo (Figura 3.15c), que inician con intervalos de pocos minutos y pueden culminar hasta el día siguiente.

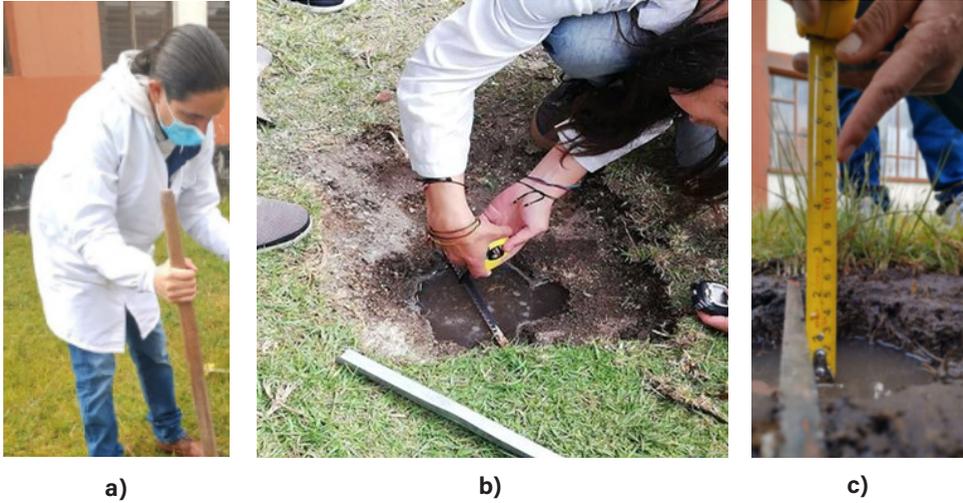


Figura 3.15. . . Fotografías sobre la realización del ensayo de permeabilidad de suelos *in situ*.

Otro mecanismo para conocer con precisión las características de permeabilidad de los suelos consiste en la ejecución de ensayos de laboratorio en condiciones de carga hidráulica constante o decreciente. Para ello se obtienen muestras de suelo alteradas y se insertan en un dispositivo de ensayo de forma cilíndrica (Figura 3.16a). Sobre la muestra se permite el paso del agua, cuya velocidad de flujo dependerá de la granulometría de suelo; cuando más grueso sea el suelo (Figura 3.16b) mayor será el flujo por unidad de tiempo, y cuanto más pequeño sea el tamaño de las partículas del suelo (Figura 3.16c), más lento será el flujo.

Desde los ensayos de permeabilidad se puede conocer la velocidad de flujo del agua a través del medio poroso, generalmente expresada en términos de m/día, cm/hora o mm/hora y su valor es fundamental para tomar decisiones en cuanto a la capacidad del suelo para recibir efluentes tratados y servir como unidad de pulimento o como mecanismo de recarga de acuíferos, si no hay riesgos de contaminación microbiana de aguas subterráneas para consumo humano.

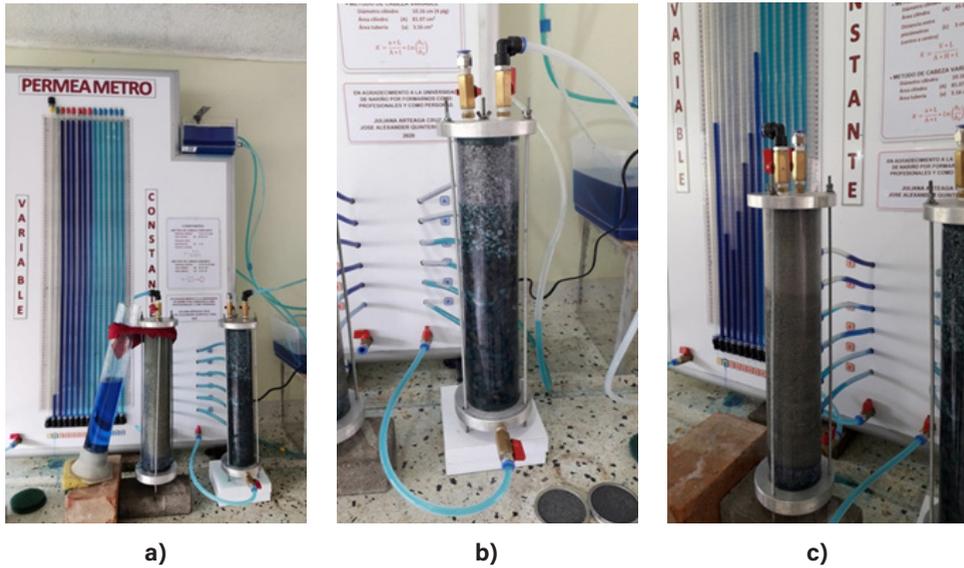


Figura 3.16. . . Fotografías sobre la realización del ensayo de permeabilidad sobre muestras de suelo a nivel de laboratorio.

3.4.5.4 Ensayo normal de compactación de suelos

Además de la relevancia de la clasificación del suelo y el conocimiento de sus características de permeabilidad es altamente importante conocer algunas propiedades físicomecánicas asociadas a la resistencia del suelo como su capacidad para soportar estructuras o de funcionar como material de construcción; por ejemplo, para lagunas de estabilización o como material de base para humedales construidos. Para determinar la mayor densidad que se puede lograr en un suelo, asociada a una cantidad de humedad óptima se aplica un ensayo conocido como “Relaciones de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos”, también conocido como Ensayo Normal de Compactación o Ensayo Proctor. El ensayo consiste en la progresiva adición controlada de humedad a un suelo (Figura 3.17a), que se homogeniza hasta obtener humedad uniforme; luego se compacta el suelo mediante capas de igual espesor en un molde de dimensiones estandarizadas con un martillo con tamaño, masa y altura de caída conocidas y definidas por las normas de ensayo respectivas (Figura 3.17b); finalmente, al conocer el volumen del molde y la masa del suelo se determina la densidad del material compactado (Figura 3.17c). Con los datos de al menos tres ensayos con humedades y densidades diferentes se pretende determinar el valor de humedad óptima para que con ella se logre reproducir tales condiciones en el lugar de la construcción.

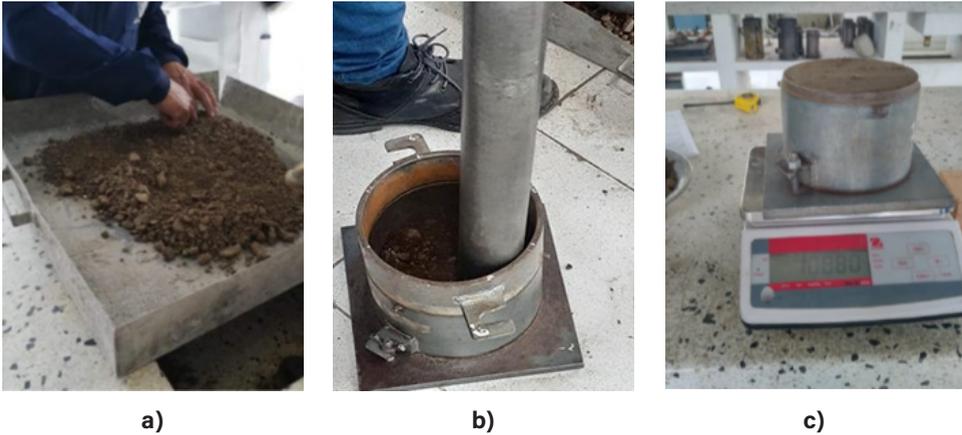


Figura 3.17. . Fotografías sobre la realización del ensayo Relaciones de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos.

3.4.5.5 Ensayo para control de la densidad de un suelo en campo

Una vez conocida la humedad óptima que garantiza la mayor densidad que se puede lograr en el suelo, es fundamental verificar tales condiciones sobre el terreno, para ello se recurre al ensayo “Densidad o Masa Unitaria del Suelo en el Terreno, Método del Cono de Arena”. El ensayo se realiza sobre una capa de material previamente compactado bajo condiciones de humedad controlada sobre el cual se practica una perforación de dimensiones controladas por una base metálica con una perforación circular (Figura 3.18a); una vez extraído el material se somete a su pesado y se determina la humedad del suelo. Sobre el orificio de la placa metálica se dispone un embudo (al que se le conoce su volumen), que sirve de base para un recipiente que contiene una arena de densidad conocida (Figura 3.18b); una vez se llena con arena el orificio practicado, así como el cono de dimensiones estandarizadas se determina el volumen exclusivamente ocupado por la arena en la perforación (Figura 3.18c). Con los datos del volumen ocupado y la masa del material extraído se calcula la densidad del suelo en el terreno y se compara con la densidad diagnosticada a partir de la humedad óptima para así decidir si se acepta o no la obra.

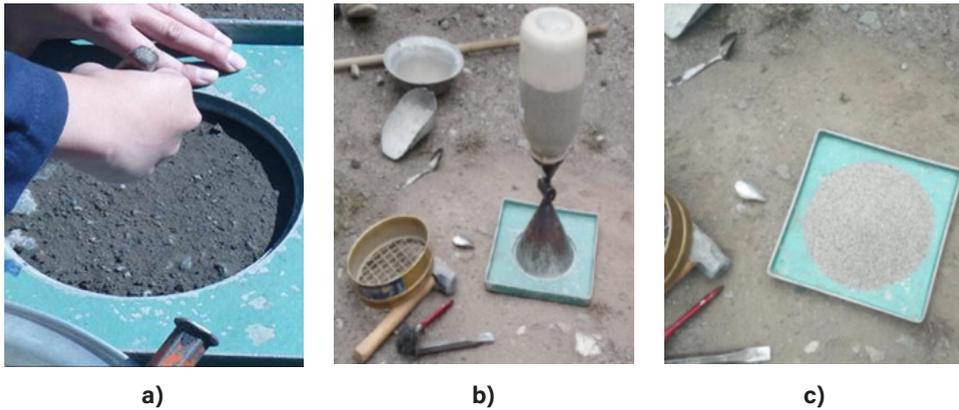


Figura 3.18. Fotografías sobre la realización del ensayo Densidad o Masa Unitaria del Suelo en el Terreno por el método del Cono de Arena.

3.5 PASO 5 - IDENTIFICACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO OSCILANTE Y OTRAS CONDICIONES LIMITANTES

Para proteger la salud pública y garantizar la operación a largo plazo de los sistemas de dispersión en el suelo, está prohibido el vertimiento de aguas residuales en suelos saturados. Si el nivel o manto freático (o manto de aguas freáticas) llega al fondo de una zanja de infiltración, se puede formar una zona de colmatación más rápidamente, conduciendo a una falla temprana o prematura del sistema y a una posible conexión directa entre sistemas de dispersión en el suelo y acuíferos utilizados con fines de abastecimiento de agua potable.

Por lo tanto, es necesario entender los tres estados de saturación del suelo, los cuales son:

- Insaturados: suelos con espacios de poros entre las partículas de suelo que están llenos de aire o de agua, pero cuya presencia es muy transitoria
- Saturados: suelos con espacios de poros entre partículas de suelo que siempre están llenos de agua. La elevación de la parte superior de la zona saturada se conoce como manto freático, y su localización determina el nivel freático
- Saturado estacionalmente: suelos que se inundan estacionalmente, usualmente durante las temporadas lluviosas cuando la elevación del nivel freático aumenta, o durante cualquier período de tiempo de más de siete días.

Con frecuencia, la posición o elevación del nivel más alto del suelo saturado cambia durante el año. Desde una perspectiva de evaluación del sitio, la meta

es identificar la profundidad a la que se encuentra el mayor nivel freático (en inglés: seasonal high water table). Hay dos buenas formas de identificar la profundidad de mayor nivel freático; el método más común es observar las manchas, que son las áreas de decoloración roja y gris del suelo por la reducción y oxidación de los óxidos de hierro en suelos saturados y anaerobios (Figura 3.19). En general, encontrar la profundidad a la que se encuentra el mayor nivel freático puede hacerse a un nivel básico evaluando las profundidades de los horizontes para detectar manchas; o de manera rigurosa a través del uso de un procedimiento de análisis del color por medio de la Carta de Munsell.⁵



Figura 3.19. . Vetas en el suelo como una indicación de saturación del suelo.
Fuente: (Comunicación personal: Lindbo, 2013).

El segundo método es el monitoreo de los niveles de agua en pozos perforados en el área. Sin embargo, con los pozos encamisados, el agua poco profunda a menudo se sella para promover el retiro del agua profunda; en tales situaciones, considere instalar pozos de monitoreo de aguas subterráneas poco profundas (Figura 3.20). La profundidad del agua puede obtenerse usando una sonda (tal como se muestra en la figura en mención) o con una cinta de medir y una

⁵ La carta de color de suelos de Munsell en línea ayuda con el reconocimiento detallado de manchas del suelo y se recomienda para proyectos de sistemas de dispersión basados en la disposición de los efluentes en el suelo. Para conocer más acerca del análisis del color del suelo se recomienda visitar el sitio web del Sistema Munsell en el enlace: <http://soils.usda.gov/education/resources/lessons/color/>; aspectos relativos a su uso pueden encontrarse en el link: <http://www.floridahealth.gov/environmental-health/onsite-sewage/training/documents/1-soil-colors.pdf>, y para observar la carta de colores se puede recurrir al link: <http://www.agronomiaufs.com.br/index.php/download-e-videos/category/75-downloads?download=69%3Acartasolosdemunsell>

lámpara. Nótese que el monitoreo de la elevación del manto freático debe ocurrir durante las épocas del año cuando se esperan los niveles más altos de aguas subterráneas.



Figura 3.20. . Pozo de monitoreo de aguas subterráneas poco profundas.

3.5.1 Profundidad de las condiciones limitantes

Las condiciones limitantes son características del suelo que hacen que un sitio sea inadecuado para la dispersión de las aguas residuales, ya sea con base en la textura del suelo, su estructura, la condición del lecho de roca (totalmente impermeable) o la saturación. Las condiciones limitantes se identifican simplemente por medio de la observación de las aguas subterráneas, las capas impermeables que pueden asociarse con arcilla densa, o la presencia del lecho de roca. Si tales características no son obvias, entonces la condición limitante se puede elegir el horizonte con el porcentaje más alto de arcilla. En cualquier caso, conocer la profundidad de la condición limitante menos profunda, la cual deberá estar separada del fondo del sistema de infiltración por lo menos a una distancia de $0,3$ m del suelo utilizable para garantizar un tratamiento adecuado, ayudará a determinar la máxima profundidad potencial de los sistemas de dispersión basados en el suelo. El Capítulo 4 así como el Apéndice contienen una descripción completa de cómo se puede estimar esa profundidad y cómo se encuadra en el procedimiento de cálculo del tamaño (dimensionamiento) del sistema de dispersión en el suelo.

3.6 PASO 6 - EVALUACIÓN DE LA PENDIENTE Y LA TOPOGRAFÍA

Al trasladar el análisis a la superficie del suelo, el enfoque cambia ahora hacia la pendiente y la topografía. La pendiente define la inclinación entre dos puntos

y la topografía refleja la forma de la superficie y las características de un área, las cuales forman la base del cálculo de las pendientes, así como la posición general del paisaje. Ambas son de alta importancia para evaluar posibles sitios para el SDMAR.

3.6.1 Evaluación de la pendiente y su impacto en el SDMAR

La pendiente se puede expresar de dos formas diferentes: como una inclinación porcentual o como un ángulo con relación a la horizontal. Los pasos iniciales para calcular la pendiente son los mismos para cualquiera de las formas. El cálculo básico de la pendiente se muestra en la Figura 3.21, su cálculo se refiere al cociente entre la distancia vertical dividida entre la distancia horizontal multiplicado por 100 para obtener un porcentaje.

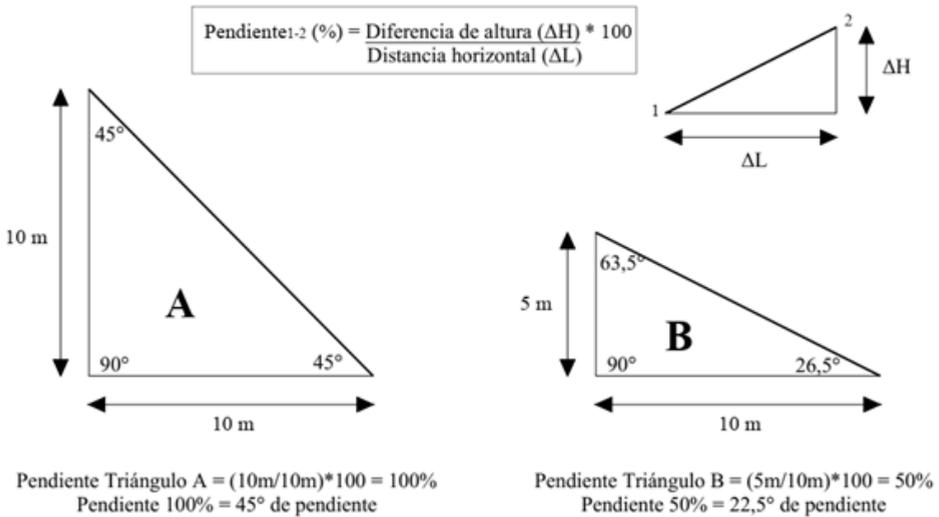


Figura 3.21. . Ejemplos de cálculo de la pendiente.

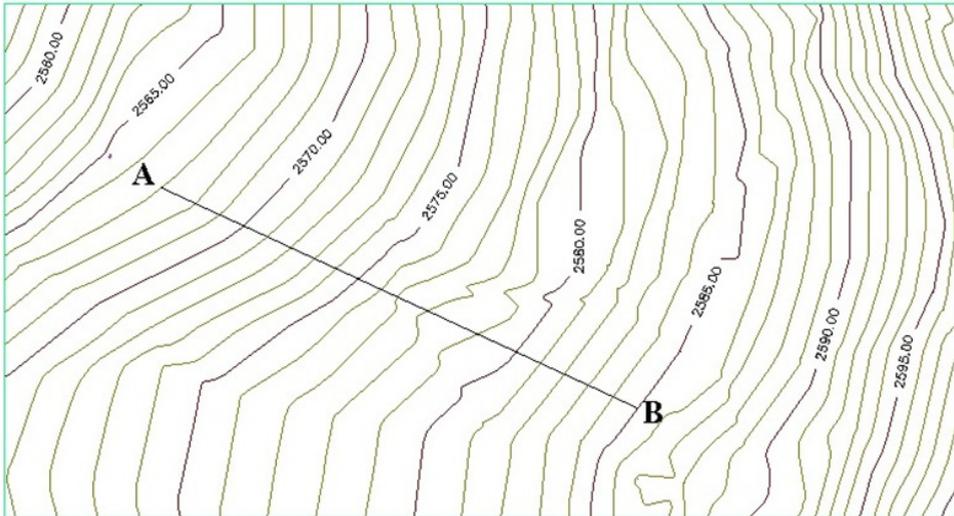
La pendiente del terreno está fuertemente vinculada a la tecnología y el costo de instalación del SDMAR. El sistema descentralizado para el manejo de las aguas residuales se instalará exitosamente en pendientes hasta del 60 por ciento, aunque la cantidad de relleno necesaria y los problemas de excavación pueden hacer más atractivo encontrar sitios con pendiente inferior (menor al 30 %). La pendiente también tiene un impacto en el diseño de los sistemas de dispersión en el suelo, tal como se mostrará en cálculos posteriores y en el Anexo al libro.

3.6.2 Relación de la topografía con la pendiente

La pendiente se puede calcular fácilmente usando un plano topográfico con detalles de altimetría (Figura 3.22). Dicha actividad se lleva a cabo con mucha frecuencia al considerar posibles rutas para las tuberías del alcantarillado: una vez se haya trazado el posible recorrido de la tubería en el plano topográfico, se mide la longitud de esta (proyección horizontal) y se determina la diferencia de niveles entre dos extremos de la tubería restando la elevación (cota) de la curva de nivel más baja utilizada en el diseño de la cota al valor de la curva de nivel más alta prevista para el diseño. La pendiente será la relación que existe entre la diferencia de niveles y la distancia horizontal que separa dos puntos del alcantarillado; es decir: $\text{Pendiente} = \text{Diferencia de alturas} / \text{Distancia horizontal}$; donde sus unidades serán m/m.

Para calcular una pendiente porcentual basándose en los datos de un plano topográfico, simplemente se debe dividir el cambio de elevación en metros entre la distancia horizontal de la línea dibujada y multiplicarla por 100 , tal como se indicó anteriormente. Por ejemplo, si el valor calculado es 20 , entonces, por cada 100 metros cubiertos en dirección horizontal habrá una ganancia (o pérdida) de 20 metros de elevación. A continuación, en la Figura 3.22 se ilustra un ejemplo a partir de la topografía de un sector del barrio “Centenario” en San Juan de Pasto.

Para calcular el ángulo de la pendiente divida el cambio de elevación en metros entre la distancia horizontal de la línea trazada, cuyo valor representa la tangente para el ángulo de la pendiente. Aplique la función de arco tangente a dicho valor para obtener el ángulo de inclinación correspondiente a la pendiente en estudio, lo cual se logra pulsando el botón de “inv” y luego el botón de “tan” en la mayoría de calculadoras científicas. Esto proporcionará el ángulo de la pendiente calculada entre la parte más baja del trayecto considerado, cuya posición representaría un plano horizontal, y la parte más alta del trayecto analizado. Si no hay un plano con informaciones altimétricas mediante curvas de nivel, se pueden obtener esos datos en campo con equipos de nivelación topográfica.



Determinación de la pendiente del alineamiento AB con base en las informaciones del plano topográfico

Distancia horizontal entre los puntos A y B que definen el alineamiento: 236 metros

Diferencia de cotas entre los puntos A y B (obtenidos de las curvas de nivel): $2585 - 2567 = 18$ m

$$\text{Pendiente}(\%) = \frac{\text{Diferencia de cotas}}{\text{Distancia horizontal}} * 100 = \frac{18 \text{ m}}{236 \text{ m}} * 100 = 7,6 \%$$

Figura 3.22. . . Uso de un plano topográfico para determinar la pendiente de un alineamiento de terreno.

Para calcular el ángulo de la pendiente divide el cambio de elevación en metros entre la distancia horizontal de la línea trazada, cuyo valor representa la tangente para el ángulo de la pendiente. Aplique la función de arco tangente a dicho valor para obtener el ángulo de inclinación correspondiente a la pendiente en estudio, lo cual se logra pulsando el botón de “inv” y luego el botón de “tan” en la mayoría de calculadoras científicas. Esto proporcionará el ángulo de la pendiente calculada entre la parte más baja del trayecto considerado, cuya posición representaría un plano horizontal, y la parte más alta del trayecto analizado. Si no hay un plano con informaciones altimétricas mediante curvas de nivel, se pueden obtener esos datos en campo con equipos de nivelación topográfica.



Determinación de la topografía en el campo:

Para verificar elevaciones en el campo se puede usar un simple nivel de construcción o inclusive un nivel de manguera transparente llena con agua para hacer evaluaciones de pendientes y estimaciones topográficas muy precisas para distancias cortas. Una estrategia para determinar la topografía de un lote consiste en trazar una cuadrícula colocando estacas a intervalos (puntos) iguales en el sitio. Cuanto mayor el número de estacas-puntos, mayor será la exactitud de la determinación topográfica. Una vez se coloquen las estacas se debe medir el cambio de elevación usando un nivel de construcción desde un punto de elevación fijo. Trace estas elevaciones en el plano del lote y una los puntos con iguales cotas para indicar las curvas de nivel.

Para proyectos más complejos se recomienda contratar a un topógrafo quien usará métodos más precisos y rápidos para desarrollar planos topográficos con alto nivel de detalles e identificar los linderos de la propiedad. Esto es útil porque a menudo no hay información topográfica disponible para el lugar a estudiar y para efectos de realizar los diseños y presupuestos será necesario disponer de planos topográficos detallados y que se encontrarán disponibles tanto en medio físico como en medio magnético para apoyar los procesos de diseño.

3.6.3 Posición del paisaje y descripción de la pendiente

Además de permitir la determinación de las pendientes entre puntos del terreno, la topografía representa la forma y posición del paisaje de un sitio y sus accidentes y elementos naturales o de origen antrópico, lo cual contribuye a la adecuada determinación de la conveniencia del sitio para un SDMAR. El concepto más notable en la posición del paisaje (esquema de la Figura 3.23) es que el agua se acumulará, incrementando la humedad del suelo, dentro de áreas con características cóncavas (forma ahuecada) o planas. Las condiciones de suelos con alta humedad implican mayor facilidad para el potencial paso de patógenos a través del suelo hacia las aguas subterráneas; de igual manera, un drenaje deficiente puede conducir a la acumulación de aguas lluvias o aguas residuales en el sitio del SDMAR y producir daños al sistema. Por ello, las zonas en la base de pendientes y cercanas a corrientes de agua (frecuentemente clasificadas como planicies aluviales), y las más cóncavas, generalmente se consideran inadecuadas para los SDMAR. Los estratos de suelos suelen ser poco profundos en las partes altas (cimas) del terreno, lo que hace que las áreas altas también sean inapropiadas para un SDMAR que contempla la aplicación del efluente tratado en el suelo.

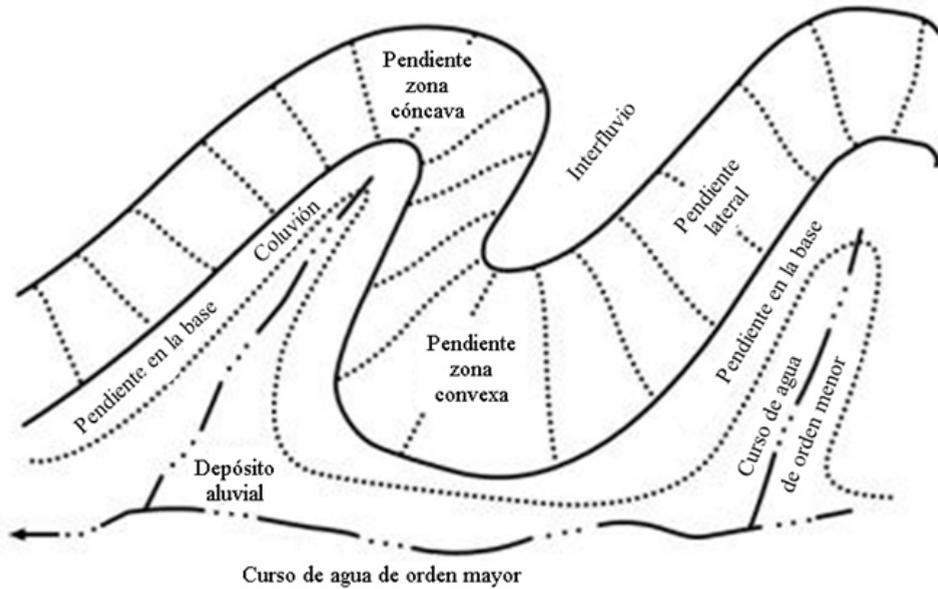


Figura 3.23. . . Esquema de la posición del paisaje y características de la pendiente (Adaptado de Lindbo et al., 2008, p. 17).

El concepto asociado a la configuración de la pendiente, que define a un sitio por su naturaleza cóncava, convexa y lineal, y en dirección descendente y horizontal, influye en el cálculo de la TILP del sitio analizado para la disposición del efluente en el suelo. La metodología para clasificar la descripción de la pendiente, así como la posición del paisaje está mejor descrita en el Apéndice, donde también se muestra cómo se pueden usar los dos parámetros dentro de los cálculos de la TILP.

3.6.4 Determinación de la tasa de infiltración del efluente y otros aspectos asociados al suelo

El cálculo de la TILP es función de la textura, estructura y consistencia del suelo, la pendiente y la posición del paisaje, así como de la vegetación (que puede incrementar la permeabilidad) y otros factores. Se recomienda consultar el Apéndice del libro para tener una descripción completa de este tema y una revisión más profunda de los procedimientos de evaluación de suelos; en dicha sección se explican las formas de calcular la tasa de infiltración y se presenta un ejemplo numérico.

Entre los aspectos complementarios relativos a los suelos, es fundamental considerar el efecto de las fuerzas de flotabilidad (fuerzas boyantes) sobre las estructuras cuando se presente saturación del suelo en un sitio dado. La flotabilidad, en lo relativo al SDMAR, es la presión ascendente ejercida por las

aguas subterráneas que se oponen al peso de un tanque u otras estructuras. Las fuerzas de flotabilidad son significativas y pueden levantar del suelo a estructuras enterradas o semienterradas, como los tanques sépticos, se presenta cuando no se encuentran instaladas adecuadamente (Figura 3.24). En términos prácticos, la fuerza de flotabilidad es igual al peso del agua desplazada por la sección sumergida del tanque o estructura en consideración. Los diseñadores deben asegurarse de que habrá suficiente peso (el peso del tanque y la capa de material térreo por encima del tanque o la sustitución de concreto por la cubierta de suelo) para compensar las fuerzas de flotabilidad del tanque cuando este se encuentre vacío; como complemento a ello, de ser necesario se debe recurrir a cimentaciones por medio de pilotes, para que sirvan de anclaje al terreno.



Figura 3.24. Colapso de un tanque séptico debido a las fuerzas de flotabilidad. Fuente: (Comunicación personal: Lindbo, 2011).



Consideraciones de diseño contra las fuerzas de flotabilidad para tanques sépticos:

Los tanques sépticos casi siempre están llenos de agua, de tal forma que las eventuales fuerzas de flotabilidad quedan parcial o totalmente eliminadas o contrarrestadas. Sin embargo, cuando se efectúa remoción del lodo de los tanques, estos tenderán a flotar si el nivel freático se encuentra en una posición elevada, cercano a la superficie del suelo. Por tal razón, los proveedores de servicios deben considerar las fuerzas de flotabilidad cuando diseñen SDMAR en suelos saturados. Cada litro de aire en el tanque tratará de elevar el tanque con una fuerza equivalente a la fuerza descendente de un objeto estático de 1 kg; de esta manera, un tanque vacío con un volumen sumergido de 5.000 L en

una zona con nivel freático elevado deberá pesar por lo menos 5.000 kg o estar debidamente anclado; pues de lo contrario, podría flotar y con ello estropear las instalaciones sanitarias y el propio sistema de tratamiento.

Una solución es fijar el tanque séptico a una cimentación construida en concreto. Adicionalmente, el peso (masa) del suelo por encima del tanque y el peso propio del tanque también deben ser considerados al contrarrestar las fuerzas de flotabilidad.

3.7 PASO 7 - DETERMINACIÓN DE EVENTUALES CONDICIONES LIMITANTES POR AGUAS SUPERFICIALES

En países en desarrollo como Madagascar, Bangladesh e Indonesia, grandes poblaciones de personas de bajos ingresos o desplazadas suelen vivir en áreas urbanas propensas a inundaciones donde aparentemente hay espacio disponible. Esto pone a las personas en riesgo ante los peligros de inundaciones, además contamina las aguas superficiales ya que los sistemas de saneamiento inundados liberan aguas residuales domésticas crudas o tratadas. Por ello, analizar las aguas superficiales y cómo podrían afectar un terreno escogido para un SDMAR es importante para la evaluación del sitio y para seleccionar las tecnologías apropiadas. A continuación, se presentan definiciones útiles para esta discusión:

Planicie aluvial: terreno llano a la orilla de un río que se extiende desde las riberas del canal del río hasta la base de las paredes del valle, que experimenta inundaciones durante eventos de altas precipitaciones.

Aliviadero de crecidas: es el canal del río o curso de aguas que transporta y evacúa caudales de inundación.

Franja inundable: terreno que puede quedar cubierto por una inundación durante eventos de tormentas o períodos de alta descarga, pero que no experimenta fuertes corrientes.

Nivel de inundación: elevación vertical que alcanzan los niveles de agua durante las crecientes de un río. Con frecuencia se designan como niveles de inundación para tiempos de 10, 50, 100 o 1000 años, el período representa la elevación más alta probable que se espera sea igualada o excedida durante dicho tiempo (conocido técnicamente como período de retorno).

Los componentes del SDMAR nunca deberían ser ubicados en una zona de aliviadero de crecidas y únicamente podrían localizarse en una planicie de inundación si se ponen en práctica controles tales como:

- Sistemas de escolleras de defensa adecuadamente diseñados (estabilización de taludes en las riberas) que protejan los componentes del sistema de los caudales de inundación.
- Protección total contra inundación con cubiertas herméticas y puertas de acceso.

Componentes localizados por encima del nivel de inundación para un periodo de retorno de 100 años e instalados en cajas eléctricas a prueba de agua.

Los componentes del SDMAR pueden instalarse en una zona inundable si se instalan controles parciales. Por lo general, son puertas y tapas de acceso al tanque herméticas; si el SDMAR tiene algún equipo electrónico, deberá instalarse sobre el nivel de inundación esperable para un periodo de retorno mayor o igual a 100 años.

Se puede obtener información acerca de inundaciones usando mapas de planicies aluviales, información publicada por instituciones gubernamentales o mediante información anecdótica suministrada por personas de la comunidad en el sector del proyecto. Lamentablemente en muchos países en desarrollo, hay pocos o ausencia total de mapas sobre planicies aluviales. Por la falta de datos publicados, se hace necesario consultar a los pobladores vecinos o historiadores, que conocen de primera mano los niveles de inundación basados en anteriores eventos de crecientes.

3.8 PASO 8 - DETERMINACIÓN DE CÓMO EL USO DEL SUELO EN TERRENOS ALEDAÑOS AFECTA LA SELECCIÓN DEL SDMAR

Las actividades del uso del suelo en los terrenos vecinos, que suelen aparecer en los mapas de planes de ordenamiento territorial (Figura 3.25), pueden afectar las tecnologías de tratamiento de aguas residuales apropiadas para un proyecto. En el caso de la ciudad en la figura, las áreas de color verde oscuro (que son tierras agrícolas) permitirían la instalación de SDMAR tales como lagunas de estabilización, que probablemente serían diferentes a aquellos SDMAR permitidos en las áreas cercanas de color rojo (zonas de nueva urbanización). En general, es importante tener conocimientos acerca de los patrones del uso de la tierra en las zonas aledañas al sistema por las siguientes razones:

En el futuro las urbanizaciones vecinas podrían conectarse con el SDMAR, lo que proporcionaría ingresos adicionales provenientes del cobro por el servicio. Saber esto con anticipación puede ayudar a planificar futuras expansiones

El uso de la tierra y aspectos relacionados con el agua de las zonas aledañas pueden ejercer un impacto en la toma de decisiones de tecnologías para el

propiedades de los lotes vecinos requieren suficientes distancias límite del SDMAR al igual que los del sitio del estudio. Además, si hay un centro de población contiguo al local del SDMAR, las tecnologías que generan olores tales como las lagunas de estabilización, deben evitarse o deberán manejarse con medidas de control de ese tipo de molestias. Para considerar tales medidas se recomienda usar la Tabla 3.2 como guía



Figura 3.25. Mapa de planificación del uso del suelo para el municipio de Pingxiang, China

Tabla 3.2. Medidas de control de olores y ruido recomendadas y ejemplos basados en la distancia a los límites de la propiedad

Distancia desde el SDMAR hasta el límite de la propiedad	Medidas de control de molestias	Razón(es)	Ejemplos de mecanismos de control
50 m o menos	Control total de olores, ruidos e insectos.	A esta distancia, los olores y ruidos de los sistemas de aguas residuales pueden dar lugar a quejas.	Cubiertas herméticas para captura de gases de reactores anaerobios; sellos herméticos para evitar el escape de gases en los pozos de inspección y tapas de acceso; aislamiento adecuado en equipos mecanizados. El cierre total es una opción.
50 a 100 m	Control parcial de olores y control de insectos.	Los olores pueden viajar largas distancias por la superficie del terreno si los vientos son propicios.	Cubiertas para captura de gases en reactores anaerobios y lagunas de estabilización; sellos herméticos para evitar el escape de gases en todos los pozos de inspección y tapas de acceso. Buenas prácticas de limpieza y mantenimiento; medidas de control de zancudos.

100 m y más	Control de insectos.	Las moscas y zancudos tienen grandes rangos de desplazamiento; por ello, debe practicarse el control de insectos.	Cubiertas herméticas para ca Cubiertas para captura de gases en reactores anaerobios y lagunas de estabilización; sellos herméticos para evitar el escape de gases en todos los pozos de inspección y tapas de acceso. Buenas prácticas de limpieza y mantenimiento; medidas de control de zancudos.
-------------	----------------------	---	---

Fuente: (Los Autores).

Los principales problemas por considerar en las cercanías a los SDMAR, tal como se ve en la Tabla 3.2, son el olor, los insectos y el ruido. Estos son los aspectos más problemáticos para los grandes sistemas para manejo de aguas residuales, como los sirven a urbanizaciones o a grandes instalaciones comerciales, en vez de sistemas más pequeños como los que sirven a residencias unifamiliares o pequeños núcleos multifamiliares. En ausencia de requisitos normativos se debería aplicar el sentido común cuando se consideren las tecnologías apropiadas.



Adaptación de planes para evitar molestias generadas por SDMAR basados en el uso de la tierra:

La gran variedad de definiciones de usos de la tierra y requisitos relacionados significa que los análisis y soluciones específicos del sitio deberían considerar los conceptos y medidas de control de molestias y aplicarlos según sea necesario. Dicho proceso siempre inicia investigando los usos de la tierra en los lotes cercanos, así como las regulaciones que se deben aplicar. Las secretarías de planeación e ingeniería de los gobiernos locales son un buen lugar para comenzar, ya que los mapas de zonificación y de usos de la tierra deben estar disponibles en los planes de ordenamiento territorial. Tales dependencias también pueden dar información acerca de proyectos y experiencias locales en el control de molestias causadas por SDMAR que ayudarán a entender las condiciones y regulaciones locales. Esto es importante porque los controles de olores y ruidos pueden ser costosos y usar controles inapropiados para el contexto podría convertirse en una inversión ineficiente de recursos.

3.9 PASO 9 - IDENTIFICAR LOS SERVICIOS PÚBLICOS BÁSICOS, SDMAR PREEXISTENTES Y POSIBLES CONFLICTOS RELACIONADOS

Determinar cuáles servicios públicos básicos pasan por el terreno que será destinado al SDMAR es un paso necesario en la evaluación del sitio. Ello

ayuda a evitar romper accidentalmente tuberías enterradas de servicios como acueducto y alcantarillado y puede recordar los peligros asociados con cables aéreos y usar equipo pesado como retroexcavadoras; además, este proceso brinda información útil si los sistemas se mecanizan y necesitan suministro de energía eléctrica y/o agua (a menudo necesario para instalar, operar y mantener). Finalmente, otros aspectos incluyen entender si los componentes del sistema para manejo de aguas residuales que ya existente en el sitio afectarán al proyecto, cómo lo harían, y si dicho SDMAR se podría utilizar, o si por el contrario, necesita ser removido.

3.9.1 Servicio eléctrico

Únicamente el personal de electricistas autorizados puede realizar trabajos en los componentes eléctricos del SDMAR. Sin embargo, el propietario del lote también debe recurrir a la empresa de servicios públicos básicos locales para obtener la autorización respectiva y eventualmente para recibir el servicio de acometida para acceder a la red eléctrica o en su defecto recibir la asesoría técnica pertinente.



Consideraciones sobre el servicio de electricidad:

La energía eléctrica puede ser monofásica o trifásica, con voltajes que en aplicaciones comunes oscilan entre 120 y 220 V. Los motores y otros equipos eléctricos deben coincidir con la fase y voltaje apropiados, lo cual debe ser efectuado con la ayuda de la empresa que brinda el servicio de suministro de energía eléctrica a nivel local. Además, por el simple hecho de haber una línea eléctrica que cruza la propiedad no se puede asumir que se garantiza la recepción de dicho servicio. Para evitar costosas revisiones durante el proyecto se recomienda indagar acerca de la disponibilidad del servicio de electricidad durante la etapa de evaluación del sitio.

3.9.2 Disponibilidad de agua para la operación y mantenimiento del sistema

A diferencia de las líneas eléctricas, que suelen estar por encima de la superficie del terreno, hay que averiguar dónde están las redes de tuberías de agua que suelen disponerse enterradas. Si el dueño de la propiedad no está seguro, y no es factible tener informaciones por parte de la empresa de agua y saneamiento local se recomienda practicar cuidadosamente perforaciones exploratorias poco profundas antes de ejecutar las excavaciones propiamente dichas. Las tuberías de agua pueden estar instaladas en cualquier lugar y se pueden romper con bastante facilidad.



Consideraciones sobre acceso al agua:

Para muchas configuraciones de SDMAR, es necesario disponer de agua potable suministrada por la compañía de abastecimiento municipal. El suministro de agua puede ser necesario en el proceso de construcción; en operaciones tales como pruebas hidráulicas o verificación de fugas en un tanque séptico; en el proceso de operación del SDMAR se requiere agua potable para consumo y aseo de los operadores y de algunas instalaciones, maquinarias y herramientas; por ello la disponibilidad de agua puede ser un factor muy relevante en la selección de tecnologías. También, la ubicación de las tuberías de agua, tal como se discutió anteriormente, es una consideración importante para garantizar distancias límite adecuadas a los componentes del SDMAR.

3.9.3 Evaluación de los componentes y equipo de un SDMAR ya existente

Las instalaciones y componentes de un SDMAR ya existente o abandonado se podría usar en construcciones nuevas o en ampliaciones. Por ejemplo, los tanques sépticos existentes pueden tener varios usos en las configuraciones del sistema y su incorporación puede ahorrar dinero. Una vez localizados, el proveedor de servicios puede realizar una prueba de fugas (Figura 3.26) como parte del procedimiento de evaluación del sitio.



Figura 3.26. Tanque séptico antes de una prueba de fugas mostrando cómo las tapas y tuberías verticales son selladas antes de la prueba con masilla de silicona no retráctil.



Al evaluar una unidad de tratamiento existente; por ejemplo, un tanque séptico se debe verificar que tenga la capacidad volumétrica adecuada y rigidez en su estructura. Para verificar el tamaño, descubra toda la superficie de este usando sondas y estime el volumen. Para el caso de tanques sépticos rectangulares el volumen se estima multiplicando su longitud por el ancho y por la profundidad efectiva; la profundidad efectiva se mide desde el fondo de la línea de flujo de la tubería de salida (cota batea) hasta el fondo del tanque. En cuanto a la rigidez estructural, es necesario que las puertas de acceso estén debidamente selladas, y que los baffles deflectores estén adecuadamente colocados para la evaluación; adicionalmente se debe verificar que las tuberías de entrada y salida tengan condiciones adecuadas para el uso continuo.

3.9.3.1 Acceso a tanques sépticos existentes

Para determinar la accesibilidad y posible uso de tanques sépticos existentes, hay que determinar su ubicación exacta y su condición. Para tales fines, se recomienda seguir los siguientes procedimientos:

1. Localice el tanque séptico. El tanque debería estar a una distancia horizontal de tres metros de los cimientos del edificio, para que no se vea afectado por el bulbo de presiones de la cimentación; aunque con cierta frecuencia, en escenarios urbanos con restricciones de espacio, este puede instalarse bajo la cocina. Las tuberías de drenaje que salen de una vivienda o que se encuentran bajo ella pueden indicar la ubicación del tanque; de igual manera, las depresiones o áreas con rellenos alrededor de la vivienda también pueden dar pistas sobre la ubicación de dichos tanques.
2. Realice una excavación hacia la unidad de tratamiento. En la mayoría de los casos, la parte superior del tanque no está a más de 0,5 m por debajo de la superficie. Una vez se identifique el tanque, ubique la puerta de acceso en la parte superior del mismo.
3. Retire suficiente material de cobertura para permitir la remoción del líquido a través de la puerta de acceso. La tapa puede ser muy pesada pues puede ser de concreto o metal inoxidable, así que es posible que se requiera de ayuda para su remoción. Una vez que se ha retirado la tapa, inserte la manguera de bombeo en el tanque para realizar la succión del líquido y el lodo.
4. En caso de que no haya una puerta o escotilla de acceso, se recomienda realizar de manera controlada una perforación en la parte superior del tanque como alternativa para acceder a la unidad de tratamiento y extraer el lodo. Esto se puede lograr a menudo con barras de metal y herramientas

manuales; al completar la operación, será necesaria la instalación de una tubería vertical hermética para evitar el escape de gases y una tapa con sello que proveerá fácil acceso en el futuro.

5. Una vez completado el proceso de verificación de las condiciones del tanque séptico y habilitado para su operación, se llenará el agujero y se evacuará los escombros y se limpiará el lugar.



Otras consideraciones para localizar tanques sépticos:

En muchos casos, los tanques sépticos están instalados debajo de la vivienda, ya sea debajo de la cocina o en el área de la unidad sanitaria. Para ubicarlos, use una barra de metal y golpee el suelo suavemente. Los tanques sépticos producen un sonido hueco cuando se golpea de esta forma. Pese a que no es deseable excavar un agujero en el piso de la cocina, en caso de no disponer de un acceso, ello será necesario. Después de vaciar el lodo, el tanque debería ser equipado con una tapa hermética para evitar el escape de gases y que permitirá acceso fácil durante el próximo evento de vaciado de lodo.

3.9.3.2 Pruebas de fugas — procedimiento paso a paso

Aunque el tanque séptico pase por una inspección visual, es necesario revisar la impermeabilidad de la unidad de tratamiento aplicando una prueba de fugas. Aunque todos los tanques sépticos, tuberías de alcantarillado y depósitos nuevos deberían someterse a pruebas de fugas tras instalarse, este paso debe realizarse como parte de la evaluación del sitio cuando se considera el uso de alguna estructura del SDMAR existente. Para hacerlo, se recomienda seguir los siguientes pasos sencillos:

1. Selle las tuberías de entrada y salida, así como las tuberías verticales con masilla de silicona u otro material apropiado que no experimente contracción o expansión.
2. Llene el tanque con agua a una elevación de 10 cm sobre la línea de flujo del tanque, depósito, tubería o cualquier estructura de conexión.
3. Deje permanecer el agua en la unidad de tratamiento durante la noche (un periodo de 12 horas como mínimo).

4. Llene de nuevo el tanque o depósito, según sea necesario, para llevar el nivel de agua de nuevo a 10 cm sobre la línea o nivel de flujo de cualquier tubería o estructura que sobresale.
5. Tras llenarlo de nuevo, mida el nivel de agua desde un punto fijo (la parte superior del tanque o una marca colocada en la pared del tanque).
6. Mida el descenso del nivel de agua tras 1 hora (si existe dicho descenso). Para los tanques sépticos, si el nivel de agua baja más de 0,5 cm en 1 hora, será necesario vaciar el tanque y repararlo. Para filtraciones pequeñas, se recomienda agregar al tanque de agua 1 kg de cemento Portland por cada 1.000 L de agua y mantener en suspensión la lechada agitando el líquido con una paleta durante 4 horas. A medida que el agua se filtra por la fisura, las partículas de cemento Portland sellarán el agujero.
7. Después del sellado, repita la prueba de fugas para verificar si las mismas continúan presentándose. Para fugas persistentes, se recomienda vaciar el tanque y dejarlo secar. Posteriormente se debe sellar con lechada rica en cemento o con un aditivo o producto para impermeabilización aprobado por los códigos de construcción locales. Como un último recurso, remueva el contenido del tanque e instale un geosintético –usualmente geomembrana- en el fondo y paredes internas del tanque.



Consideraciones sobre las pruebas de fugas:

Antes de someter el tanque séptico a las pruebas de fugas, asegúrese de que todas las tuberías verticales y pozos de limpieza están adecuadamente instalados y sellados con mezcla de cemento o masilla de silicona (masilla no retráctil). El nivel de agua para la prueba de fugas debería estar a 10 cm por encima del nivel más alto donde entra una tubería al tanque.

Las pruebas de fugas deben ser realizadas en tanques sépticos nuevos, reservorios, depósitos, alcantarillados y otros componentes que retengan aguas residuales. Los propietarios de instalaciones que subcontratan la construcción de SDMAR deben exigir pruebas de fugas y verificación por parte de terceros como condición para la aceptación final de la construcción.



Tanques sépticos y zanjas o compartimientos de infiltración:

En los países en vías de desarrollo, los tanques sépticos con frecuencia son diseñados con compartimientos de infiltración que descargan el efluente estabilizado a través de zanjas de infiltración, las cuales consisten en compartimientos adjuntos al tanque, con el fondo libre (no impermeabilizado); de hecho, es una alternativa autorizada por las autoridades ambientales de varios países bajo condiciones específicas en las que no exista riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Esta es una configuración que, en caso de no ser adecuadamente diseñada, puede ser inapropiada ya que podría generar contaminación de aguas subterráneas. La discusión antes mencionada sobre la pertinencia y los ensayos de permeabilidad de los suelos deben indicaren qué casos el SDMAR no debe permitir como alternativa de tratamiento los tanques sépticos con infiltración.

Para evaluar si un tanque séptico existente tiene una cámara de infiltración no permitida, primero se debe bombear el contenido del tanque y remover todo el lodo acumulado en el fondo. Se debe inspeccionar visualmente para detectar separaciones, aberturas y vacíos que puedan indicar la falta de condiciones de impermeabilidad. Si se descubre una cámara de infiltración en un tanque existente, la misma aún puede ser utilizada para nuevos SDMAR, siempre y cuando su uso sea autorizado por la autoridad ambiental. También, en caso de ser necesario, los tanques existentes con compartimientos de infiltración pueden ser sellados por medio de geomembrana.

3.9.3.3 Remoción o abandono de tanques sépticos existentes

En algunos casos, como cuando los nuevos sistemas de alcantarillado vuelven innecesarios los tanques sépticos existentes, o una unidad de tratamiento presenta una fuga grave, los tanques pueden quitarse del sitio o abandonarse. El contenido de un tanque séptico existente puede ser peligroso aún si ha estado sin uso por varios años. Por razones de salud y seguridad, remueva el contenido del tanque y desinfectelo antes de la remoción de la unidad de tratamiento. Para eliminar un tanque séptico existente se recomienda seguir las siguientes instrucciones:

1. Haga que un proveedor de servicios autorizado bombee el contenido del tanque para remover la mayor cantidad posible de líquidos y de lodo estabilizado
2. Agregue agua y use un dispositivo para romper el lodo restante y luego succione el contenido de nuevo, teniendo cuidado de remover la mayor cantidad posible de líquido

3. En el caso de tanques de plástico o fibra de vidrio, puede ser posible su remoción sin tener que demoler totalmente la estructura, rompiéndola en pequeños pedazos. Para los tanques de concreto, es probable que se requiera el uso de equipo pesado, como retroexcavadoras (para fraccionar el tanque en pedazos pequeños), perforadoras o inclusive trabajo manual para demoler el tanque. Se recomienda tener precaución y usar equipo de protección personal para proteger a los trabajadores de la exposición a agentes patógenos
4. Elimine los escombros del tanque en un relleno sanitario, una escombrera, o en un lugar adecuado para tal fin.

3.9.3.4 Abandono de tanques sépticos en el sitio.

Para abandonar un tanque séptico en el lugar se recomienda los siguientes pasos:

1. Bombear el contenido del tanque séptico quitando lo más posible del líquido y lodo acumulados.
2. Realizar un agujero en el fondo de cada compartimiento del tanque séptico usando equipo pesado desde la parte externa de la unidad de tratamiento. No ingrese al tanque para lograr dicho propósito.
3. Llenar el tanque séptico con arena o con material térreo para completar todos los espacios vacíos y así evitar un eventual colapso ante las cargas externas.
4. Cubrir el tanque con suelo del lugar y compactar las capas de material térreo.

3.10 PASO 10 - EVALUACIÓN DE ASPECTOS RELATIVOS A LA ACCESIBILIDAD AL SDMAR

El SDMAR debe planificarse para que permita realizar la eliminación de lodos, la inspección, la operación y el mantenimiento periódicos, así como su reparación o eventual reemplazo. En consecuencia, la localización propuesta del sitio y el acceso vehicular a las instalaciones, los cuales facilitan el servicio del sistema, pueden afectar la selección de la tecnología. Se debe evaluar el mecanismo de acceso al SDMAR para garantizar que los materiales para su construcción puedan ser entregados de tal forma que viabilice el eventual ingreso de maquinaria en la etapa constructiva o en caso de un mantenimiento, como por ejemplo en el momento de realizar la extracción parcial o total de

lodos del tanque séptico o para la remoción periódica de material retenido en el pretratamiento; de igual manera, se debe garantizar el acceso seguro y eficiente al personal encargado de su inspección, operación y mantenimiento.

3.10.1 Evaluación de la accesibilidad del sitio

Los sitios donde se instalan SDMAR deben ser accesibles a los trabajadores permanentes y al personal institucional encargado de verificar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. Al evaluar la accesibilidad al SDMAR considere su utilidad para:

- Entrega de equipos y materiales. Se recomienda considerar las restricciones de peso para ciertas tecnologías de SDMAR que requieren el ingreso de cargas pesadas de arena, grava o roca al sitio en volquetas.
- Ingreso de camiones o equipos para remoción de lodos. Los tanques sépticos u otros componentes del SDMAR que requieren eliminación periódica de lodos necesitan un fácil acceso para el equipo encargado de dicha labor. La mayoría de camiones aspiradores para eliminación de lodos tienen mangueras estándar de 25 metros de longitud y están limitadas por una elevación vertical de 4 m (la diferencia de nivel desde el fondo del tanque hasta la elevación o altura de entrada del camión cisterna). Si no se pueden cumplir esas distancias y el acceso es limitado, se recomienda identificar otras opciones para eliminar lodos (Figura 3.27). Es fundamental que el operador del sistema entre en contacto con el proveedor local de servicios de eliminación de lodos (usualmente la compañía de saneamiento municipal) para identificar qué opciones pueden aplicarse al proyecto.
- Personal encargado de la operación y mantenimiento. Una vez que el sistema está instalado, el acceso debe estar disponible para los proveedores de servicios a fin de que estos puedan llevar a cabo tareas rutinarias y de emergencia, según sea necesario.
- Inspecciones, ya que, con frecuencia, el personal designado por las autoridades regionales o locales para garantizar el cumplimiento de las regulaciones necesitará acceso al sitio para realizar inspecciones rutinarias o muestreos que permitan verificar el adecuado funcionamiento del sistema.



Figura 3.27 . . Ejemplo de operación manual de eliminación de lodos (RTI International, 2011).

Aunque la seguridad del sistema es muy importante para las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de gran tamaño, también es una preocupación para el SDMAR, por ello es necesario abordar la seguridad durante todo el proceso de evaluación del sitio. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden atraer atención no deseada, por ello es fundamental evitar que el público tenga acceso a estos, o realice actos vandálicos sobre los mismos. Las señales que advierten de los peligros asociados con el sistema, cercas de seguridad y tapas de pozos de inspección con seguros de cierre protegen al público de los peligros inherentes asociados a los sistemas de manejo de aguas residuales. Conocer los costos relativos al control del acceso y de las medidas de seguridad desde el inicio del proyecto garantiza que éstos serán debidamente incluidos en el presupuesto.



Garantía del acceso y protección del SDMAR en Georgetown, Guyana:

En Georgetown, Guyana, la finca de entrenamiento St. Stanislaus del programa Farmer to Farmer de Partners of the Americas ejecuta un programa modelo de biodigestor de residuos orgánicos de ganado vacuno que ofrece entrenamiento y formación de capacidades para el manejo adecuado de SDMAR. Unos temas a los que se les ha prestado especial atención son la accesibilidad y la seguridad del sitio. Estos conceptos fundamentales en el diseño del sistema de manejo de aguas residuales garantizan la facilidad de operación y protegen el sistema contra posibles daños. En entornos rurales, asegurar el lugar destinado al

tratamiento de aguas residuales contra el acceso de animales es un aspecto necesario para garantizar la durabilidad del sistema. Los adecuados controles del acceso no solamente permiten las inspecciones, también evitan cierto tipo de accidentes (por ejemplo, el ganado que pisa o patea una tubería y la rompe) o la excesiva exposición a la luz solar que puede degradar algunos componentes del SDMAR.

En la Figura 3.28, en la imagen de la izquierda se ilustra a un miembro del personal inspeccionando el sistema de regulación de gases subproducto de la digestión anaerobia; dicha instalación requiere de un techo sencillo y de un cerco de entrada flexible que puede garantizar tanto la seguridad como un fácil ingreso. En contraste, a las afueras de la misma ciudad, un digestor tubular de un pequeño agricultor no estaba lo suficientemente protegido lo que condujo a una falla temporal del sistema, como se observa en la imagen de la derecha, con un digestor temporalmente desinflado. Al carecer de cobertura y protección perimetral, la luz solar incide directamente sobre el plástico; la lluvia puede acumularse en el digestor y eventualmente puede afectar de manera negativa al suelo que soporta la unidad, permitiendo que la base se mueva y afecte la pendiente; adicionalmente, algunos animales de granja como los pollos pueden caminar sobre la unidad y la podrían perforar, haciendo que se desinfe y llevando a la necesidad de efectuar reparaciones que fácilmente pueden ser evitadas proporcionando un cerco y un techo. Este sencillo ejemplo sirve para mostrar que el acceso y protección adecuados son fundamentales para garantizar el éxito del sistema; aunque esto es especialmente claro para el caso de digestores en granjas donde los animales pueden dañar las unidades del sistema, también es aplicable para tecnologías de SDMAR más complejas que requieren de operación y mantenimiento manual en ciertos componentes y que puedan ser dañados de manera inocente por niños o miembros de la comunidad (o incluso vándalos) que podrían tocar y romper partes clave del sistema.



Figura 3.28 . . Biodigestores tubulares mostrando medidas de acceso y protección adecuadas (a la izquierda) e inexistentes (a la derecha) en Guyana.

3.11 PASO 11 - OPORTUNIDADES PARA BENEFICIARSE DE LOS SUBPRODUCTOS DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

La recuperación, reciclaje y reúso de los subproductos y residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales, tales como el efluente tratado, biosólidos y biogás de la digestión anaerobia, podría presentar un atractivo si el propio sitio del SDMAR, los terrenos aledaños o los mercados locales pueden beneficiarse de manera rentable de su uso. Los residuos se pueden constituir en un incentivo importante para motivar la inversión en el SDMAR; dichos residuos pueden ser:

- Efluente tratado que puede usarse para irrigar terrenos con fines paisajísticos, para recuperación de áreas degradadas, riego de especies vegetales, para descarga de inodoros, entre otros.
- Grasa procedente de las trampas de grasa, que puede ser útil como insumo para biodiesel y otros productos comerciales, o como fuente de combustible.
- Biogás del proceso de digestión anaerobia que podría usarse para cocinar o para calefacción.
- Biosólidos que pueden ser convertidos en compost y usados como mejoradores de suelos para uso en cultivos agrícolas.
- Entre los lugares con potenciales oportunidades de reutilización del efluente o de los residuos del tratamiento de aguas residuales para diversas actividades están:
- Jardines o lotes agrícolas que se pueden beneficiar por medio de la irrigación del líquido tratado.
- Áreas del paisaje, donde la aplicación de biosólidos e irrigación con efluentes podrían agregar valor.
- Los sistemas de tratamiento por medio de lagunas de estabilización podrían ser favorables para la acuicultura mejorada con los efluentes, ya que poseen elevada productividad primaria; también puede destinarse a la recolección de biomasa algal, actividad que sirve como tratamiento adicional y que es fuente de proteínas y nutrientes.
- Edificaciones cercanas que se beneficiarían de los efluentes adecuadamente tratados para su uso en descarga de inodoros.
- Instalaciones que podrían beneficiarse del biogás, que al contener metano podría ser de utilidad para cocinar o para calefacción.

Estas posibles actividades de reúso pueden agregar valor y/o reducir los costos globales del SDMAR. Por lo tanto, establecer las prioridades de uso final de los residuos tiene un gran impacto en la selección de la tecnología. La Tabla 3.3 puede servir como guía para prever y planificar el reúso de los subproductos o del efluente tratado.

Tabla 3.3. Medidas de reutilización, problemas y soluciones de tecnología recomendadas

Actividad de reúso	Nivel de la tecnología	Principales problemas asociados	Posible configuración del sistema
Irrigación superficial de cultivos con fines alimenticios	Tratamiento primario y secundario, filtración terciaria y desinfección	Potencial contacto con patógenos por parte de trabajadores agrícolas y consumidores	Reactores anaerobios, lagunas de estabilización o humedales construidos, filtración lenta con arena y desinfección con cloro o UV.
Irrigación sub-superficial de cultivos no alimenticios.	Tratamiento primario y secundario	Balancear las necesidades de los cultivos con la disponibilidad del efluente y su contenido de nutrientes.	Reactores anaerobios, humedales construidos
Compostaje de biosólidos	Sistemas que recolectan, procesan y remueven el agua de los lodos	Potencial contacto con patógenos; mantener una adecuada relación carbono/nitrógeno, C: N, contenido de humedad, labores de mezclado (o volteo) y temperatura.	Letrina con fosa, tanque séptico o reactores anaerobios aledaños a la vivienda o estructura; laguna de estabilización o biodigestor para estabilización de lodos y humedales construidos o biofiltro para tratamiento de efluentes
Reutilización del biogás	Digestión anaerobia, tratamiento secundario	Seguridad de la recolección de gases; monitoreo del metano y la relación C:N del caudal de entrada	Digestor anaerobio, equipo de almacenamiento de biogás y lagunas anaerobias

3.12 PASO 12 - ASPECTOS NORMATIVOS DEL PERITAJE IN SITU

Los gobiernos locales son clave para estimular el saneamiento con el uso de SDMAR, ya que, con características favorables y soluciones sanitarias, protegen la salud pública y el medio ambiente. Aunque mucho del trabajo relativo a la evaluación del sitio puede ser realizado por el sector privado o por los mismos propietarios del lugar, los gobiernos locales pueden establecer entornos propicios reduciendo obstáculos para el cumplimiento de requisitos normativos. Esto se puede lograr en agencias con recursos limitados al usar un sistema que propenda por una regulación del autocumplimiento en el cual los gobiernos locales suministran los formularios, instrucciones, recursos educativos, controles puntuales y parámetros de supervisión. Los programas normativos para los SDMAR varían significativamente de un país



a otro, e incluso dentro del mismo país mediante las legislaciones estatales o municipales. Los requisitos normativos pueden tener implicaciones de costos para el desarrollador del proyecto, dichos requisitos pueden incluir lo siguiente:

- Programas de investigación e inspección del sitio previos a la construcción
- Revisión de permisos y cobro de honorarios
- Inspecciones durante y después de la construcción
- Inspecciones operativas, muestreo y análisis y auditorías de cumplimiento.

Los propietarios de las instalaciones suelen garantizar que sus sistemas cumplan con los aspectos normativos. Esto puede requerir muestreo, análisis de laboratorio, contratación de operadores certificados y completar informes de cumplimiento, o en su defecto podría no existir ningún requisito. De cualquier forma, es importante entender las expectativas normativas para garantizar el cumplimiento oportuno de todos los requisitos del orden nacional, regional y local.

3.13 REVISIÓN DE LAS INFORMACIONES OBTENIDAS

Este capítulo brindó información relativa a:

- Planificación del sitio y estimación de la disponibilidad del área.
- Evaluación de la profundidad, textura, estructura, consistencia y características físico mecánicas de los suelos.
- Aguas subterráneas y superficiales como posibles condiciones limitantes para implementar un SDMAR.
- Conceptos de pendiente y topografía.
- Uso de la tierra y aspectos relacionados con los servicios básicos y componentes de SDMAR pre-existentes.
- Acceso al lugar del proyecto.
- Consideraciones relacionadas con los residuos y normativas.

La **Tabla 3.4** resume los ítems de la evaluación del sitio relativos a la fuente de aguas residuales (tomados del estudio de caso del SDMAR para LORMA).

Tabla 3.4. Resumen de la Evaluación del Sitio para las Instalaciones Médicas LORMA

Nivel de la tecnología	Principales problemas asociados	Posible configuración del sistema
Área disponible	Determinación de qué área de terreno está disponible para entender si es mejor un sistema mecanizado o uno no mecanizado.	Se dispone de 60 m ² ; implica que se necesita un sistema mecanizado, especialmente dada la condición del alto caudal.
Pendiente y topografía	Determinación de si la diferencia de nivel permitirá el uso de un alcantarillado por gravedad desde los puntos de generación de los efluentes hasta el sitio de tratamiento.	La diferencia de nivel es insuficiente; se necesita de una estación de bombeo.
Propiedades del suelo	Si se planifica la disposición en el suelo, determinar la profundidad del suelo utilizable y sus características clave para calcular la TILP. Si se trata de un SDMAR pesado, averiguar si la estructura del suelo es débil y si necesita de un soporte adicional.	N/A - no se planifica una dispersión en el suelo. Se requiere la instalación de una losa de concreto para soportar el peso del sistema mecanizado.
Aguas superficiales y subterráneas	Determinar el impacto en el sitio debido a las aguas superficiales e inundaciones por crecientes, ya que las aguas subterráneas y las eventuales oscilaciones del nivel freático no son un problema grave.	Nivel de inundación identificado - el sistema se encuentra por encima del mismo.
Uso del suelo y servicios básicos	Determinar si el SDMAR propuesto es adecuado con base en el uso del suelo a nivel local, la zonificación y las redes de servicios básicos.	El enfoque del desarrollo por etapas es aceptable para la autoridad local y el acceso al servicio eléctrico es conveniente.
Acceso	Determinar la necesidad o el potencial de acceso para remoción de lodos, el servicio e inspección.	El sitio es adecuado para todos los proveedores de servicios.
Residuos y regulaciones	Determinar si los administradores del SDMAR podrían beneficiarse de los residuos del tratamiento (y cómo lo harían) y la necesidad de tomar en consideración las regulaciones locales.	La creación de subproductos, tales como residuos agrícolas o basados en la generación de biogás no es factible, aunque la autoridad local haya dado su aprobación.

0

4

**TECNOLOGÍAS
DE SDMAR**



En este capítulo se exploran las categorías de componentes de SDMAR: interfaz de usuario/pretratamiento, alcantarillados, sistemas de tratamiento primario, tratamiento secundario, posible tratamiento terciario y la disposición final del efluente tratado, a través de la dispersión, vertimiento o la reutilización. Además, se introducen el diseño y estrategias de dimensionamiento para algunas tecnologías claves, y de esta forma brindar orientación sobre la determinación del nivel de tratamiento requerido para necesidades específicas.

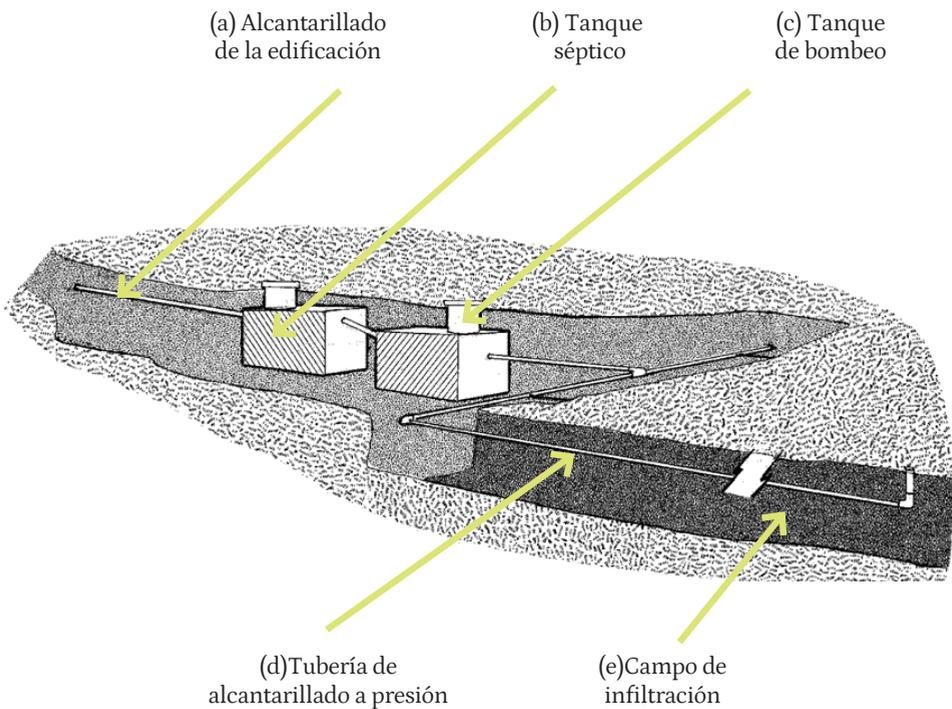


Figura 4.1. Un SDMAR típico que ilustra cómo se unen los diversos componentes para formar un sistema. En este caso, (a) el alcantarillado de la edificación conecta el edificio al tanque séptico; (b) el tanque séptico proporciona el tratamiento primario; (c) el tanque de bombeo almacena temporalmente un cierto volumen del efluente anaerobio y lo presuriza para posterior distribución; (d) la tubería del alcantarillado a presión transporta el efluente desde el punto de tratamiento hasta el punto de descarga; y (e) las zanjas de infiltración proporcionan tratamiento secundario y la dispersión del efluente final (Fuente: Adaptado de Osmond et al., 1997, p.6 y p.7).

La Figura 4.1 recuerda que los sistemas de manejo de aguas residuales son una serie de diferentes componentes que trabajan juntos para lograr las metas del proyecto. Definir dichas metas al principio del proceso de planificación brinda importante información para la toma de decisiones relativas a las tecnologías a utilizar, tal como se presentó en el Capítulo 3. Si el propósito es tratar las aguas residuales a un nivel donde pueden disponerse de forma segura en el medio ambiente, las tecnologías viables se pueden seleccionar según las características de la fuente receptora y las condiciones del sitio para lograrlo. Sin embargo, si la meta es reciclar el efluente tratado para irrigación agrícola, generación y colecta de biosólidos para producción de biogás o para uso como fertilizante, es posible que otras tecnologías sean más apropiadas.

En este capítulo se presentan las principales categorías de componentes de un SDMAR, así como algunas de las opciones de tecnologías disponibles más utilizadas, principalmente enfatizando en los sistemas de tratamiento basados en procesos físicos y biológicos, para entender cómo están formados los sistemas por los diversos componentes que deberán elegirse específicamente para lograr los resultados deseados. Se proporcionan estudios de caso para ilustrar cómo ya se han utilizado ciertas tecnologías y se presentan procedimientos matemáticos simples para el pre-dimensionamiento de algunas de tales alternativas tecnológicas, ello sin la pretensión de abarcar a plenitud el tema de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales ya que para ello el lector podrá recurrir a una gran diversidad de referencias bibliográficas específicas. En el capítulo no se presenta una relación completa de todas las tecnologías disponibles, ya que la lista sería muy extensa y adicionalmente, no es ese el énfasis del presente documento. Este texto trata de ilustrar cómo influyen las características de la fuente y las condiciones del sitio en la selección de las tecnologías y para ello se recurre a la introducción de tecnologías representativas, cuidadosamente seleccionadas.

Quizás el mensaje central de este capítulo (y tal vez del propio libro) es que la práctica adecuada de diseño, implementación y operación de SDMAR no consiste en tomar una tecnología favorita y adaptarla a un sitio específico. Más bien, se trata de entender la naturaleza y las metas del proyecto, las condiciones de la fuente y el sitio, el nivel de habilidades de los proveedores de servicios locales, las realidades de gobernabilidad de la comunidad sujeto del estudio y seleccionar las tecnologías más apropiadas basándose en dichas condiciones. También cabe mencionar que, en la industria del sector de tecnologías para el manejo de aguas residuales, los vendedores pueden ser agresivos en su afán por promover sus productos. Los compradores y los proveedores de servicios contratados deben ser conocedores del proceso de selección de tecnologías para asegurarse de que los recursos se invertirán apropiadamente y que las metas del proyecto a largo plazo se cumplirán y serán sostenibles.

4.1 CATEGORÍAS DE LOS COMPONENTES DEL SDMAR

Los SDMAR usan varios componentes que pueden incluir, entre otros, diversas configuraciones de tuberías, tanques, depósitos, equipo mecánico y otros productos. Dichos componentes se seleccionan con base en una consideración cuidadosa de las características de la fuente (Capítulo 2), las restricciones del sitio (Capítulo 3) y las necesidades del usuario final. Generalmente, los SDMAR se componen de cuatro a cinco categorías de subsistemas que se mencionan a continuación:

Interfaz de usuario — El inodoro, que es el primer paso en el proceso de recolección de aguas residuales para varios tipos de fuentes como las de origen residencial. Hay muchas referencias excelentes para el diseño y selección del tipo de inodoros y letrinas a implementar, algunas de las cuales se mencionan en las referencias al final de este capítulo.

Subsistema de pretratamiento — Son los componentes que remueven materiales que son dañinos para el proceso de tratamiento en la fuente. Los dispositivos de pretratamiento son necesarios en muchas instalaciones comerciales e incluyen trampas de grasa para restaurantes y servicios de alimentos, trampas de residuos sólidos para plazas de mercado y trampas de pelusa para instalaciones de lavanderías comerciales.

Subsistema de conducción — Consistente en la red de tuberías, canales o colectores del alcantarillado que transportan las aguas residuales desde el punto de generación hasta el punto de tratamiento, o desde un componente de tratamiento hasta el siguiente; y luego, al lugar de descarga, dispersión o reutilización del efluente tratado.

Subsistema de tratamiento — Se refiere a una serie de componentes que reciben las aguas residuales y trabajan juntos para separar y remover sus contaminantes, usando una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. Tal como se muestra más adelante, esta es una categoría muy amplia, en la que se incluye:

- Tratamiento primario, que usualmente involucra la clarificación que permite que los sólidos se sedimenten en el fondo de los tanques y se remuevan pequeñas fracciones de materia orgánica.
- Tratamiento secundario, que con frecuencia usa microorganismos para consumir los contaminantes mediante la respiración.
- Filtración y desinfección, para lograr que el efluente tratado sea adecuado para su reutilización o, en algunos casos, para su vertimiento o dispersión en el medio ambiente.
- Procesos de dispersión, reutilización o descarga (vertimiento) — logran la eliminación final del efluente tratado y pueden incluir las siguientes opciones:
- Dispersión del efluente a través de lechos o zanjas de infiltración subsuperficial, que a menudo son considerados como tratamiento

secundario.

- Reutilización en diversas actividades benéficas tales como el lavado de inodoros, la irrigación de cultivos agrícolas o de plantas de jardines.
- Descarga hacia desagües o redes colectoras fuera del sitio, o el vertimiento final en cuerpos hídricos receptores, tales como lagos, ríos o el océano.

4.2 CATEGORÍAS DE COMPONENTES TÍPICOS DEL SDMAR

Numerosas combinaciones de tecnologías pueden conformar buenos SDMAR específicos para el lugar en cuestión. Para ilustrar mejor el concepto de SDMAR como sistemas integrados, considere la siguiente ilustración. En ella se ha elegido un SDMAR típico para un colegio, ello con el fin de destacar cómo están integrados los componentes (Figura 4.2):



Figura 4.2. Sistema de aguas residuales para una escuela típica, incluyendo (de izquierda a derecha): tubería de alcantarillado; trampa de grasas; reactor anaerobio con deflectores, para tratamiento primario; humedales construidos, para tratamiento secundario y lagunas de pulimento, para desinfección (Fuente: Adaptado de Tilley et al., 2014, p. 106; Thermaco, Inc, 2013).

4.3 INTERFAZ DE USUARIO Y PRETRATAMIENTO

Las decisiones acerca de cuáles tecnologías de SDMAR podrían ser mejores para un proyecto específico comienzan en la fuente. Ello puede iniciar considerando los diversos tipos, estilos y fabricantes de inodoros, así como los diferentes modelos para recolectar y manejar residuos en la fuente. El abordaje promovido por el concepto *Ecological Sanitation* – *EcoSan* (Saneamiento Ecológico) y por el uso de ciertos inodoros con fines de compostaje incentivan el manejo de las aguas residuales directamente en la fuente. Dicho concepto puede ser deseable para escenarios agrícolas rurales donde los nutrientes pueden reutilizarse directamente en los cultivos.

El manejo común de las aguas servidas se concentra en el uso de inodoros para recolectar aguas residuales y enviarlas a sistemas de tratamiento por el alcantarillado sanitario. Cuando las aguas residuales poseen contaminantes tales como altos niveles de grasa, estos deberían ser removidos por dispositivos de pretratamiento situados en la fuente para así proteger los equipos localizados aguas abajo y capturar dichos materiales, de tal manera que puedan ser reutilizados, reciclados o simplemente ser dispuestos de manera adecuada. Las secciones siguientes introducirán algunas de tales tecnologías y conceptos para ilustrar diferentes métodos destinados a la captura y procesamiento de las aguas residuales. La sección de referencias o los enlaces indicados en el texto contienen información adicional para cada uno de los subtemas.

4.3.1 Interfaz de Usuario

Para la captura de las aguas residuales a nivel residencial, las letrinas fueron el modelo básico de saneamiento adoptado durante siglos. Sin embargo, dado el enfoque actual en la sostenibilidad de los recursos, las unidades sanitarias conformadas por inodoros y los SDMAR han sido el centro de innovación en las décadas recientes. Dicha innovación ha estado dirigida principalmente al mejoramiento en la efectividad de sus costos, así como de su eficiencia; un caso particular de ello son las tecnologías de inodoros sin agua y los programas de captura de nutrientes tales como *EcoSan*. Aunque los inodoros estándar pueden servir como interfaces efectivas para el SDMAR, esta discusión se centrará únicamente en dos modelos de sistemas de inodoros como una breve introducción a la innovación en esta área.

4.3.1.1 Inodoros EcoSan

EcoSan es un tipo de inodoros en los que se trata los excrementos humanos como un recurso en lugar de considerarlos como desechos, ello se evidencia en cómo tales inodoros usan un diseño de separación de orina/heces y de desvío de orina para permitir la reutilización de los nutrientes de excretas depositadas en el fondo y que serán degradadas naturalmente para fines agrícolas. Los

proyectos EcoSan han sido implementados en todo el mundo, principalmente a pequeña escala, con éxitos y fracasos. Los agricultores de bajos ingresos en las áreas rurales a menudo se benefician del uso de los desechos humanos como una fuente de fertilizantes sin costo alguno, por lo que los proyectos EcoSan han sido emprendidos principalmente en dichas áreas rurales; una perspectiva interesante sobre proyectos de aplicación se puede encontrar en la referencia de la *Swedish International Development Cooperation Agency* (1998).



Figura 4.3. Inodoro EcoSan de doble cámara (Fuente: Doczi, 2012).

La separación de la orina y las heces, que evita la contaminación de la orina, comúnmente ocurre a través del uso de inodoros de cámara múltiple con separación de los dos tipos de excretas (Figura 4.3). Estos cuentan con un orificio/cámara para capturar la orina y otro orificio/cámara ya sea para capturar las heces o para lavarlas como en un inodoro regular. Algunos de los inodoros también añaden otro orificio para separar el agua de lavado anal.

Para la mayoría de unidades EcoSan, las heces son almacenadas en un recipiente cilíndrico ubicado debajo de la estructura, mientras que la orina es almacenada en la parte inferior del inodoro en un contenedor sellado (Figura 4.4), donde dicho líquido se puede auto esterilizar en el lapso de un mes. Posteriormente, la orina esterilizada puede ser diluida con agua y aplicarse directamente a los cultivos agrícolas u ornamentales como un fertilizante rico en nitrógeno. Por su parte, las heces pueden ser evacuadas hacia un SDMAR existente o, en un esquema de sanitario mejorado, pueden ser capturadas en una cámara separada (frecuentemente forrada por medio de bolsas plásticas) y ser finalmente descartadas, convertidas en compost o ser sometidas a deshidratación.⁶

⁶Para una visión general básica de los inodoros con separación de orina y otras unidades similares, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014). Para una descripción más detallada del *EcoSan*, consulte la referencia de Winblad y Simpson-Herbert (2004).



Figura 4.4. Mecanismo para separar la orina en inodoro EcoSan (Fuente: Rieck et al., 2013, p. 23).

4.3.1.2 Otros sistemas innovadores

En contraste con el enfoque de usar el inodoro sin tratamiento para aprovechar los recursos, varias organizaciones están implementando o patrocinando sistemas que además de tratar los residuos capturan recursos del proceso de tratamiento. El ejemplo más obvio dentro del campo es el proyecto Reinvent the Toilet Challenge (Reinvente el Reto del Inodoro) de la Fundación Bill y Melinda Gates, que ha financiado varios equipos de trabajo a través de donaciones de millones de dólares para crear inodoros de nueva generación, costo-efectivos y que realicen el tratamiento completo de los residuos orgánicos.

Un ejemplo de un sistema innovador es el bloque de inodoro LooWatt (Figura 4.5) que puede ser usado tanto en áreas urbanas como en zonas rurales. El modelo LooWatt equipa bloques de inodoros comunitarios con compostadores y biodigestores, los cuales combinan excretas humanas con residuos de instalaciones como restaurantes y cafeterías para maximizar la producción de metano, el cual se usa para cocinar o para calefacción. La biodigestión también produce biosólidos que son convertidos en compost junto con otras fuentes de residuos. Esto conduce a la generación de productos fertilizantes que proporcionan un valor agregado a la comunidad. El sistema LooWatt muestra cómo los incentivos que impulsan la demanda de servicios sanitarios pueden hacer que los sistemas sean factibles aún en los sitios más difíciles y con altas limitaciones de área, a la vez que mejoran la salud y las oportunidades económicas de las comunidades beneficiadas. Al igual que con otras tecnologías de SDMAR, su implementación también requiere conocimiento de la fuente de las aguas residuales y del sitio donde serán implementados los sistemas para garantizar una instalación apropiada y el uso adecuado de los subproductos.



Figura 4.5. Biodigestor que da tratamiento a los desechos de inodoros y alimentos a través del proceso de codigestión (Fuente: LooWatt, 2013).

Un ejemplo de sistemas innovadores es el inodoro doméstico LooWatt, utilizado principalmente en zonas urbanas y periurbanas. La tecnología es ofrecida por proveedores de servicios bajo un modelo de suscripción mensual a los hogares. Una vez a la semana, el proveedor de servicios inserta un revestimiento de polietileno de alta densidad (HDPE) de forma cilíndrica y de 5 metros de largo en una ranura debajo del asiento del inodoro, recubriendo la taza del inodoro para la recepción tanto de la orina como de las heces; es decir, sin desvío de ninguno de los dos tipos de residuos. Cuando se “descarga”, las correas del inodoro arrastran el revestimiento y los desechos hacia un barril debajo del inodoro, que luego el proveedor de servicios recoge durante el servicio semanal.

Este exclusivo mecanismo de descarga sin agua brinda a los usuarios y operadores una mejor experiencia en comparación con otros inodoros sin agua (por ejemplo, letrinas de pozo, o la desviación de la orina) debido a su capacidad para aislar los desechos en el revestimiento. Utilizando la tecnología de extracción de recursos de LooWatt, las heces y la orina se pueden separar del revestimiento y eliminarse directamente en cualquier instalación de transformación y tratamiento de aguas residuales o lodos fecales existentes. En Madagascar y Sudáfrica, el sistema LooWatt ha demostrado su capacidad para:

- (a) Aumentar la disposición de los hogares para pagar por el servicio de saneamiento debido a la mejora de la experiencia del usuario y el nivel de servicio.
- (b) Proporcionar alimento de alta calidad a las instalaciones de digestión anaerobia en comparación con los residuos provenientes de letrinas de pozo y tanques sépticos ya que en el caso de LooWatt los desechos aún se encuentran “frescos”, no digeridos y no incluyen suelo.

La tecnología LooWatt es ideal para comunidades que viven en o cerca de áreas

propensas a inundaciones, ya que limita la contaminación del medio ambiente durante tales incidentes, o áreas donde realizar las excavaciones para una letrina o un tanque séptico es demasiado costoso o técnicamente no factible; por ejemplo, en el caso de lechos de roca localizados a poca profundidad. La tecnología también se ha utilizado para usos comerciales, como el alquiler de los sanitarios para obras de construcción o eventos, fortaleciendo aún más la sostenibilidad financiera del modelo de servicio.

A continuación, en la Figura 4.6, se presentan algunas fotografías de sistemas de inodoros *LooWatt*, las cuales fueron registradas en Durbán, Suráfrica, en el marco de un proyecto de la *Water Research Commission* (WRC). Las imágenes fueron generosamente suministradas por Georges Mikhael, quien trabaja con la compañía *LooWatt: Flush With Happiness* fueron tomadas por *Eloff Pretorius*.



Figura 4.6. Imágenes de sistemas de inodoros secos *LooWatt* en Durbán, Suráfrica. (Fuente: Mikhael, 2023). a) Un usuario presiona el botón de descarga del inodoro *LooWatt*, b) Un funcionario desmonta la bolsa plástica para su reemplazo en un inodoro *LooWatt*.⁷

⁷Para acceder a más informaciones acerca del sistema de bloque de inodoros se recomienda el enlace <http://www.loowatt.com/>.

4.3.2 Pretratamiento

El pretratamiento remueve ciertos elementos de las aguas residuales para reducir su carga contaminante a la vez que protege de daños u obstrucciones a los componentes del sistema de tratamiento que se localizan aguas abajo. Las categorías comunes de dispositivos de pretratamiento incluyen:

- Rejillas de diferentes tamaños, con diversidad de diámetros de barras y de espacio entre barrotos. Su función es retener sólidos de tamaños considerables que estén siendo transportados por el agua residual; algunos de ellos de origen orgánico, tales como residuos de comida y preparación de alimentos, y otros de tipo inorgánico tales como bolsas y tapas plásticas, colillas de cigarrillos, paños húmedos, toallas higiénicas, pañales y preservativos, entre otros.
- Trampas e interceptores de grasa para preparación de alimentos, lavado de utensilios y actividades de procesamiento de alimentos.
- Trampas de pelusa para operaciones de lavanderías comerciales.
- Trampas de residuos sólidos para plazas de mercado u otras instalaciones que pueden descargar una alta concentración de sólidos suspendidos en las aguas residuales.
- Otros dispositivos en aplicaciones comerciales para remoción de los contaminantes específicos de la industria.

Los dispositivos de pretratamiento deben ser dimensionados de acuerdo con el caudal de diseño, el tamaño y la carga de contaminantes, y deben seleccionarse con base en consideraciones de operación y mantenimiento, costo unitario, facilidad de instalación y el eventual propósito de reciclar los materiales capturados.

4.3.2.1 Sistemas de canastas y rejillas para retención de sólidos de gran tamaño

En sistemas de alcantarillado sanitario que atienden comunidades de gran tamaño junto con las aguas residuales se transporta una alta diversidad de sólidos de gran tamaño que deben ser oportunamente removidos para evitar la afectación del adecuado funcionamiento de las diversas unidades de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, e inclusive de tratamiento terciario que se localizarán aguas abajo de tales dispositivos. Por eso se recomienda, como primera barrera para retirar los sólidos más grandes que llegan con el afluente al SDMAR, la disposición de rejillas y/o cestas conformadas por barras metálicas, con diámetros de barra y espaciamientos acorde al tamaño de los sólidos a remover. A continuación, en la Figura 4.7 se presentan fotografías que ilustran sistemas para retención de sólidos en plantas de tratamiento de aguas residuales de diverso tamaño.



Figura 4.7. Canasta para retención de sólidos de gran tamaño a la entrada del afluente a la planta de tratamiento de aguas residuales de Ilha Solteira, estado de São Paulo-Brasil.

En la Figura 4.7 se aprecia una canasta conformada por varillas y ángulos metálicos en material inoxidable, a la que se le hace mantenimiento al menos dos veces por día, en la cual se retienen sólidos de tamaño considerable como pequeñas botellas y tapas, bolsas plásticas, pañales y pedazos de tela, que pueden afectar el funcionamiento de los dispositivos de pretratamiento subsiguientes o a las unidades de tratamiento biológico conformadas por lagunas de estabilización.



Figura 4.8. Sistemas de rejilla para limpieza manual a la entrada de PTARs.

- a) Dos rejillas en serie con espesor de barra y espaciamiento decreciente en Marinópolis, São Paulo-Brasil; b) y c) Rejillas con alta inclinación en los municipios de Ginebra y El Cerrito, Valle del Cauca-Colombia.

Las rejillas de limpieza manual de la Figura 4.8 ilustran particularidades como las siguientes: a) en la PTAR de Marinópolis (Brasil) el agua residual del alcantarillado sanitario ingresa por gravedad y posee dos rejillas secuenciales, cada una con su sistema de disposición de residuos sólidos en la parte superior para su almacenamiento y deshidratación temporal; b) la rejilla de Ginebra (Colombia) es el primer dispositivo de pretratamiento del líquido que proviene por gravedad desde un alcantarillado combinado -aguas negras y aguas lluvias-, dicha rejilla se encuentra instalada en un canal de baja profundidad y de fácil limpieza; c) las rejillas de El Cerrito están al final de un alcantarillado combinado que funciona por gravedad y se encuentran instaladas en un canal de gran profundidad que dificulta su limpieza frecuente pero que habilita un gran espacio disponible para paso del agua en caso de eventuales obstrucciones; tanto las rejillas de El Cerrito como de Ginebra protegen no solo a las unidades de pretratamiento subsiguientes, sino también a un sistema de bombeo que envía el líquido hacia los sistemas de tratamiento primario y secundario.

Para todos los sistemas de manejo de aguas residuales, y en especial en los descentralizados por su menor tamaño, las canastas y las rejillas requieren de operación y monitoreo regulares para evitar la acumulación excesiva de sólidos y la afectación del funcionamiento hidráulico del sistema de tratamiento (Figura 4.9).



Figura 4.9. Canastilla metálica para retención de sólidos en la PTAR del barrio Romão dos Reis, y rejilla dispuesta en un sistema prefabricado de la PTAR del barrio Coelhas, ambas plantas de tratamiento en el municipio de Viçosa, estado de Minas Gerais-Brasil.

Para la Figura 4.9, en la foto de la izquierda se evidencia una acumulación severa de sólidos en la canastilla, la cual se encuentra completamente ocupada por material orgánico e inorgánico de gran tamaño, poniendo en evidencia la necesidad de un mayor monitoreo y control operacionales para contrarrestar la afectación del normal funcionamiento del sistema de pretratamiento. En la foto de la derecha se aprecia una importante retención de sólidos por parte de la rejilla, los cuales deberán ser removidos oportunamente por el personal a cargo de la PTAR.

En plantas de tratamiento más grandes, localizadas en comunidades con buenas condiciones de infraestructura y de recursos, presupuestales, de logística y tecnológicos, se pueden implementar unidades de pretratamiento con funcionamiento mecanizado como la ilustrada en la Figura 4.10.



Figura 4.10. Rejilla para retención de sólidos de limpieza mecanizada en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio Presidente Prudente, estado de São Paulo-Brasil.

El sistema de rejillas de la PTAR de Presidente Prudente está conformada por una fase inicial de rejillas de barras gruesas y espaciamiento de barrotes grande, cuya limpieza es de tipo manual, y que posteriormente cuenta con un sistema de rejillas finas con limpieza mecanizada que realiza la remoción periódica de los sólidos retenidos (foto de la izquierda). Al final del sistema de raspado de la rejilla, en la parte superior se cuenta con el descarte de los sólidos hacia una banda transportadora horizontal (foto de la derecha), que a su vez entrega los residuos hacia otra banda transportadora inclinada que al final de su recorrido deposita los sólidos en un contenedor que los transporta hacia un relleno sanitario.

4.3.2.2 Trampas de pelusa para lavanderías comerciales

Las instalaciones de lavanderías comerciales, así como los hospitales, centros turísticos y hoteles dotados con lavanderías en el sitio, deben usar trampas de pelusa para prevenir que las fibras de tela y partículas de pelusa obstruyan las tuberías de alcantarillado, los tanques sépticos y otras eventuales unidades de tratamiento. Las trampas de pelusa deberían anexarse a las máquinas lavadoras o colocarse en cajillas para coleccionar las aguas residuales de todas las máquinas antes de descargarlas hacia el alcantarillado de la edificación. La pelusa recolectada puede agregarse al compost para mejoramiento de suelo para jardinería, o si no tiene programas de compostaje, puede recolectarse y eliminarse como residuo sólido en un relleno sanitario. Adicionalmente, las lavanderías comerciales que incluyen el lavado en seco también deben separar del alcantarillado de la edificación sus aguas residuales, que contienen solventes para lavado en seco, ya que dicho efluente es peligroso y podría matar las comunidades bacterianas que hacen funcionar los procesos biológicos en el tratamiento de las aguas residuales.

4.3.2.3 Trampas de residuos sólidos para plazas de mercado

Las plazas de mercado y otras fuentes con presencia de altas concentraciones de sólidos suspendidos en el flujo de aguas residuales, requieren trampas para retención de residuos sólidos para evitar que dichos residuos fluyan hacia los desagües y causen problemas de obstrucción. Las trampas deben limpiarse con frecuencia y los materiales retenidos por canastillas o rejillas del sistema deben instalarse en receptáculos cubiertos y eliminarse como residuos sólidos en un relleno sanitario.

Los tipos principales de trampas de sólidos para mercados se construyen con concreto y mallas metálicas, formando una caja que confina y almacena los sólidos recolectados. Esta opción de bajo costo se puede implementar usando materiales y mano de obra disponibles a nivel local. Las trampas se pueden adaptar para diferentes usos industriales para cumplir requisitos específicos del pretratamiento de aguas residuales. Los propietarios de instalaciones

industriales deben revisar con los grupos gremiales de la industria las especificaciones para dispositivos de pretratamiento tales como las trampas para residuos sólidos, así como las estrategias de operación y mantenimiento. Un ejemplo de una trampa para residuos sólidos es una caja con bisagras desarrollada para alcantarillados canalizados por investigadores en Kuala Lumpur (Figura 4.11). Su diseño es flexible y fácil de instalar, ya que puede adaptarse a los canales del alcantarillado en sitios estratégicos seleccionados para atrapar buena parte de los sólidos. Las tapas y puertas con bisagras hacen de esta unidad especialmente fácil de limpiar y mantener. Al tener sus componentes metálicos recubiertos con plástico estarán protegidos contra la corrosión, haciendo que dicha trampa sea extremadamente duradera. Desde que este sistema de trampas de residuos sólidos para desagües fue desarrollado, se han instalado de manera exitosa en varios lugares en Malasia.



Figura 4.11. Trampa de residuos sólidos para alcantarillados canalizados.

4.3.2.4 Desarenadores

En los afluentes a las PTARs usualmente llega una gran cantidad de sólidos en suspensión con tamaños y densidades diferentes. Como es bien sabido, las heces humanas y buena parte de los residuos orgánicos generados a nivel doméstico poseen una baja densidad y representan una fracción importante de la materia orgánica -junto a la fracción disuelta- que deberá ser estabilizada a través de las unidades de tratamiento primario y secundario; sin embargo, las aguas residuales domésticas, las de origen institucional, de origen industrial, y las aguas lluvias (en el caso de alcantarillados combinados) transportan una considerable cantidad de sólidos inorgánicos con densidad muy superior a la del agua, cuya remoción puede ser realizada por medio de la fuerza de la gravedad. La separación del material particulado más denso y material orgánico de tamaño significativo del agua se realiza por medio de la implementación

de desarenadores, en los que el agua residual experimenta un movimiento horizontal con disminución de la velocidad de flujo lo que propicia la sedimentación de sólidos como arenas, agregados, semillas de frutas y pedazos de alimentos entre otros. En general, se instalan dos desarenadores dispuestos en paralelo para facilitar su operación y mantenimiento de manera alternada, algunos ejemplos de este tipo de unidades de pretratamiento se ilustran a continuación en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Desarenador con dos cámaras en paralelo funcionando de manera simultánea en las PTAR del municipio Santa Fé do Sul, Sao Paulo-Brasil (a) y Ginebra, Valle del Cauca-Colombia (b); Desarenador con dos cámaras en paralelo funcionando de manera alternada en la PTAR de Ilha Solteira, São Paulo-Brasil.

La manera adecuada de operar los desarenadores se ilustró en la Figura 4.11c, ya que al alternar su funcionamiento se propicia la oportuna remoción de los sólidos acumulados en una cámara mientras la otra se opera con el caudal total de la PTAR. Los ciclos de operación de las dos cámaras dependerán de la época del año y del tipo de alcantarillado disponible. Un ejemplo de los efectos de la implementación de un alcantarillado combinado en una región con una cuenca tributaria muy grande, y algunas decisiones adicionales de diseño se presentan a continuación en la Figura 4.13.



Figura 4.13. Unidad de rejillas y desarenador en la PTAR del municipio de Jaén, departamento de Cajamarca-Perú.

En la foto se aprecia una rejilla inclinada con gran espaciamiento entre barras, y a la derecha de la unidad de entrada se observa una rejilla vertical que permite el paso del agua en el momento en que las obstrucciones de la rejilla inclinada sean excesivas o en los casos que el caudal de entrada supere la capacidad de paso de la unidad inclinada; de igual manera se puede constituir en un by-pass para mantenimiento de la rejilla. En el extremo derecho de la foto se aprecian cantos rodados, que en época de lluvias los transportaba el alcantarillado combinado y que se retiraron oportunamente para desobstruir la sección hidráulica. La situación antes comentada genera efectos negativos sobre el sistema de pretratamiento por la llegada de material de gran tamaño, grandes cantidades de sólidos densos tales como arenas y gravillas, que en épocas de caudales pico no son retenidas por el desarenador e ingresan a las unidades de tratamiento primario y secundario reduciendo progresivamente su volumen útil; como complemento a ello el ingreso de grandes caudales de afluente altamente diluido afecta la estabilidad de las comunidades biológicas encargadas del tratamiento de las aguas residuales.

4.3.2.5 Trampas de grasa para servicios de preparación y suministro de alimentos

Las trampas e interceptores de grasa remueven las grasas y aceites, que son subproductos de la mayoría de operaciones de preparación, procesamiento y suministro de alimentos. El manejo de grasas y aceites es un área de fundamental interés para los restaurantes y grandes cocinas, que de ser ignorados pueden obstruir fácilmente las alcantarillas de las edificaciones hacia los sistemas de tratamiento y agregarse a las cargas de aguas residuales que llegarán a las instalaciones de tratamiento localizadas aguas abajo. Existen tres tipos de dispositivos para el manejo de grasa común: trampas de grasa de pequeño tamaño y para soluciones individuales, localizadas inmediatamente debajo de las unidades de lavado de platos; interceptor de grasa localizadas en exteriores; interceptor de grasa de alta eficiencia (Figura 4.14).

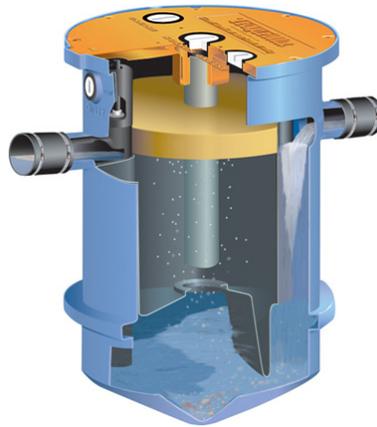


Figura 4.14. Interceptor de grasa de alta eficiencia
(Fuente: Thermaco Inc. 2023).

Los costos de capital y operación y mantenimiento, el espacio requerido para su instalación, la eficiencia y otros aspectos de estos dispositivos pueden variar significativamente. Independientemente del tipo de unidad, todas requieren de un dimensionamiento adecuado, de limpieza regular, procedimientos de recolección y almacenamiento de grasas y, de ser posible, un procedimiento para el reciclaje y procesamiento de grasas para transformarlas en productos que generen valor agregado.

En lo que se refiere al manejo de las grasas como solución a la disposición de efluentes de manera colectiva a continuación se presenta informaciónes relativas a la estrategia aplicada en un municipio tailandés y posteriormente sobre el manejo de las grasas a una escala del nivel comercial con una experiencia exitosa en Filipinas.



Manejo de la grasa en el municipio de Muangklang, Tailandia:

En 2011, a través de la asistencia del Instituto para Estrategias Ambientales Globales (IGES, por sus siglas en inglés), el municipio de Muangklang, al norte de Tailandia instituyó un programa de manejo de grasa de origen comercial. Fue un esfuerzo cooperativo entre el gobierno local y los operadores de servicios de alimentos a nivel comercial. Los operadores comerciales instalaron trampas de grasa y el gobierno local se encarga de recolectar y secar la grasa, la cual se utiliza para dar energía al centro de sacrificio de ganado de la comunidad. Este es un ejemplo de un programa de manejo de residuos para generación de energía que creó puestos de trabajo y oportunidades de desarrollo económico mediante el abordaje de un problema y la generación de su respectiva solución a una importante fuente de contaminación en el municipio.



Figura 4.15. Ejemplo del manejo de grasas de origen comercial en el municipio de Muangklang, Tailandia. a) trabajadores instalan una trampa de grasas en un restaurante de barrio; b) trampa de grasas antes de su limpieza; c) grasa seca almacenada para su posterior uso; d) grasa utilizada para calentar ollas en un centro de sacrificio de ganado. Fuente: (IGES, 2012).



Manejo de la grasa en el municipio de Muangklang, Tailandia:

Red RibbonBake Shops es una cadena de restaurantes que operan en Filipinas y usan trampas de grasa debajo del lavadero en sus instalaciones; son cocinas de servicio completo con preparación de alimentos y lavado de utensilios. Una trampa de grasas típica está conectada a las instalaciones de lavado para su fácil acceso, lo cual se hace deslizando la mesa de trabajo (al extremo izquierdo de la Figura 4.16). La trampa de grasa es la caja de metal, localizada inmediatamente por debajo del balde rojo.



Figura 4.16. Trampa de grasa debajo del lavaplatos

Los restaurantes incorporan el manejo de la grasa en su estrategia global de manejo de aguas residuales, basada en la implementación de un tanque séptico, el cual se encuentra localizado debajo de la calle (Figura 4.17) y que canaliza su efluente hacia el sistema de alcantarillado común.



Figura 4.17. Hoja de registro del horario de limpieza de las trampas de grasa.

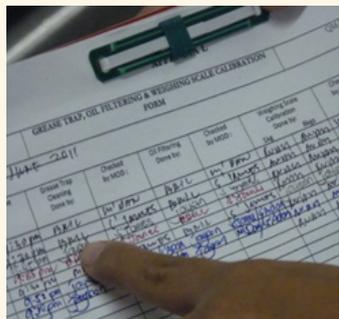


Figura 4.18. Hoja de registro del horario de limpieza de las trampas de grasa.

Los trabajadores deben revisar y limpiar las trampas de grasa una vez al día. Las trampas se limpian manualmente, la grasa se coloca en bolsas plásticas selladas y se manejan como residuos sólidos. El manejo sigue unos pasos para garantizar la operación adecuada de las trampas de grasa, entre los que se encuentran los que se indican a continuación.

1. Los administradores capacitan al personal de cocina en prácticas adecuadas para limpieza de trampas de grasa; también se observa y se registra la hora y la fecha de las operaciones de limpieza (Figura 4.18).
2. Los trabajadores limpian en seco las ollas y cacerolas grasosas antes de colocarlas en el lavaplatos para minimizar la cantidad de grasa que pasará por el desagüe.
3. La administración usa el control de temperatura para operar el equipo de lavaplatos. La temperatura del agua se mantiene a menos de 60°C para ayudar a maximizar la efectividad de la trampa de grasa.



Guía general de manejo para dispositivos de pretratamiento:

- Asegúrese de que el dispositivo de pretratamiento esté dimensionado para los caudales pico.
- Desarrolle procedimientos para monitorear y dar servicio a los dispositivos de pretratamiento.
- Determine de antemano cómo serán manejados y eliminados los desechos de los dispositivos de pretratamiento.
- Determine si puede haber usos benéficos para los desechos capturados por dichos dispositivos.
- Siga las mejores prácticas de manejo para las trampas de grasa y las trampas de pelusa.

4.4 CONDUCCIÓN

La conducción se refiere al transporte de las aguas residuales desde la edificación hasta los componentes de tratamiento, desde un componente de tratamiento hasta el siguiente, y luego hacia su dispersión, descarga (vertimiento) o reutilización final. Dicho transporte se puede lograr mediante tuberías combinadas que transportan aguas servidas y aguas lluvias; mediante sistemas de alcantarillados sanitarios separados de los flujos de aguas lluvias; o mediante vaciado y transporte por tracción humana o mecanizada, propios de los programas de manejo de lodos fecales. Para este texto, solo se considerará la red de tuberías, canales y equipo asociado y no se considerará el transporte manual de lodos fecales.

Varios tipos de sistemas de alcantarillado se usan comúnmente dentro del SDMAR, los cuales se listan a continuación:

Alcantarillados de edificaciones — Las tuberías y accesorios conectados directamente a las edificaciones que transportan aguas servidas hacia otros alcantarillados u obras de tratamiento. Este tipo de alcantarillados también se conocen como alcantarillados laterales (Figura 4.19).

Alcantarillados simplificados — También llamados alcantarillados en condominio, se refieren a una red compartida de tuberías de alcantarillado usualmente con baja pendiente y a poca profundidad que se instalan dentro de los límites de la propiedad y no debajo de las calles.

Alcantarillados libres de sólidos — También conocidos como alcantarillados de diámetro pequeño o alcantarillados de efluentes, usan tanques sépticos (o tanques interceptores) para la separación de sólidos y transportan las aguas servidas sedimentadas hacia las obras de tratamiento complementarias.

Alcantarillados a presión — Sistemas de bombeo de efluentes del tanque séptico que usan tanques sépticos y pequeñas estaciones de bombeo para recolectar, sedimentar y trasladar las aguas servidas sedimentadas hacia las instalaciones de tratamiento posteriores a través de tuberías de menor diámetro.



Figura 4.19. Construcción de alcantarillados que carecen de pozos de limpieza y accesorios sanitarios adecuados, complicando su operación y mantenimiento.

Estos son algunos de los tipos más comunes de alcantarillados disponibles para SDMAR específicos. Aunque los alcantarillados de gran diámetro (centralizados) para municipalidades o centros urbanos densos pueden ser de tipo sanitario (únicamente para aguas residuales) o combinados (combinación de aguas residuales y aguas lluvias), para las aplicaciones de SDMAR, los alcantarillados casi siempre son diseñados únicamente para aguas residuales.

4.4.1 Alcantarillados convencionales por gravedad para pequeños proyectos de SDMAR

Como el tipo más básico de alcantarillado, el alcantarillado de una edificación (que regularmente usa la gravedad como el mecanismo para movilizar el flujo) toma las aguas residuales de la fuente hacia el primer paso del SDMAR. La estrategia global para el diseño del alcantarillado de edificaciones y similares consiste en procurar la conducción de las aguas servidas desde el punto de generación hasta el punto de tratamiento con la mínima obstrucción posible. Esto se logra al garantizar el tipo adecuado de tubería, el dimensionamiento de los tubos para transportar los caudales pico, el uso de curvas en lugar de codos y la instalación de suficientes pozos de limpieza e inspección para llevar a cabo el mantenimiento rutinario y de emergencia.⁸

⁸ Para más información general sobre las alcantarillas convencionales trabajando por gravedad, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014).

A continuación, se presenta una guía básica y un proceso, paso a paso, para instalar estos y otros tipos de alcantarillados.

- **Distribución** – Determine la ruta más apropiada para el alcantarillado principal que correrá desde el desagüe final del colector principal de la edificación hasta el sistema de tratamiento o alcantarillado común. Mida la longitud total del recorrido del alcantarillado.
- **Pendiente** – La pendiente de la tubería del alcantarillado varía típicamente entre el 1 % y el 2 %. Se pueden considerar otras pendientes para cada caso en particular, con el apoyo de criterios ingenieriles adecuados. Determine la elevación (cota) de la tubería del alcantarillado en el punto donde abandona la edificación y calcule la distancia desde este hasta el primer componente del SDMAR. Esto permitirá determinar la cota para la entrada al SDMAR.
- Adopte los procedimientos que se relacionan a continuación:

13. Projete una línea de nivel desde la edificación en el punto donde el alcantarillado la abandonará hasta el punto donde la tubería se conectará con el tubo principal de alcantarillado o con la primera unidad de tratamiento del SDMAR; como, por ejemplo, un tanque séptico o (Figura 4.20).

14. Fije dicha línea a una estaca en ambos puntos para conservarla por encima del suelo y use un nivel de precisión para mantener el alineamiento horizontal.

15. Desde el inicio del tramo de tubería baje el extremo de la línea en el tubo principal la distancia necesaria para obtener la pendiente adecuada. Por ejemplo, para un trayecto horizontal de 100 m y una pendiente del 2%, se bajará la línea 2 m; para un trayecto de 25 m, bajará 0,5 m y así sucesivamente, de manera proporcional para otras pendientes.

16. Use una mira para determinar la diferencia de niveles entre la línea de nivel horizontal hasta el fondo del desagüe donde el tubo abandona la edificación, use dicho valor como guía para determinar la profundidad de la zanja a excavar a lo largo del recorrido de la tubería.

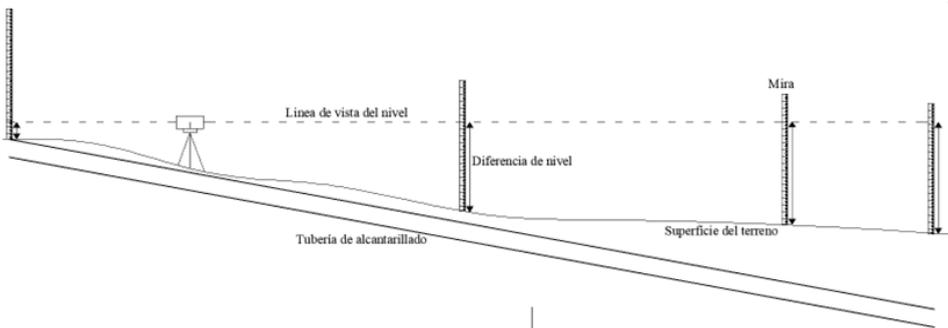


Figura 4.20. Uso del nivel de salida de la edificación para definir los cambios de elevación del terreno desde un plano horizontal y su distancia a la tubería del alcantarillado y para revisar la pendiente de los lechos de excavación para la tubería.

- **Excave la zanja** — Asegúrese de excavar 10 cm adicionales para dar lugar al material de cimiento o base que soportará la tubería.
- **Coloque el material de base** — Use arena o piedras pequeñas y pase un rastrillo para obtener una superficie homogénea y con la pendiente adecuada, tal como se describió anteriormente.
- **Coloque la tubería en la zanja** — Comience fijando la tubería, iniciando desde la salida de la edificación. Asegúrese de instalar los pozos de limpieza o inspección según sea necesario por un cambio de dirección en el sentido horizontal o de pendiente, cuide que no haya material térreo o escombros cerca de la tubería de alcantarillado.
- **Haga la conexión final de la tubería** — Revise nuevamente la pendiente y haga los ajustes necesarios agregando o removiendo el material de base alrededor de la tubería. Asegúrese de que las juntas de los tubos estén adecuadamente apoyadas sobre la base. Cuando obtenga la pendiente adecuada, rellene los espacios por debajo de la tubería con material de base.
- **Realice pruebas de fugas en la tubería** — Instale tapones en todos los pozos de limpieza, con excepción del más alto y tape el extremo de la tubería de alcantarillado. Llene la tubería con agua desde el pozo de limpieza que esté más elevado. Observe el nivel del agua en la tubería; si baja más de 0,5 cm en 1 hora, será necesario reparar las fugas, ya que en dicho momento la zanja aún no se ha rellenado, será fácil detectar los puntos de las fugas.
- **Rellene la zanja** — Cuando esté seguro de que la tubería está instalada con la pendiente adecuada y que posee hermeticidad, llene la zanja cuidadosamente con el resto de material de base alrededor de la tubería y cubra con una capa de tierra. Compacte el suelo a una pendiente tal que permita que el agua superficial fluya alejándose del sistema.



Consideraciones para el diseño de alcantarillados en SDMAR:

- Diseñe y planifique los sistemas de alcantarillado mediante la ecuación de Manning usando materiales de tuberías disponibles a nivel local.
- Diseñe sistemas de alcantarillado con dispositivos de limpieza y mantenimiento adecuado según las siguientes consideraciones: a 1 m de cada edificación, a cada 15 m de longitud lineal, en juntas laterales y en cambios de dirección de 90 grados.
- Asegúrese de que todas las zanjas para soporte de tuberías de alcantarillado tengan una base de arena, agregado o tierra compactada libre de objetos cortantes que puedan dañar las tuberías.
- Asegúrese de que todas las juntas de la tubería del alcantarillado presenten conexiones adecuadas (pegadas o con juntas a presión)

según los requisitos del fabricante y que sean debidamente sometidas a pruebas de fugas (descritas anteriormente) antes de la aplicación del relleno con material térreo.

- Rellene las zanjas del alcantarillado después de completar la prueba de fugas y luego compacte y nivele el material de relleno de la zanja (siguiendo la configuración del terreno) para drenar el agua superficial de la trayectoria del alcantarillado.
- Tenga en cuenta lo mucho que depende la selección del tipo de alcantarillado de la pendiente. Las tuberías de alcantarillado que requieran de una trayectoria ascendente necesitarán de bombeo y deberán ser utilizados tubo sistemas para presión; adicionalmente, en aquellos lugares con pendiente muy pronunciada se requiere la inclusión de alcantarillados con tramos adecuadamente escalonados.

4.4.2 Alcantarillados simplificados

Los alcantarillados simplificados recolectan las aguas residuales de domicilios y las conducen a través de tuberías de pequeño diámetro con una baja pendiente, usualmente instaladas en la zona frontal o la zona trasera de las viviendas. Por manejar caudales bajos su instalación y operación son menos costosas debido a la forma como se incorporan:

- Tubería de diámetro pequeño (del orden de 10 cm), que para trayectos largos resulta en ahorros significativos hasta del 20 por ciento del costo de la tubería convencional, tal como se ha observado en Bolivia (Foster, 2001)
- Bajas profundidades y pendientes (del orden del 0,5 %) que requieren menos excavación, y por lo tanto, resultan en ahorros del 45 al 75 por ciento en los costos relativos a la excavación de los alcantarillados típicos (Foster, 2001)
- Instalación de tuberías de alcantarillado dentro de los linderos de la propiedad en lugar de ubicarlos por debajo de las vías vehiculares, lo que permite aumentar el número de conexiones domésticas y reducir el uso de tuberías

En general, estos ahorros en los costos pueden llegar al 40 por ciento, incluso cuando se toma en cuenta el valor de la mano de obra de la comunidad, el tiempo de operación y mantenimiento, y la capacitación para operadores del sistema a través de miembros de la comunidad, situaciones que pueden resultar en relaciones costo-beneficio favorables (Foster, 2001). A pesar de utilizar diámetros pequeños y bajas pendientes, tales alcantarillados pueden recibir caudales grandes, hasta del orden de 120 m³/d para el caso de tuberías de 10 cm de diámetro con pendiente del 0,5 % (Mara et al., 2010); sin embargo, los usuarios usualmente requieren educación adicional sobre el uso adecuado de estos sistemas sanitarios para que los sólidos de gran tamaño, residuos sólidos domésticos y grasa se mantengan alejados de las aguas residuales.

Los proyectos de alcantarillado simplificado dependen de programas de operación y mantenimiento efectivos y bien coordinados, liderados por los residentes, ya que los sistemas se destinan a adaptarlos y manejarlos por la propia comunidad. Esto implica eliminar las obstrucciones al flujo de las aguas residuales y revisar que el sistema funcione, lo que se logra con el acceso a las cámaras de inspección que sustituyen a los pozos de inspección, que presentan costos más altos y que suelen usarse en los alcantarillados por gravedad convencionales. Los programas de manejo de los alcantarillados simplificados usualmente asignan responsabilidades a los trabajadores locales, quienes dan mantenimiento a los sistemas de alcantarillado comunitarios a cambio de precios menores en los servicios de saneamiento. Por su parte, la administración municipal o los funcionarios del servicio de saneamiento conservan la responsabilidad de operación y mantenimiento de las redes y tuberías principales más grandes.⁹

4.4.3 Alcantarillados libres de sólidos

Son una extensión del concepto de alcantarillado simplificado. Los alcantarillados libres de sólidos están conformados por tuberías de menor diámetro (al menos 7,5 cm), de baja pendiente y funcionan por la fuerza de la gravedad, y dependen de la operación y mantenimiento de la comunidad. Sin embargo, requieren de un tanque séptico u otro dispositivo de tratamiento primario para realizar una adecuada remoción de los sólidos. Los alcantarillados libres de sólidos son de relativamente bajo costo, son sencillos de diseñar, instalar y mantener y poseen mayor flexibilidad que los alcantarillados simplificados porque tienen menor riesgo de obstrucción. Esto propicia diseños que pueden usar pendientes más bajas y variables. Dada la necesidad de los tanques sépticos, estos sistemas requieren programas organizados de eliminación de lodos.¹⁰

4.4.4 Alcantarillados a presión

La opinión tradicional de los expertos en desarrollo ha sido que los sistemas de saneamiento pasivo son mejores que las tecnologías mecanizadas y que por razones de sostenibilidad, las tecnologías que requieren electricidad y que tienen partes móviles deberían ser evitadas. A medida que aumentan las capacidades técnicas de una comunidad, se pueden buscar nuevas y mejores formas de resolver sus problemas de aguas residuales. En algunos casos, usar estaciones sencillas de bombeo de efluentes permite estos enfoques alternativos, que

⁹ Para más información general acerca de los alcantarillados simplificados, consulte el *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento* (Tilley et al., 2014).

¹⁰ Para una perspectiva general básica de los alcantarillados libres de sólidos, consulte el *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento* (Tilley et al., 2014).



pueden ahorrar dinero y mejorar la sostenibilidad comparados con los sistemas no mecanizados. Esto es especialmente cierto en áreas con restricciones de espacio donde el uso de una bomba de efluentes hace posible dar tratamiento más completo a las aguas residuales en mejores lugares o mediante el uso de ciertas tecnologías de bajo costo que requieren menos espacio.

En general, los dos principales tipos de alcantarillados mecanizados (a presión) se pueden describir como sistemas que:

- Usan bombas trituradoras para reducir el tamaño de los sólidos presentes en las aguas servidas crudas, convirtiéndolas en partículas finas y luego bombean el líquido por medio de tuberías de menor diámetro, también conocidos como sistemas trituradores; o primero separan y sedimentan los sólidos mediante rejillas, canastas metálicas, tanques sépticos o sedimentadores, adecuadamente diseñados, de manera similar a los alcantarillados libres de sólidos. Debido a que estos sistemas utilizan bombas, también se conocen como alcantarillados con bombeo de efluentes de tanque séptico.

Los sistemas de alcantarillados trituradores son más caros que los alcantarillados asociados a sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico y necesitan de labores de operación y mantenimiento más frecuentes y especializadas, por tales razones, no son recomendables para la mayoría de países en vías de desarrollo. Cuando se requieren sistemas presurizados, los sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico (Figura 4.21) son recomendados, porque entre otros beneficios, usan tuberías de menor diámetro, entre 4 a 7 cm, mucho menores que el mínimo típico de 20 cm para los alcantarillados por gravedad convencionales, según Casey (1996). Cuando están diseñados e instalados adecuadamente, los sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico pueden ser confiables y duran años antes de que las partes requieran reemplazarse. Cuando los proveedores de servicios locales están entrenados en la instalación y mantenimiento adecuados, los sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico se vuelven parte de la cadena de valor de entrega del servicio y saneamiento local que puede ayudar a impulsar la mejora del saneamiento basado en el mercado a gran escala.¹¹

¹¹ Para una perspectiva general de la guía de diseño e información acerca de los alcantarillados a presión, consulte la hoja técnica de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2002b) en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/presewer.pdf>



Figura 4.21. Esquema del sistema de bombeo de efluentes del tanque séptico. (Fuente: Jones et al., 2001, p. 6)

4.4.4.1 Componentes del sistema de bombeo de efluentes de tanque séptico

Las siguientes secciones describen los componentes que conforman los sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico, entre los cuales se pueden mencionar:

- Bóveda o tanque (también llamado pozo) de bombeo para alojar la bomba y los eventuales equipos adicionales
- Pantallas o mallas para proteger la bomba de obstrucciones
- Bomba, típicamente de tipo sumergible para efluentes
- Componentes eléctricos, incluyendo el controlador de la bomba, alarma de nivel máximo del agua, caja de empalmes, cableado, conductos y panel de control

Pozo de bombeo con pantalla

La bóveda de la bomba es el espacio para alojar este equipo, que es el centro del sistema de alcantarillado asociado al bombeo de efluentes del tanque séptico. La bomba puede tener diversas configuraciones, una de ellas dispone de una estructura externa que aloja la bomba y los flotadores, la cual recibe el nombre de bóveda para bombeo (Figura 4.22).

Las pantallas o mallas son elementos que requieren limpieza periódica. Típicamente, las pantallas se deben limpiar lavándolas con una manguera de alta presión cada 3 meses, pueden requerir una limpieza más frecuente para caudales mayores o cuando hay tanques sépticos mal diseñados o de tamaño inadecuado antes del sistema de bombeo.

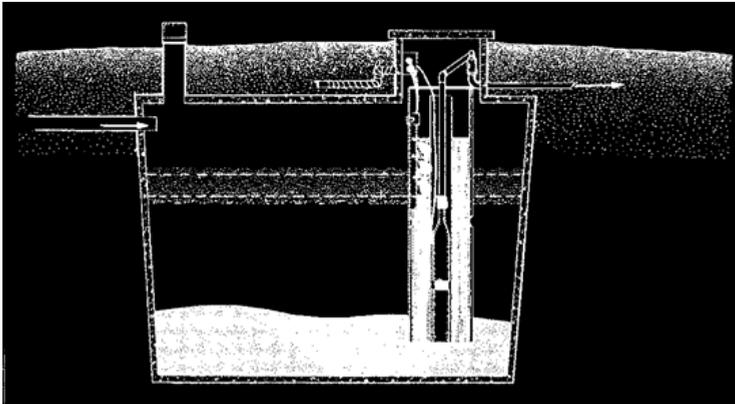


Figura 4.22. Bóveda de bombeo completa con pantalla, flotadores y conexión eléctrica. Fuente: (Hoover, 2013)

A continuación, la Figura 4.23 ilustra esquemáticamente algunos de los componentes más relevantes para un tanque de bombeo de efluentes.

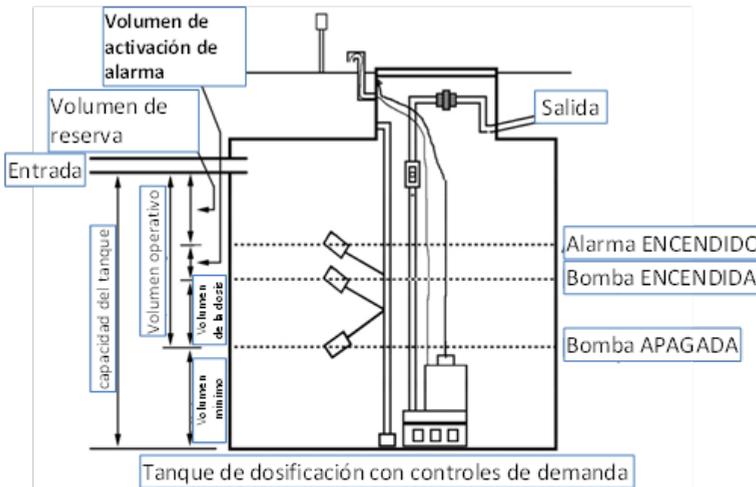


Figura 4.23. Componentes de un tanque de bombeo (Fuente: Adaptado de Lindbo, 2013)



Guía de diseño para tanques de bombeo

- Si el tanque séptico (ver Ítem 4.5.1) es lo suficientemente grande y posee dos compartimientos, considere el uso del segundo compartimiento como la bóveda para la bomba. De esa manera se eliminará la necesidad de un segundo tanque.
- Determine si la equalización del flujo es benéfica para las metas generales del SDMAR. De ser así, asegúrese de que la bóveda de la bomba esté dimensionada para mantener el volumen requerido que permita lograr la equalización del caudal.
- Las bóvedas de bombeo, al igual que los tanques sépticos, deben ser instaladas sobre una base o cimentación compactada a nivel, rellena con material granular de diámetro pequeño como arena fina, o tierra libre de rocas y escombros. Esto ayuda a prevenir los asentamientos diferenciales y/o fracturas en la estructura.
- Las bóvedas de las bombas deben ser sometidas a pruebas de fugas antes de ser puestas en servicio y estar protegidas de las fuerzas de flotabilidad –subpresión– en áreas con niveles de aguas subterráneas altas; además, debe preverse el eventual efecto producido por niveles freáticos oscilantes, situación que puede ocurrir en zonas con estratos de suelos granulares permeables que permiten el ingreso de agua en las épocas de altas precipitaciones y su migración en la época de sequía.
- Es necesario asegurar las bóvedas contra filtración de aguas lluvias garantizando hermeticidad en todos los accesorios y desviando el agua de escorrentía superficial del tanque.
- Procure dar ventilación a la bóveda comunicada con el alcantarillado de la edificación; ello será posible cuando se la logra conectar a un tubo vertical de ventilación sanitaria, que cuando se encuentra debidamente instalado deberá llegar hasta el techo de la edificación. De lo contrario, se debe instalar un conducto de ventilación especial que descargue los gases sépticos al nivel del techo. Es importante evitar, al nivel de la calle, los eventuales problemas de olores producidos por la falta de ventilación de las bóvedas para bombas.
- Garantice el fácil acceso a través de tapas con cierre hermético a los gases.
- Las pantallas deberán ser construidas con materiales que no sean susceptibles a la corrosión ni que sufran degradación bajo el ambiente de las aguas residuales. El PVC, el acrílico u otros materiales plásticos son las mejores opciones.
- También se puede seleccionar una rejilla que permita el libre paso del agua pero que retenga los sólidos más grandes; se recomienda una malla con abertura de 1 a 2 mm.
- Se debe instalar interruptores de flotador para la bomba y la alarma correspondiente para garantizar que se cumplan los requisitos de volumen mínimo, volumen operativo y volumen de reserva (Figura 4.22).

Bombas

Existen diversos modelos de bombas, con diferentes requisitos eléctricos. Las bombas sumergibles y las de turbina son dos de los tipos de bombas más comúnmente usadas en los sistemas de alcantarillados presurizados:

- Bombas sumergibles (a veces denominadas “bombas sapo”): Es el tipo de bomba de mayor uso para alcantarillados presurizados. La succión de este tipo de bomba se localiza en el fondo del tanque, y con frecuencia se ubica sobre un bloque de concreto de tal manera que permanezca estable sobre un cierto nivel de lodo acumulado. Se recomienda tener precaución en el sentido de verificar que las bombas sumergibles a utilizar correspondan a la categoría de bombas para uso con efluentes, ya que están diseñadas para soportar la presencia y el flujo de lodos
- Otra opción pueden ser las bombas centrífugas con su cuerpo en el exterior, pero con la tubería y dispositivos de succión sumergidos verificando el cumplimiento de la cabeza neta de succión positiva (correspondiente al término en inglés Net Positive Suction Head NPSH), que para el caso de aplicación con efluentes están dotadas de sellos de Teflón™ para evitar la corrosión

Cualquiera que sea el uso que se va a dar a la bomba es importante asegurarse de que los interruptores de flotador (tres de los cuales se muestran en la mitad de la Figura 4.22), estén ajustados de tal manera que la bomba siempre se encuentre totalmente sumergida. Dicha situación ayuda a que la bomba se mantenga refrigerada y alarga la vida del equipo.



Consideraciones para el diseño de alcantarillados en SDMAR:

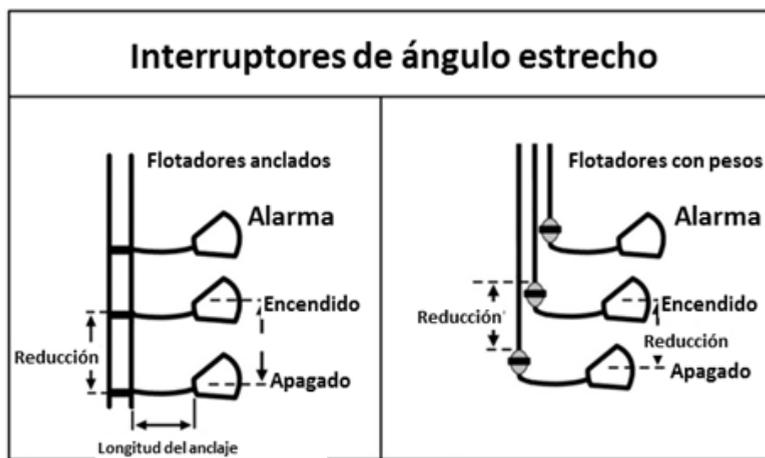
- Seleccione una bomba que posea la capacidad suficiente para entregar el caudal adecuado en conformidad con las diferencias de nivel y la longitud de la trayectoria que deberá seguir la tubería de descarga del alcantarillado, para ello se debe verificar la altura dinámica total y el cumplimiento de superar las pérdidas de carga totales tanto por fricción como las pérdidas localizadas. Se recomienda verificar que la bomba es adecuada para los objetivos del proyecto y el tipo de líquido y lodo a bombear antes de comprarla.
- Es importante verificar que la bomba corresponda al voltaje y fase de la fuente de energía disponible.
- Hay diversos tipos de bombas para sistemas de baja presión, incluyendo bombas de turbina, bombas de desplazamiento positivo, bombas sumergibles, entre otras; entre ellas se debe seleccionar la más apropiada chequeando que estén construidas con sellos de Teflón y otros componentes no corrosivos.

Componentes electrónicos

Interruptores de flotador

Controlan las operaciones de encendido y apagado de las bombas y alarmas. Para las bombas, el interruptor de flotador está conectado en línea entre el controlador y la bomba. Hay dos estilos de interruptores de flotador comúnmente disponibles; el primero usa mercurio para hacer la conexión electrónica, el segundo usa una bola de metal dispuesta dentro de la caja del interruptor para hacer la conexión. Además de ello, normalmente hay interruptores de “apagado” (donde la conexión eléctrica se interrumpe cuando el flotador se encuentra en la posición baja) e interruptores de “encendido” cuando hay una conexión eléctrica positiva donde el flotador está en la posición alta. Para los controladores de bombas use un interruptor de flotador normalmente de “apagado”; cuando el agua sube en el tanque, el interruptor de flotador sube sobre su anclaje y el ángulo hace que el mercurio o la bola completen la conexión y la bomba funcionará, por lo menos hasta que baje el nivel del agua hasta la posición mínima en el tanque y se apague nuevamente el interruptor.

Los interruptores de flotador se encuentran disponibles como interruptores de ángulo estrecho y de ángulo ancho. La Figura 4.24 ilustra estas dos configuraciones comunes de interruptores, cada una con la opción de que los flotadores estén anclados a un objeto fijo independiente (árboles flotantes) o fijados a pesos. Cualquiera de ellos está aprobado para uso general en aplicaciones de los sistemas de bombeo de efluentes de tanque séptico.



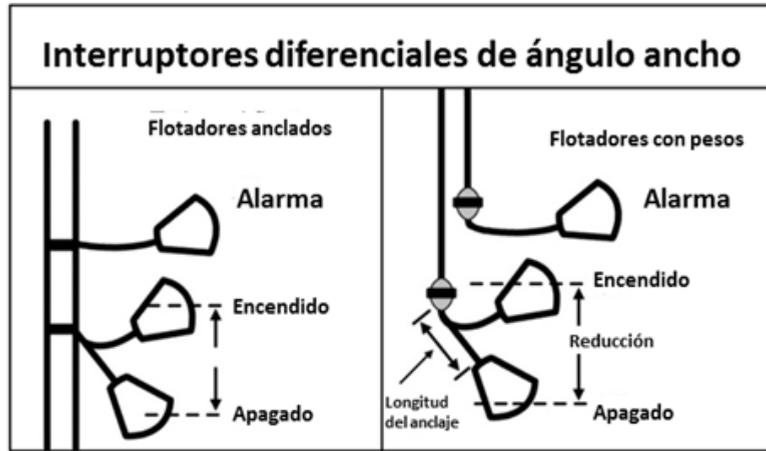


Figura 4.24. Disposición de un interruptor de flotador usando pesos o árboles de flotadores.



Consideraciones para el diseño de alcantarillados en SDMAR:

- Ancle el flotador a una elevación tal que maximice el volumen de almacenamiento en el tanque.
- Verifique que el nivel de apagado esté por encima de la parte superior de la bomba. Esto garantizará que el efluente siempre cubra la bomba, lo cual ayuda a que no se sobrecaliente y lo protege de la corrosión.
- Ajuste los interruptores de flotador para que coincidan con los niveles máximo y mínimo requerido.
- Use un interruptor de flotador de apagado redundante que protegerá la bomba de secarse en caso de condiciones inesperadas de bajo nivel de agua. Este puede ser parte de una serie de interruptores, similar a la que se muestra en la Figura 4.24.
- Asegure los flotadores de la bomba usando pesos, los cuales son fáciles de fijar y ajustar o un “árbol de flotadores” que pueda ser removido independiente de la bomba.
- En la medida de lo posible, use flotadores mecánicos para limitar el potencial de ingreso de mercurio al medio.

Alarma de máximo nivel de agua

Se usan para indicar condiciones operativas anormales de la estación de bombeo, tales como fallas en la bomba, falla del interruptor de la bomba o caudal excesivo del sistema. Las alarmas de máximo nivel de agua usan

interruptores de flotador similares al interruptor de control de la bomba que, cuando se activan, pueden enviar una alarma visual (luz roja intermitente), alarma sonora (sirena u otro sonido) y/o una señal conectada a un dispositivo de monitoreo remoto que envía una alerta hacia un teléfono inteligente.



Guía de diseño para alarmas:

Coloque el flotador de la alarma en el tanque de la bomba de tal forma que la posición de “alarma encendida” se encuentre justo sobre el nivel de activación de la bomba (hasta unos 15 cm por encima de dicho nivel). Esto propicia la capacidad máxima de almacenamiento de emergencia en el tanque y proporciona tiempo para mantenimiento antes de que las aguas residuales superen los límites de nivel y transborde el tanque. La única excepción es su uso en un panel de equalización donde se ha diseñado un espacio adicional para almacenamiento del efluente en el sistema y, por lo tanto, deberá estar localizado debajo del nivel de alarma, mientras aún proporciona suficiente capacidad de emergencia sobre la alarma de alto nivel de agua.

Cajas de conexiones

Son cajas selladas que se localizan por fuera del tanque séptico y permiten la realización de conexiones eléctricas herméticas a prueba de agua. Para los sistemas de alcantarillados presurizados, la bomba y el flotador de control de la bomba se encuentran conectados en la caja de conexiones. Con frecuencia las cajas de conexiones se construyen con material plástico o PVC y vienen equipadas con cubiertas selladas herméticas a prueba de gases (Figura 4.25).



Figura 4.25. Caja de conexiones eléctricas.



Guía de diseño para las cajas de conexiones:

- Use cajas de plástico o de PVC para minimizar la corrosión.
- Use sellos de conduit o masilla de silicona que no se contraiga (masilla no retráctil) para sellar los puertos de transferencia del cableado y así mantener fuera la humedad y los gases del alcantarillado.
- Use tuercas impermeables para hacer conexiones seguras.
- Asegúrese de que las cajas de conexiones estén elevadas por encima de la marca del nivel máximo del agua en las áreas propensas a inundación y de ser posible protéjalas de las aguas lluvias.

Panel de control y accesorios

Los controladores manejan los ciclos de apagado y encendido de la bomba a partir de la señal recibida desde los interruptores del flotador. Pueden ser digitales o análogos (Figura 4.26) y pueden disponer de ciertos accesorios, tales como:

- Medidores de tiempo y contadores de ciclo, que ayudan a que los operadores mantengan control del caudal e identifiquen condiciones operativas anormales
- Temporizadores, que se pueden usar para regular el número de ciclos de encendido y apagado (dosificación del agua residual) por día y duración de cada ciclo. Son especialmente útiles para la equalización del flujo
- Registradores de eventos, que identifican un número de condiciones de alarma y ciclos de apagado y encendido del bombeo
- Mecanismos de monitoreo remoto

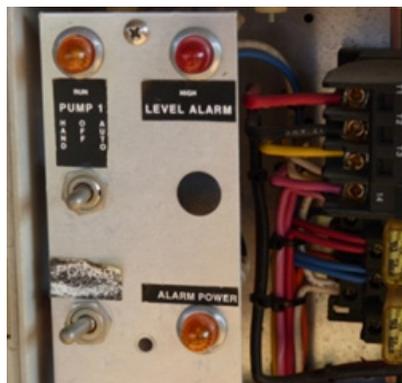


Figura 4.26. Panel de control con alarma visual, temporizador de ciclo y fusibles separados para la bomba y alarma.



Guía de diseño para los paneles de control:

- Al igual que para las cajas de conexiones, los controladores deberán estar protegidos contra los gases del alcantarillado por medio del uso de sellos conduit o masilla de silicona no retráctil en todas las conexiones de los conductos.
- Se debe usar fusibles separados para bombas y para las alarmas, de tal manera que se garantice que las alarmas continuarán funcionando si se dispara el fusible de la bomba.

Tanque para ecualización del flujo: consideraciones técnicas

La ecualización del flujo, comentada en el Capítulo 3, usa una configuración de sistema de bombas similar a la que se ha descrito para los sistemas de bombeo de efluentes de tanques séptico (Figura 4.27). Para las aplicaciones de sistemas de bombeo de efluentes del tanque séptico, el volumen operativo (volumen promedio diario más el aumento repentino de volumen—flujo extra que necesita ser ecualizado) determina la capacidad general requerida para el tanque. Aunque se usa el mismo equipo discutido hasta ahora, también se requiere de un panel de control especializado con un temporizador programable.

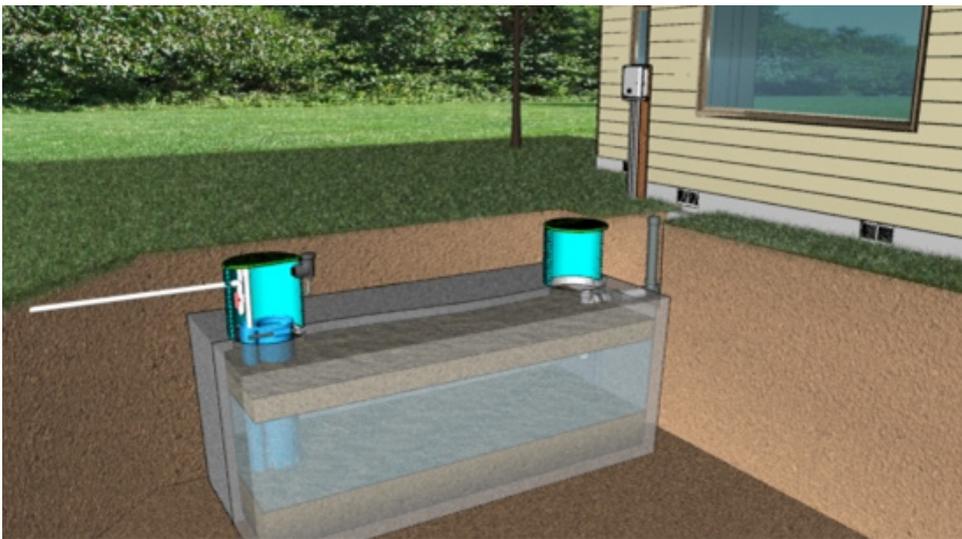


Figura 4.27. Sistemas de bombeo de efluentes del tanque séptico.
(Fuente: Orenco Systems Inc., 2010)

4.5 Tratamiento primario

Después del pretratamiento, el tratamiento primario logra la reducción inicial del material orgánico y sólidos suspendidos para que dichos contaminantes no limiten la eficiencia de las etapas de tratamiento posteriores. Las principales tecnologías de tratamiento primario son los tanques sépticos, los reactores anaerobios con deflectores (ABR: *Anaerobic Baffled Reactors*), sistemas de biodigestores y lagunas anaerobias. Aunque las lagunas anaerobias pueden lograr la remoción de sólidos trabajando de manera independiente, en áreas con amplia disponibilidad de terreno, en la mayoría de los casos se usan en serie con otros tipos de lagunas y por ello serán descritas con más detalle en la Sección 4.6 (destinada al tratamiento secundario).

4.5.1 Tanques sépticos

Los tanques sépticos son cámaras herméticas a prueba de agua, de bajo costo, hechas de fibra de vidrio, concreto, PVC u otros materiales sintéticos, que remueven parte de los sólidos y de la materia orgánica del agua residual por medio de la sedimentación y la digestión anaerobia. Los tanques sépticos, un ejemplo de los cuales se muestra en la Figura 4.28, tienen un mínimo de dos compartimientos separados por un deflector que ayuda a retener los sólidos y la nata o material flotante. La nata se compone de aceites y grasas de cocina que flotan en la superficie, mientras que los sólidos más pesados se sedimentan en el fondo para formar una capa de lodo.

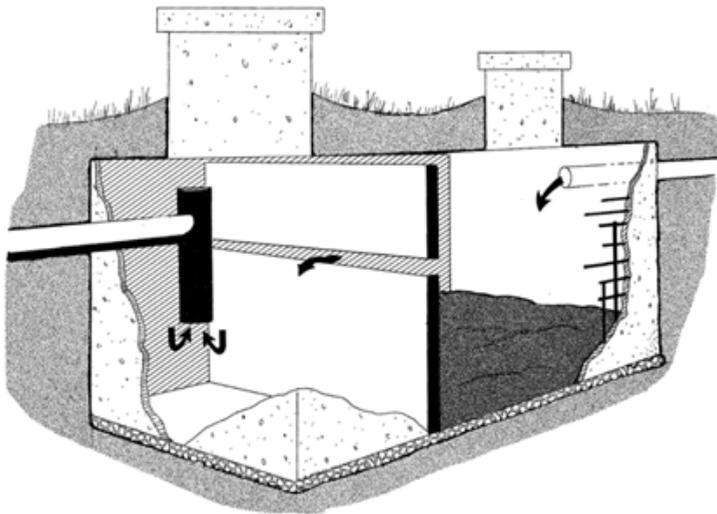


Figura 4.28. Vista de la sección transversal de un tanque séptico (Fuente: Adaptada de Osmond et al., 1997, p. 10)

Los tanques sépticos favorecen la digestión anaerobia, que ayuda a descomponer los sólidos en el tiempo; pero, ya que con la tasa de acumulación de sólidos es mayor que la de su digestión, el lodo debe vaciarse periódicamente. Esto implica la necesidad de una fácil accesibilidad para vaciar con camiones aspiradores. La Figura 4.29, en el lado izquierdo, se coloca el acero de refuerzo para el posterior vertimiento del concreto que formará las paredes y el fondo de un tanque séptico construido en la costa pacífica colombiana. En la imagen de la derecha se aprecian las tapas de acceso para las dos cámaras del tanque séptico en mención.

a)



b)



Figura 4.29. (a) Colocación de la malla de refuerzo para paredes y fondo de un tanque séptico construido para una escuela rural en el municipio de Tumaco, departamento de Nariño, Colombia (b) losa de cubierta del tanque con tapas de acceso a las cámaras

Los tanques sépticos, en función de la cantidad de habitantes a atender, pueden implementarse mediante sistemas prefabricados de pequeño tamaño, o puede optarse por su construcción in situ; la Figura 4.30 ilustra ejemplos de ambos tipos de alternativas.



Figura 4.30. Tanque séptico prefabricado (b) tanque séptico construido en el lugar.

En la fotografía de la izquierda se aprecia un tanque séptico prefabricado en material plástico y que forma parte de la PTAR del barrio Coelhas 1. En la fotografía de la derecha se ilustra un tanque séptico construido in situ que antecede a un biofiltro anaerobio con medio soporte flotante y que integran las unidades de tratamiento biológico de la PTAR del barrio Romão dos Reis; ambas plantas de tratamiento se localizan en el municipio de Viçosa, Minas Gerais-Brasil.¹²

4.5.2 Reactores anaerobios con deflectores

Los reactores anaerobios con deflectores pueden ser considerados como tanques sépticos más grandes (y mejorados). Usan algunos de los mismos procesos, pero pueden lograr una mayor eficiencia. Los reactores anaerobios con deflectores, ejemplo de la Figura 4.31, envían los efluentes con flujo ascendente a través del manto de lodos granulares, donde los microorganismos atrapan y consumen los sólidos orgánicos. Los reactores anaerobios con deflectores pueden usarse para caudales mayores que los tanques sépticos y producen un efluente mejor. Al igual que los tanques sépticos, los reactores anaerobios con deflectores son relativamente de bajo costo, pueden ser construidos usando materiales y mano de obra disponibles localmente y requieren de la remoción periódica de lodos.

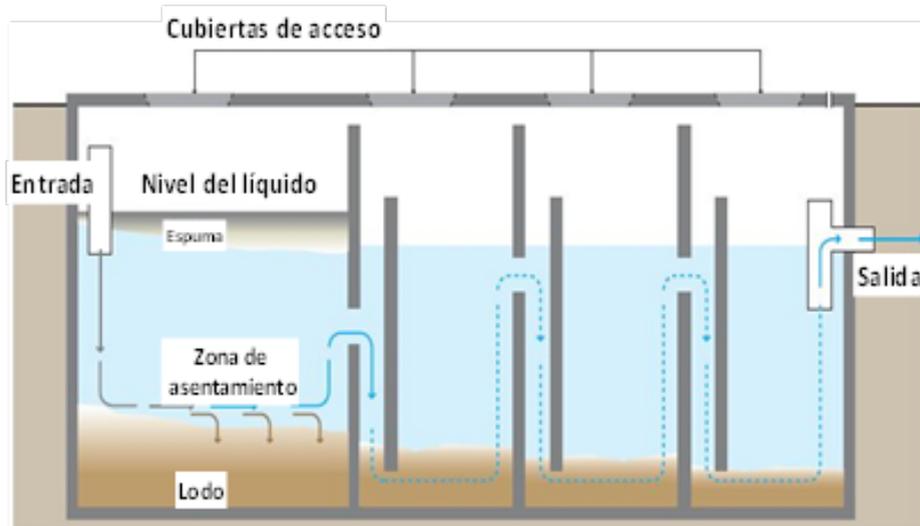


Figura 4.31. Configuración típica de reactores anaerobios con deflectores, (Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Fuente: Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 76)

¹² Para información sobre tanques sépticos, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014) y puede encontrar una discusión más detallada en Sasse (1998), páginas 69-72. Para más información técnica, consulte US EPA (2000a) Decentralized Systems Technology Fact sheet: Septic System Tank: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/septicfc.pdf>.

Para información relacionada con el diseño de los tanques sépticos a partir de la experiencia latinoamericana, consulte: Organización Panamericana de la Salud OPS/Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural UNATSABAR (2005) Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_system_tank.pdf http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/O53_Diseño_tanques_sépticos_Imhoff_lag/Diseño_tanques_sépticos_Imhoff_lagunas_estabilización.pdf; de igual manera, pueden consultarse las especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos en: OPS/CEPIS/UNATSABAR (2003) Especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_system_tank.pdf http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/sanea/etTanque_septico.pdf

Para información relacionada con la operación y el mantenimiento de tanques sépticos según la experiencia latinoamericana, consulte: OPS/CEPIS/UNATSABAR (2005) Guía para la operación y mantenimiento de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización: http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/O55_O&M_tanques_sépticos_Imhoff_lag/O&M_tanques_sépticos_Imhoff_lagunas_estabilización.pdf

Puede encontrar una referencia técnica adicional e información más detallada sobre estos sistemas adaptados para altos caudales en US EPA (2000b) Decentralized Systems Technology Fact sheet: Septic Tank Systems for Large Flow Applications: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_tank_large_flow_app.pdf.



Guía de planificación para tanques sépticos y reactores anaerobios con deflectores:

- Calcule el tamaño del reactor anaerobio e instálelo usando la guía que se describe brevemente, cuidando de garantizar el volumen adecuado, la hermeticidad a prueba de agua y las medidas para contrarrestar la subpresión o flotación.
- Asegúrese de que todos los compartimientos del tanque sean accesibles para el equipo de eliminación de lodos. Instale el tanque de tal forma que las mangueras del camión aspirador puedan llegar a él o determine otras configuraciones de eliminación de lodos antes de la instalación.
- Procure ventilarlos adecuadamente, ya sea a través de un conducto vertical de ventilación adaptado a las instalaciones de fontanería de la edificación (si las hay) o a través de conductos verticales de ventilación especiales que se encarguen de evacuar el gas del alcantarillado al nivel del techo en lugar de hacerlo al nivel de la calle.
- Asegúrese de que las puertas de acceso o pozos de inspección estén situadas sobre cada compartimiento para permitir la eliminación de lodos. Las puertas de acceso deberán ser herméticas a prueba de gases y estar equipadas con tapas con cierre.

Estrategia de diseño para tanques sépticos y reactores anaerobios con deflectores

Hay tres variables clave que determinan las características de diseño de los tanques sépticos y los reactores anaerobios con deflectores:

- Caudal (Q), que es la tasa de carga volumétrica del afluente, dado en litros/d (L/d) o metros cúbicos por día (m^3/d)
- Tiempo de retención hidráulica (TRH) que es el tiempo, en días, que una partícula del agua residual típica permanece en el interior y es tratada por el tanque séptico o por el reactor anaerobio con deflectores
- Intervalo de eliminación de lodos, que es el intervalo de tiempo en años — asumido para propósitos de diseño conservador — que el tanque séptico o el reactor anaerobio con deflectores pueden operar sin la eliminación de lodos, que es usualmente hasta que el lodo alcanza el 30 por ciento de la capacidad general de tanque séptico

Existen diversas fórmulas relacionadas con el diseño de tanques sépticos y reactores anaerobios con deflectores. Dos expresiones comunes sugieren coeficientes para determinar el tamaño o volumen de cada compartimiento con respecto al volumen total del reactor. Aunque los valores de $2/3$ y $1/3$ son bastante aceptados para tanques sépticos, los valores específicos para los reactores anaerobios con deflectores solamente corresponden a sugerencias

preliminares, ya que se necesita la aplicación de conocimientos ingenieriles específicos para el sitio en estudio. Para la fórmula del reactor anaerobio con deflectores, el valor del coeficiente para la primera cámara, concebida como cámara de sedimentación, es el doble de los valores correspondientes a los otros compartimientos, lo cual indica que deberá tener el doble de largo que los otros compartimientos que lo sucederán. En general, está permitido que la longitud de la cámara de sedimentación sea el doble o el triple de la longitud de cada uno de los otros compartimientos, de los cuales se necesita que sean por lo menos un total de cuatro para la mayoría de escenarios.¹³

Otras directrices comúnmente usadas son: que la longitud total de los tanques sépticos y reactores anaerobios con deflectores generalmente debería ser por lo menos el doble de su ancho, y que su altura oscile entre 1,5 y 2 m. Adicionalmente, para los propósitos de este texto, la capacidad efectiva de almacenamiento de líquido del tanque se toma con un valor del orden de 0,8 (igual al 80 por ciento). Este valor se refiere a la proporción del tanque séptico o reactor anaerobio con deflectores que se debería llenar con líquido/lodo, mientras que el resto permanecerá con aire.



Tanques sépticos /reactores anaerobios con deflectores y su relación con las características del suelo y aguas subterráneas:

- Profundidad del suelo: Asegúrese de realizar excavaciones de prueba en el área donde los tanques serán instalados para verificar que el espesor del suelo es suficiente para instalar los tanques. Las formaciones rocosas o lechos de roca en las zonas propuestas para los tanques pueden requerir medidas especiales para alcanzar la profundidad apropiada de las excavaciones para los tanques. Aguas subterráneas: La presencia de aguas subterráneas o la posible presencia de niveles freáticos oscilantes estacionales pueden impactar los tanques y requiere de una atención especial durante las etapas de diseño e instalación. Es fundamental sellar la parte exterior del tanque para evitar la filtración y proteger a la unidad de tratamiento contra la flotación producida por las fuerzas de subpresión.

¹³ Para una perspectiva básica adicional de los reactores anaerobios con deflectores, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014) y puede encontrar una discusión más detallada en Sasse (1998). Una tesis de maestría sobre la relación de los tanques sépticos y los reactores anaerobios con deflectores, con ejemplos de su aplicación y regulaciones relacionadas en Tailandia, se llama Upgrading conventional septictanks by integrating in-tank baffles (Wanasen, 2003), y se puede encontrar en: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SRI%20ANANT%20W%202003%20Upgrading%20Conventional%20Septic%20Tanks%20by%20Integrating%20In%20Tank%20Baffles.pdf

$$\text{Fórmula 4.1} \quad Q \cdot \text{TRH} / \text{CL} = \text{VTS}; V_{\text{TS}} \cdot 2/3 = V_{\text{TS1}}; V_{\text{TS}} \cdot 1/3 = V_{\text{TS2}};$$

Q es el caudal, TRH es el tiempo de retención hidráulica, CL es capacidad efectiva de almacenamiento de líquido del tanque

$$\text{Fórmula 4.2} \quad Q \cdot \text{HRT} / \text{CL} = V_{\text{RAB}}; V_{\text{RAB}} \cdot 0.4 = V_{\text{RAB1}}; V_{\text{RAB}} \cdot 0.2 = V_{\text{RAB2}};$$

$$V_{\text{RAB}} \cdot 0.2 = V_{\text{RAB3}}; V_{\text{RAB}} \cdot 0.2 = V_{\text{RAB4}};$$

(Donde VTS es el volumen del tanque séptico, VABR es el volumen del ABR, y donde $V_{\text{TS1..2}}$ y $V_{\text{RAB1..4}}$ son los volúmenes de los compartimientos individuales del tanque séptico en la Fórmula 4.1 y del reactor anaerobio con deflectores en la Fórmula 4.2).

4.5.3 Digestores anaerobios

La biodigestión es un proceso de fermentación anaerobia del tratamiento de aguas residuales que genera como subproducto biogás rico en metano. Para aplicaciones de SDMAR, la digestión anaerobia se usa principalmente para hatos ganaderos y para viviendas que crían pocas unidades de ganado, ello debido a que el proceso requiere aguas residuales con elevadas concentraciones de contaminantes para generar volúmenes utilizables de metano. Los pequeños agricultores en Asia y África han utilizado el proceso por décadas para manejar sus residuos humanos y agrícolas con buenos resultados. Los sistemas requieren labores continuas de operación y mantenimiento, la recompensa obtenida por su adecuada operación es la generación de suficiente energía para satisfacer al menos las necesidades de cocina de una familia.

La estructura del digestor de una cámara suele ser de tres modelos principales: tambor flotante, domo fijo o sistema tubular de flujo pistón (Figura 4.32). Aunque cada uno de ellos tiene sus propias ventajas, desventajas y regiones de mayor uso, todos degradan anaeróbicamente las aguas residuales, el estiércol y/o los desechos verdes (de cosechas) por medio del proceso de fermentación, el cual forma metano que asciende del lodo hasta un sistema de recolección de gases. Esta característica requiere atención adicional en el proceso de diseño para garantizar la recolección segura del metano capturado. Tales sistemas están equipados con válvulas de reducción de presión y sistemas de quema del gas para proteger a los trabajadores e instalaciones de eventuales explosiones catastróficas. En general, el diseño e implementación de estos elementos característicos requiere de la aplicación de conocimientos específicos de ingeniería, por parte de personal capacitado, para el sitio donde se aplicarán.



Figura 4.32. Digestores anaerobios plástico del tipo de flujo pistón, con protección adecuada de techo y cerco (a) en Guyana y (b) en el departamento de Nariño, Colombia.

Con base en lo anterior, este tipo de unidades generalmente tienen costos de construcción más altos que los tanques sépticos y deben ser diseñadas e instaladas por ingenieros calificados y contratistas entrenados para garantizar su adecuada operación a largo plazo. Esta consideración es aún más importante para unidades de biodigestores a gran escala, lagunas de estabilización cubiertas y unidades en forma de silos de mezcla completa que aceptan residuos ganaderos de granjas de gran escala.

Aunque la biodigestión se centra en una sola materia prima, tal como el estiércol de ganado, la investigación de la codigestión o la biodigestión simultánea de varias materias primas en un reactor, es prometedora. Este proceso requiere un equilibrio entre el carbono, cuya mejor fuente proviene de residuos verdes o de cosechas, y el nitrógeno, que es mejor obtenido a partir de residuos animales. Los ácidos y grasas son una materia prima adicional de residuos, que puede añadir una significativa fuente de carbono a los residuos del ganado y que podría incrementar dramáticamente la producción de metano. Esto es significativo para un programa comunitario de SDMAR, donde actividades organizadas de recolección de grasas y aceites podrían apoyar programas de codigestión como importantes fuentes de energía para las comunidades.

Las ecuaciones para dimensionamiento del digester dependen de las variables: tasa y concentración del flujo (representadas por la determinación del número y peso de los animales, número de habitantes de viviendas y/o cantidad de residuos verdes o de alimentos), tiempo de retención hidráulica

deseado y temperatura. Lo mismo se aplica al dimensionamiento estructural de estas unidades, que están más allá del alcance de este texto. La guía de diseño está contenida en Co-digestion Creator de RTI, que es un conjunto de herramientas (en expansión) útil para el dimensionamiento del tipo de biodigestor Domo chino y del sistema tubular de flujo pistón (que son tecnologías previamente probadas para flujos pequeños). Permite agregar residuos orgánicos verdes y cafés basados en la relación C:N para maximizar la generación de metano.¹⁴



Codigestión para producción incrementada de metano en Vietnam:¹⁵

Desde la década de 1980, los investigadores en la región del Delta del río Mekong en Vietnam han estado experimentando con la codigestión. Esto usualmente involucra la digestión de aguas residuales con residuos de cosechas (denominados residuos verdes) y residuos de estiércol (denominados residuos cafés) en un reactor anaerobio. El sistema que se muestra aquí, desarrollado en la Universidad de Can Tho, se conoce como el método Agricultura, Acuicultura, Ganadería, Biogás y Tratamiento, en el cual los residuos de cerdos y humanos son codigeridos para producir biogás rico en metano utilizado para cocinar y donde parte de los nutrientes son reciclados por medio de la fertilización de estanques para ayudar a cultivar peces.

El digestor anaerobio que se muestra a la derecha (el Dr. Chiem, desarrollador de la tecnología de la Universidad de Can Tho, se encuentra en



Figura 4.33. Digestor tubular de flujo pistón en Vietnam. (Fuente: Thomson, 2013).

primer plano de la Figura 4.33), es un tubo plástico con aproximadamente 1 m de diámetro y de 8 a 10 m de longitud, dependiendo del tamaño de la operación (tubo azul y blanco parcialmente enterrado). Para el caso de esta instalación, el digestor recibe residuos de 13 cerdos y de una familia de 2 adultos. El sistema se puede expandir en alguna medida, ya que para familias más grandes puede usar un reactor plástico más

¹⁵ P Ashley Thomson. Profesora y líder del Environmental Molecular Biotechnology Laboratory en Duke University, Durham, North Carolina, USA.

grande (o múltiples reactores en paralelo), siempre y cuando se cumpla con las dimensiones y principios básicos de su diseño e instalación. Las unidades plásticas verticales que se muestran a la derecha de la foto son elementos opcionales para el almacenamiento de gas. El biodigestor cuesta aproximadamente dos millones de dong vietnamitas (alrededor de \$100 dólares de EE. UU.) y dicho costo podría bajar en la medida que se acelere la comercialización y producción de digestores en masa. Esto representa alrededor de la mitad de los ingresos mensuales de operaciones en cultivos domésticos típicos de la región del Mekong.

En años recientes, el Dr. Chiem y su equipo han desarrollado opciones de tratamiento secundario para efluentes de digestores. Hay experimentos en curso con biofiltración y diferentes configuraciones de humedales artificiales (Figura 4.34) actualmente sometidos a pruebas en las instalaciones. Para el caso de los humedales, los investigadores de la Universidad de Can Tho y de la Universidad de Duke en los Estados Unidos están analizando la reducción de nutrientes y patógenos para aguas residuales tratadas por medio de humedales construidos de flujo horizontal con lechos de grava y residuos del procesamiento del coco.



Figura 4.34. Pruebas en humedales en Can Tho, Vietnam, para el tratamiento secundario del efluente del digestor. (Fuente: Thomson, 2013).

4.5.4 Otras opciones de tratamiento primario

Esta sección se ha centrado en algunas de las más importantes tecnologías usadas para el tratamiento primario en instalaciones de SDMAR. Existen otras tecnologías adecuadas que dependen de la sedimentación y/o de la biodigestión. Dos ejemplos importantes son los reactores anaerobios de



flujo ascendente con manto de lodos (UASB, por sus siglas en inglés: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) y los filtros anaerobios (AFs, por sus siglas en inglés: *anaerobic filters*).

Los UASB dependen de un flujo de agua residual estable o de la electricidad para activar una bomba que transmitirá energía al líquido para viabilizar el flujo ascensional de las aguas residuales -que se inyectan en el fondo del reactor-, que pasarán a través de un manto de lodos que posee una biomasa anaerobia altamente activa; el manto de lodos se encuentra en suspensión como fruto del propio flujo de agua residual y de la generación de gases resultado de la descomposición anaerobia. El manto de lodo contiene bacterias que, basada en una operación y mantenimiento dirigida por expertos, pueden degradar los sólidos orgánicos y eliminar una cierta fracción de patógenos.

Los filtros anaerobios son similares a los tanques sépticos, pero su segunda cámara tiene un filtro de grava que aloja bacterias (llamado sistema de película fija) que actúa de manera similar a las bacterias en los UASB. Los reactores UASB y los filtros anaerobios pueden ser mucho más eficientes en la remoción de sólidos y DBO que las tecnologías de tratamiento primario mencionadas anteriormente. Además, combinan los principios del tratamiento primario con algunos de los procesos del tratamiento secundario que se discutirán a continuación.

Los reactores UASB pueden lograr importantes niveles de remoción de la materia orgánica en la forma de DBO especialmente al operarse en condiciones de temperaturas elevadas, lo que los hace recomendables para tratar diferentes tipos de efluentes en países con climas tropicales. Algunas de sus aplicaciones se presentan en la Figura 4.35, donde se aprecian también diferentes configuraciones geométricas y materiales utilizados para su construcción. En el contexto latinoamericano, es de especial relevancia la serie de investigaciones que se han desarrollado en Brasil en torno a la aplicación de los reactores anaerobios, así como al estudio de diversas opciones para el postratamiento de sus efluentes, muchas de ellas financiadas por el gobierno Brasileño por medio del programa PROSAB (Programa de Pesquisas em Saneamento Básico); en particular, los resultados de investigaciones de tratamientos de aguas residuales sanitarias por medio de reactores anaerobios y su disposición en el suelo se pueden encontrar en (PROSAB, 1999) en el link: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosabcamposfinal.pdf>; en relación con los resultados obtenidos para diversas opciones para postratamiento de efluentes de tales reactores se encuentran en (PROSAB, 2001) en el link: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Pos_tratamento_de_efluentes_de_reatores_anaerobios.rar.¹⁶

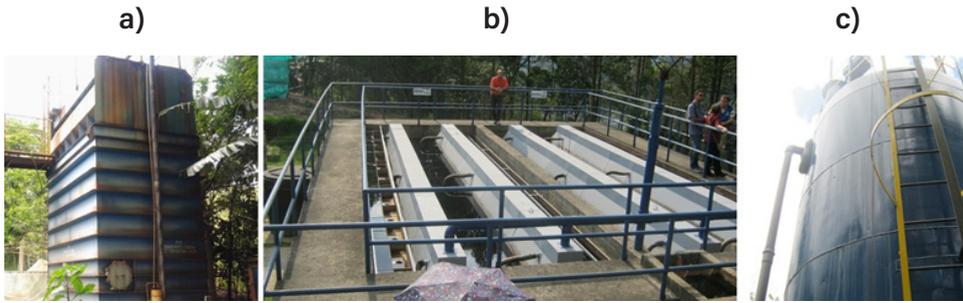


Figura 4.35. Aplicaciones de reactores UASB en el tratamiento de diferentes tipos de efluentes (a) para tratamiento de efluentes domésticos del barrio La Violeira en Viçosa, Minas Gerais-Brasil (b) para tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del municipio de Manizales, Caldas-Colombia (c) para efluentes de una industria productora de refrescos mediante un reactor de configuración cilíndrica en Nariño, Colombia.



Consideraciones sobre la selección e instalación de la tecnología de tratamiento primario:

Para determinar qué tecnología de tratamiento primario utilizar generalmente se debe considerar el volumen del líquido a tratar, la concentración de los contaminantes a remover y el eventual atractivo del biogás como un producto final. Los SDMAR residenciales pequeños que brindan servicio a cinco o menos viviendas normalmente usan tanques sépticos para el tratamiento primario; por su parte, los sistemas residenciales y comerciales más grandes pueden usar reactores anaerobios con deflectores u otras tecnologías anaerobias (especialmente lagunas anaerobias si hay suficiente terreno disponible). Si la composición de los residuos (que usualmente contienen estiércol de animales) es adecuada y se desea la generación de metano, probablemente sea preferible la implementación de uno o más digestores de biogás anaerobios. Cualquiera que sea la tecnología empleada, la eficiencia de la remoción de la materia orgánica y sólidos suspendidos usualmente estará entre el 40 y el 70 por ciento, aunque no se puede esperar una reducción significativa de patógenos.

Para instalar adecuadamente el sistema de tratamiento primario escogido, el usuario debe:

- instalar los dispositivos de tratamiento primario en áreas que garanticen el acceso al equipo de eliminación de lodos;
- incluir suficientes pozos de limpieza para lograr la eliminación de lodos, esto es particularmente relevante para los tanques sépticos y reactores anaerobios con deflectores;
- asegurarse de que las unidades de acceso de las estructuras posean tapas herméticas a prueba de gases y que sean seguras para evitar ingresos no autorizados (usando seguros);
- aplicar prácticas constructivas que garanticen hermeticidad a prueba de agua. Sellar el exterior de los tanques en áreas con niveles freáticos elevados para prevenir filtraciones;
- proporcionar una cimentación estable en suelos compactados donde los

tanques serán instalados para limitar los asentamientos diferenciales. Usar zapatas o cimientos de concreto en áreas de aguas subterráneas elevadas o niveles freáticos oscilantes para asegurar los tanques contra la flotación, y eventualmente recurrir al uso de pilotes como mecanismo de anclaje al suelo;

- proporcionar ventilación adecuada para los tanques de tratamiento primario. Asegurarse de que haya paso de gases desde cada compartimiento del tanque hasta el conducto de ventilación. Usar el conducto de ventilación vertical de la edificación únicamente si se han proporcionado codos sifón para todos los ramales de fontanería que desaguan; de lo contrario, instalar una ventilación adecuada que termine sobre la parte más alta del techo; y
- nunca se debe ventilar los gases del alcantarillado al nivel de la calle; pues solamente es recomendable la ventilación al nivel del techo.

4.6 Tratamiento secundario

Las reducciones moderadas en la materia orgánica y sólidos, logradas a través del tratamiento primario, resultan en un efluente con niveles de contaminantes que aun exceden los niveles permitidos para la descarga y reutilización seguras. El tratamiento secundario, que suele consistir en procesos aerobios que usan oxígeno para estimular las bacterias aerobias y reducir rápidamente la materia orgánica así como un importante nivel de patógenos. Lo logran diferentes sistemas, como los basados en la aplicación en el suelo, las lagunas de estabilización de aguas residuales, los humedales construidos, los biofiltros aerobios y los sistemas de tratamiento aerobio que oxigenan el efluente de forma mecánica.

Las tecnologías de tratamiento secundario que se presentan a continuación abordan la descripción de:

- Tecnologías basadas en la dispersión en el suelo, incluyendo zanjas de infiltración, alternativas de infiltración mecanizadas, sistemas de montículos e irrigación por goteo
- Humedales construidos (*wetlands* o también conocidos como humedales artificiales)
- Lagunas de estabilización para aguas residuales
- Sistemas de biofiltros
- Sistemas de tratamiento aerobio

Cabe destacar que siguen surgiendo nuevas tecnologías para tratamiento de aguas residuales, algunas parecen prometedoras. Las nuevas tecnologías se pueden considerar para usar en los sistemas de SDMAR, pero quienes decidan implementarlas deben tener precaución y adoptarlas únicamente cuando haya suficientes informaciones de respaldo por sistemas que estén en funcionamiento y en escala real.

4.6.1 Sistemas de dispersión en el suelo

Los sistemas de tratamiento basados en la dispersión en el suelo envían el efluente del tratamiento primario (usualmente del tanque séptico) a zanjas o lechos de infiltración (o también llamados lechos de lixiviación), donde el líquido percola a través de los suelos y recibe tratamiento. El tratamiento como tal se logra principalmente por medio de la degradación microbiana a través de la comunidad microbiana que vive en el suelo, que utilizan para su respiración el oxígeno presente en los espacios de los poros interpartículas. Si el área de terreno disponible es suficiente, los disponen de una profundidad adecuada, poseen buen drenaje y no se aprecian oportunidades de reutilización benéfica del efluente tratado, estos pueden ser los medios más eficaces y económicos para la dispersión segura del efluente.

4.6.1.1 Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración (mostradas en la Figura 4.36 en su secuencia típica después de un tanque séptico) se construyen mediante una serie de tuberías con perforaciones que descargan uniformemente el líquido tratado por el tanque séptico en la zanja. El efluente fluye por la grava u otro medio granular y los suelos no saturados absorben (zona vadosa, según la Figura 4.37), donde se logra el tratamiento secundario. Si los suelos están saturados con aguas subterráneas, se puede formar rápidamente una capa obstructora y habrá poca o ninguna reducción de patógenos, amenazando la salud pública y el medio ambiente; por eso hay que tener cuidado adicional para asegurarse de que los suelos son adecuados para infiltrarse en el sitio antes de instalar estos sistemas.

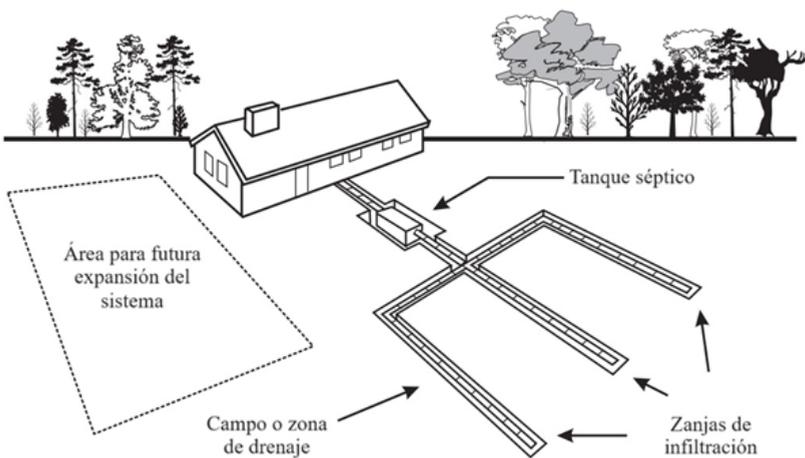


Figura 4.36. Configuración típica de un sistema de zanjas de infiltración después de un tanque séptico (Fuente: Adaptada de Hoover et al., 2016, p. 1)

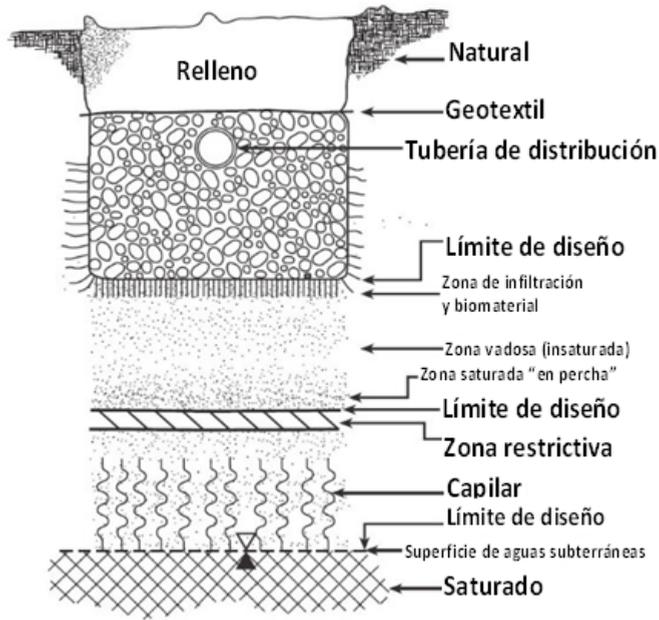


Figura 4.37. . Componente de la zanja de infiltración y posibles condiciones limitantes (Fuente: Hoover, 2013)

Es importante verificar si el terreno es adecuado siguiendo los pasos de evaluación de los suelos y del sitio tal como se describió en el Capítulo 3 para determinar que:

- Se puede calcular una adecuada tasa de infiltración admisible a largo plazo
- La profundidad del suelo es suficiente para mantener una separación de al menos 0,30 m por debajo del fondo de la zanja y el punto más bajo, bien sea del máximo nivel de las aguas subterráneas o de una zona impermeable, tal como el lecho de roca o un horizonte de arcilla
- Hay suficiente área superficial en el sitio para proporcionar el tamaño requerido de las zanjas o lechos de infiltración

Estrategia de diseño para zanjas de infiltración

La estrategia para diseñar sistemas de infiltración en el suelo consiste en determinar primero el área de la superficie de infiltración (ASI), que corresponde al área de la pared lateral (no la del fondo) de las zanjas y el área del fondo de los lechos de infiltración, y luego, determinar la mejor configuración del campo de infiltración. A continuación, se presentan las variables, las fórmulas y un proceso de diseño paso a paso, así como el desarrollo de un ejemplo.

- Caudal (Q) del afluyente a ser aplicado al suelo, dado en L/d
- Tasa de infiltración admisible a largo plazo (TILP), previamente comentada en el Capítulo 3, mediante la cual se determina cuán permeable es el suelo, específicamente en relación con cuánto afluyente puede recibir de forma segura (dado en L/m²/día)
- Profundidad del suelo (D) sobre la condición limitante más próxima a la superficie, dada en metros

Fórmula 1: $ASI = Q/TILP$.

Fórmula 2: Longitud de la zanja = $ASI/2$ (recuerde que hay dos paredes laterales por cada zanja).

Ejemplo: Un terreno nivelado posee una profundidad (o espesor) de suelo de 2,05 m sobre el nivel máximo del agua subterránea en la estación de lluvias; se ha determinado, mediante la evaluación de suelos, que la TILP es de 20 L/m²/d. El volumen de aguas residuales a tratar es de 7500 L/d. Suponga que el tanque séptico estará a 15 m de la edificación, que el campo de infiltración se localizará a 10 m del tanque séptico y que la tubería del alcantarillado sanitario de la edificación sale de esta a una profundidad de 0,25 m por debajo del nivel del andén. Determine lo siguiente:

1. La profundidad efectiva de la zanja de infiltración.
 2. La longitud requerida para la zanja de infiltración.
 3. La configuración óptima del campo de infiltración asumiendo una forma rectangular, una longitud individual máxima de la zanja de 30 m, una separación entre zanjas de 2 m y un ancho de la zanja de 1 m.
1. Profundidad efectiva:
 - a) Determine la profundidad máxima de la zanja de infiltración — si la profundidad del suelo sobre el nivel máximo de las aguas subterráneas en época lluviosa es de 2,05 m, la profundidad máxima de la zanja será de 2,05 m menos 0,30 m (separación requerida desde el fondo de la zanja hasta la característica limitante), lo cual proporciona una profundidad máxima de la zanja de 1,75 m.
 - b) Determine la profundidad de la tubería de distribución en la zanja — hay cuatro medidas a considerar:
 - Descenso (o caída del nivel) desde la superficie del suelo o desde el andén hasta el punto de salida del alcantarillado de la edificación, el cual de acuerdo a los datos suministrados estará a 0,25 m por debajo de la superficie.
 - Caída desde el punto de salida del alcantarillado de la edificación

- hasta el tanque séptico = distancia (m) * pendiente del alcantarillado del 2 por ciento = $10 \text{ m} * 0,02 = 0,20 \text{ m}$. Pérdida de carga a través del tanque séptico (valor típico) = 5 cm o 0,05 m.
- Caída desde el tanque séptico hasta la zanja de lixiviados = distancia (m) * pendiente del alcantarillado del 2 por ciento = $15 \text{ m} * 0,02 = 0,30 \text{ m}$.
 - La suma de las caídas de nivel debidas a los cuatro factores anteriores es = $0,25 \text{ m} + 0,20 \text{ m} + 0,05 \text{ m} + 0,30 \text{ m} = 0,80 \text{ m}$, que correspondería a la profundidad a la que se localizará la tubería de transporte del efluente.
- c. Determine la profundidad efectiva (por infiltración) de la zanja:
- Profundidad máxima de la zanja menos la profundidad de la tubería de lixiviados = $1,75 \text{ m} - 0,80 \text{ m} = 0,95 \text{ m}$.

2) Longitud requerida para la zanja de infiltración:

1. Primero determine el área de la superficie de infiltración. $ASI = Q/LTILP = (7,500 \text{ L/d})/(20 \text{ L/m}^2/\text{d}) = 375 \text{ m}^2$.
2. Determine la longitud (L) de la zanja. $L = ASI/(\text{profundidad efectiva}/2)$.
 - a. Longitud total de la Zanja = $375 \text{ m}^2/(0,95 \text{ m}/2 \text{ paredes laterales}) = 197 \text{ m}$.

3) Configuración óptima:

- a. Primero determine cuántas zanjas se requieren:
 - Longitud total requerida dividida entre la longitud máxima de la zanja = $197 \text{ m}/30 \text{ m} = 6,6$. Ya que el número de zanjas debe ser un número entero, es necesario redondearlo; por lo tanto, el número total de zanjas requeridas = 7;
 - Calcule la longitud de la zanja individual = $197 \text{ m}/7 = 28 \text{ m}$. En resumen, el sistema requerirá siete zanjas con 28 m de longitud cada una.
- b. Ahora determine el área total del sistema de infiltración:
 - Siete zanjas, cada una de 1 m de ancho con 2 m de separación, da una suma de 19 m de ancho total de cada campo de infiltración;
 - Área total = longitud de la zanja * ancho del campo de infiltración = $28 \text{ m} * 19 \text{ m} = 532 \text{ m}^2$.

4.6.1.2 Sistemas de infiltración alternativos no mecanizados similares a las zanjas

Cámaras de infiltración: Son adecuadas para lugares donde los suelos son aptos para realizar infiltración en el sitio, pero no hay disponibilidad de material granular, como por ejemplo la grava. Las unidades livianas y fáciles de manejar se “encajan” para su rápida instalación, se colocan en los tramos superiores del perfil de suelo para maximizar la oxigenación del efluente a partir del aire presente en los espacios de los poros del suelo y de la evapotranspiración de las raíces de las plantas (Figura 4.38).¹⁷

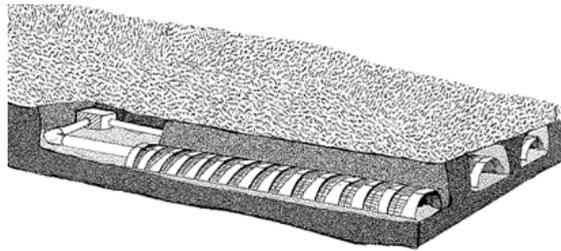


Figura 4.38. . Cámara de infiltración (Fuente: Hoover, 2013).

Lechos de Infiltración: A diferencia de las zanjas de infiltración cuyo tamaño se basa en el área de la pared lateral, la dimensión de los lechos de infiltración (Figura 4.39) se basa en el área del fondo. Los lechos pueden ser más ventajosos para las áreas donde los perfiles de suelos son relativamente poco profundos. Se recomienda cuidado durante la instalación para que el agua no se acumule en la parte superior, para ello se debe proporcionar una pendiente suave en la superficie del lecho para evacuar las aguas lluvias. Es muy importante también tener cuidado durante la instalación para evitar compactación en el fondo del lecho; para ello se recomienda caminar lo menos posible (y como complemento se debe prohibir la colocación o circulación de equipo pesado) sobre los lechos recientemente excavados, además es fundamental que no se hagan excavaciones en condiciones húmedas.

¹⁷ Para mayor y más detallada información técnica sobre las cámaras de infiltración, se recomienda consultar US EPA (2000c) *Decentralized Systems Technology Fact sheet: Septic Tank Leaching Chamber*: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/septic_tank_leaching_chamber.pdf.

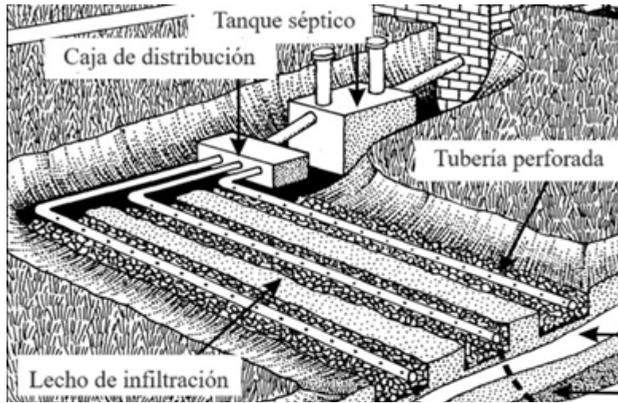


Figura 4.39. . Lecho de lixiviación (Fuente: Adaptada de Hoover et al., 2016)

Necesidad de una distribución uniforme del afluente en los sistemas de infiltración

En general, una de las claves para el funcionamiento a largo plazo de la infiltración y otros sistemas de dispersión en el suelo es la adopción de un método de distribución uniforme, el cual debe garantizar que cada zanja o sección del lecho reciba iguales cantidades de efluente. La mejor manera de lograrlo es por medio del uso de cajas de distribución, que se describen a continuación y que se ilustran en la parte superior derecha de la Figura 4.40. Aunque hay varios estilos de cajas de distribución, las construidas en plástico o en concreto junto con mampostería son las más comunes. Para sistemas más grandes, las cajas de distribución se pueden disponer en serie para permitir la distribución uniforme de flujo para un gran número de zanjas.

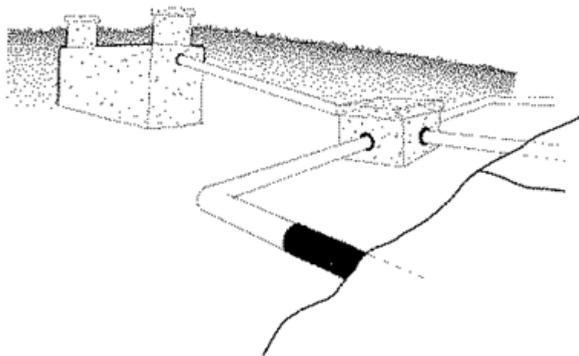


Figura 4.40. . . Caja de distribución (Fuente: Adaptada de Hoover et al., 2016, p. 1 y p. 2)

4.6.1.3 Sistemas de montículos

Los sistemas de montículos (Figura 4.41) se pueden considerar como lechos de infiltración elevados. Tales sistemas se pueden utilizar en lugares con niveles de aguas subterráneas elevados, o donde los suelos posean permeabilidad inadecuada. Para su operación el efluente del tanque séptico es bombeado al montículo, el cual está construido sobre un terraplén, que se construye usando arena gruesa de grano uniforme. La arena propicia la filtración biológica (a través de los microorganismos que se encontrarán adheridos a los granos de arena), así como la filtración física. La arena también promueve la evapotranspiración mediante el mecanismo de acción capilar, que hace que parte del efluente suba por el medio granular hacia la superficie del montículo como método de dispersión, mientras que el drenaje funcionará de forma descendente.



Guía de instalación para las cajas de distribución en concreto:

- construya un molde (formaleta) de madera alrededor de la Caja de distribución y ánclelo a la tierra;
- agregue una capa de concreto (del orden de al menos 10 centímetros) al molde y fije la caja de distribución encima de dicha capa a la elevación adecuada, según el diseño hidráulico;
- llene la caja de distribución con agua y nivélela de tal forma que todas las salidas queden a la misma elevación. Permita que el concreto se fije a la caja en posición nivelada;
- agregue más concreto dentro de la formaleta para asegurar lateralmente la caja de distribución en la posición a nivel; y
- agregue niveladores de velocidad para mejorar la distribución uniforme del flujo.

El lector podrá encontrar más información sobre niveladores de velocidad en el sitio web de productos de drenaje y sépticos de la compañía Tuf-Tite: <http://www.tuf-tite.com>.

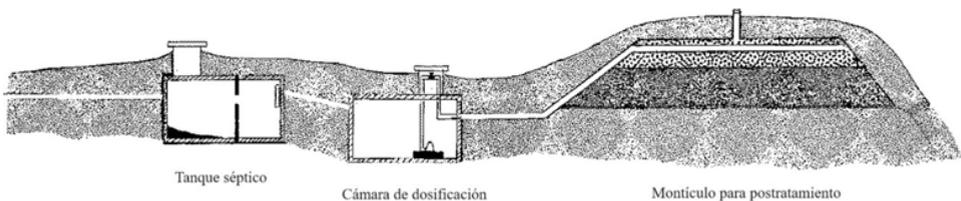


Figura 4.41. . . Sistemas de montículos dando tratamiento al efluente de un tanque séptico a través de un lecho de arena elevado (Fuente: Adaptada de US EPA, 1999a, p. 2)



Los sistemas de montículos son adecuados para tratar caudales pequeños en áreas donde hay una buena fuente de arena limpia y uniforme, así como electricidad para el respectivo bombeo. Aunque el área para el montículo debe estar relativamente a nivel, si el tanque séptico se encuentra ubicado en una zona con cota mayor a la del montículo, el sistema puede ser diseñado usando un sifón dosificador no eléctrico en lugar de un sistema de bombeo.¹⁸

4.6.1.4 Sistemas de irrigación por goteo

La irrigación por goteo es una tecnología de reúso y dispersión del efluente que ha probado ser un método muy efectivo y de bajo costo para reutilizar directamente aguas residuales para irrigación de plantas. Se ha usado exitosamente en el cultivo de plantas para jardines, grama para campos y árboles frutales y de nueces. Funciona distribuyendo pequeñas gotas del efluente directamente a la zona radicular de las plantas, minimizando el riesgo de evaporación y conservando así este recurso vital. Ya que las aguas residuales contienen nitrógeno, fósforo y micronutrientes, es un complemento ideal para los fertilizantes químicos.

Los sistemas de irrigación de efluentes por goteo se diseñan de forma distinta a los sistemas por goteo que usan agua potable. Ya que el efluente es biológicamente activo, se necesita de un mecanismo sencillo para limpiar periódicamente el tubo de goteo. En los sistemas para efluentes, esto se logra colocando el tubo de goteo en una configuración de malla cerrada. Esto se aprecia en la Figura 4.42, que es una demostración de la forma en que el sistema se dispone por debajo del suelo. En condiciones operativas, se cierra una válvula al final de la red, que fuerza la salida del efluente con pequeños emisores insertados en la tubería de goteo; cuando se lava, la válvula se abre y el efluente fluye por el tubo a alta velocidad, limpiando los segmentos de tubería.

Los sistemas de irrigación de aguas residuales por goteo suelen ser mecanizados, que usan las mismas configuraciones de bombeo del efluente, descritas antes para los alcantarillados a presión. A menudo usan una serie de válvulas solenoides (Figura 4.43) que controlan la entrega del efluente hacia diferentes zonas y adicionalmente realizan los procedimientos de lavado de forma automática.

¹⁸ Para más información técnica y detalles sobre los sistemas de montículos, consulte US EPA (1999a) *Technology Fact Sheet for Mound Systems*: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/mound.pdf>.

El tubo de irrigación por goteo suele estar instalado a entre 15 y 30 cm de profundidad por debajo de la superficie del suelo, lo que minimiza los costos de excavación. La grava, que se necesita en grandes cantidades para las zanjas de infiltración, no se usa en los campos de irrigación por goteo, así que los gastos de materiales pueden ser más bajos. El menor costo de instalación y el valor asociado con la reutilización del efluente pueden compensar los costos del equipo de bombeo.¹⁹



Figura 4.42. . Campo de goteo sobre el suelo para demostración en la Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, EE.UU.



Figura 4.43. . . Equipo mecánico para irrigación por goteo mostrando válvulas solenoides que controlan la distribución del líquido.

¹⁹ Orenco Systems, Inc. ha sido una empresa líder en el campo de la irrigación por goteo durante muchos años. Se recomienda al lector visitar el sitio web de la compañía para obtener más información, así como herramientas y guías de diseño para esta tecnología: <http://www.orenco.com/>.

4.6.2 Humedales construidos

Los humedales construidos (CW: Constructed Wetlands) son cuencas con fondo impermeable, rellenas con material granular con granulometría correspondiente a grava cuya función es soportar plantas y microorganismos. En el medio soporte se combinan los efectos para retener y degradar parcialmente la materia orgánica tanto de forma anaerobia como aerobia por medio de la actividad microbiana. Los tres tipos de humedales construidos, o humedales artificiales, son: humedales construidos de flujo superficial (Figura 4.44), de flujo subsuperficial horizontal (Figuras 4.45 y 4.46) y humedales de flujo vertical (Figura 4.47), que logran cierta remoción de sólidos y materia orgánica, reducción de patógenos y alguna captura de nutrientes mediante las raíces de las plantas.

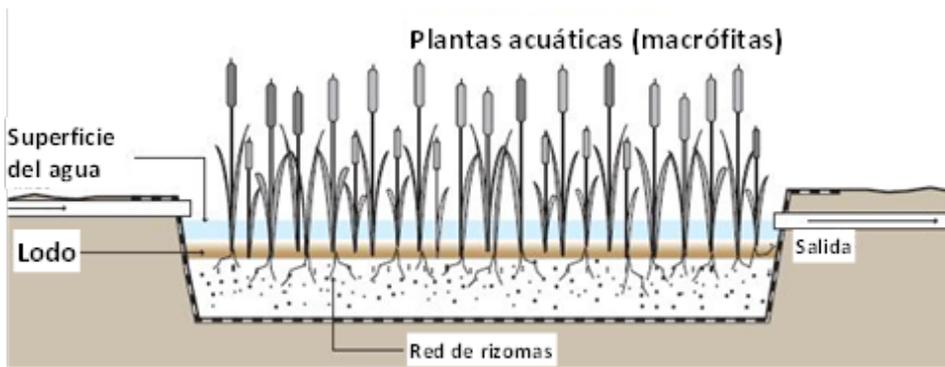


Figura 4.44. . . Esquema de humedal construido de flujo superficial
(Fuente: Adaptada de Tilley et al., 2012, p. 114)

La eficiencia del tratamiento y la reducción efectiva de patógenos de los humedales construidos se compensan por sus moderados costos de capital, operación y mantenimiento, así como por los moderados requisitos de espacio y requisitos de construcción y operación y mantenimiento de expertos, que podrían limitar la aplicación de esta tecnología. Los humedales construidos ofrecen funciones y valores agregados que pueden ser atractivos a nivel local, por la vegetación que producen, que puede asumir una función paisajística importante. Iniciado por la colocación de dos tallos de plantas o cuatro rizomas en crecimiento por metro cuadrado de área superficial (Sasse, 1998), el cultivo y manejo adecuados de la vegetación pueden desarrollar la unidad y convertirla en un bello espacio verde, así como un hábitat para pájaros y animales pequeños.

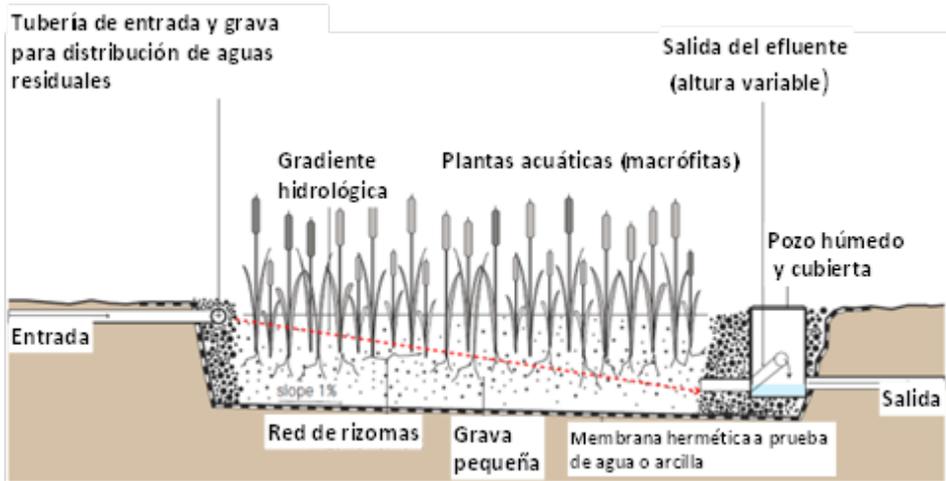


Figura 4.45. . . Esquema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (Fuente: Adaptada de Tilley et al., 2012, p. 116)



Figura 4.46. . . Fotografía de humedales de flujo subsuperficial horizontal en el municipio de Ginebra, Valle del Cauca-Colombia.

La principal diferencia entre las tres configuraciones de humedales construidos se relaciona con el método de ingreso del flujo en las unidades de tratamiento. Los humedales construidos de flujo superficial, generalmente más aplicables a caudales mayores, exponen las aguas residuales al aire y la luz solar. Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal fuerzan el paso del afluente mediante un flujo hidráulico con ligera pendiente a través de una cuenca llena de grava con plantas; este tipo de humedales son más eficientes en la remoción de la materia orgánica, requieren menos espacio y causan menos molestias por zancudos y olores.

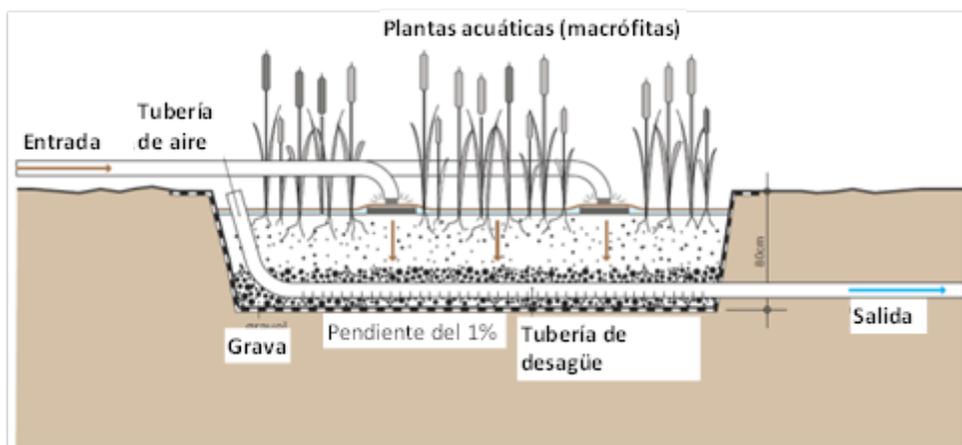


Figura 4.47. . . Esquema de humedal de flujo subsuperficial vertical (Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 118)

Los humedales construidos de flujo vertical difieren de los de flujo subsuperficial horizontal, no solo en cuanto a la dirección del flujo, sino también en cómo se alimentan. Los humedales construidos de flujo vertical a menudo están diseñados para la aplicación intermitente de flujo, lograda por medio del uso de una pequeña bomba ubicada en el último compartimiento del tanque séptico o tanque de dosificación. La dosificación ocurre a través de la aplicación del efluente que se realiza de cuatro a diez veces diarias, lo que ayuda al ingreso de oxígeno dentro del medio para favorecer la degradación aerobia de los contaminantes. De esta manera, los humedales construidos de flujo vertical pueden aceptar cargas orgánicas mayores que los de flujo subsuperficial horizontal. A diferencia de los otros humedales construidos, la aplicación del afluente en los humedales de flujo vertical requiere de electricidad, construcción y supervisión ingenieril por parte de expertos.²⁰

Aunque cada tipo de humedales construidos puede ser efectivo en el tratamiento de aguas residuales, este texto se centra en el de flujo subsuperficial horizontal. Ello debido a que es la configuración más práctica usada para la remoción moderada de DBO, SST y patógenos del efluente primario. Los modelos de flujo subsuperficial, vertical y de flujo superficial libre tienen usos específicos que pueden explorarse en diversas referencias.

²⁰ Para una perspectiva general de los tres tipos de humedales construidos se recomienda al lector consultar el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014), pp. 114-119. Para más información técnica y detallada, se recomienda consultar Wastewater Technology Fact Sheet on Free Water Surface Wetlands (US EPA, 2000d): https://www3.epa.gov/npdes/pubs/free_water_surface_wetlands.pdf, y Wastewater Technology Fact Sheet on Wetlands, (Horizontal) Subsurface Flow (US EPA, 2000e): https://www3.epa.gov/npdes/pubs/wetlands-subsurface_flow.pdf.

Estrategia de diseño para Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSH) ²¹

El dimensionamiento y configuración de los HAFSHs están determinados en su mayoría por las siguientes variables:

- Caudal (Q), que corresponde a la carga volumétrica diaria del afluente, dado en m³/d.
- Concentración de materia orgánica para el afluente (DBOi) y concentración máxima de materia orgánica requerida en el efluente -valor estándar, según la reglamentación o legislación local- (DBOe), dada en mg/L
- Porosidad (P), que es una proporción que indica la cantidad de espacio entre las partículas de grava que estará ocupado por las aguas residuales
- Conductividad hidráulica (CH), que es un parámetro experimental relacionado con el diámetro medio de la grava. Representa cuán rápido fluirán las aguas residuales a través del medio poroso de la cuenca, dado en unidades simplificadas de m/d
- Temperatura (T) que influencia el tiempo necesario para un tratamiento suficiente, dado en grados Celsius
- Profundidad (D) de la cuenca de HAFSH que se puede excavar basándose en las condiciones del suelo, dado en metros

Varias relaciones matemáticas guían el cálculo del área de la superficie necesaria (AS), que hace del HAFSH lo suficientemente grande para un tratamiento adecuado, y del área transversal (AT), con las dimensiones necesarias para permitir que todo el líquido afluente fluya bajo la superficie. Al final de esta sección se proporcionan referencias completas para dichas fórmulas; sin embargo, vale la pena el manual de diseño de humedales construidos (Un-Habitat, 2008); tales fuentes han sido combinadas en el siguiente procedimiento paso a paso que ayuda a simplificar los cálculos:

1. Elija la profundidad deseada a ser excavada uniformemente a través del lecho, en un sitio con una pendiente relativamente plana. D deberá asumir un valor entre 0,4 y 0,8 m, donde el valor superior de ese rango es el más recomendable. Adoptando una altura adicional de seguridad de 0,3 m, entonces dicho rango se convierte en 0,7 a 1,1 m y representa la profundidad necesaria total como condición limitante. Asumiendo que no hay una condición limitante del suelo a menor profundidad que ese

²¹ NOTA: Algunas de estas fórmulas y cálculos pueden parecer difíciles o confusos. El conjunto de herramientas que se describen a continuación ayudará a los usuarios a aplicar las ecuaciones para sus proyectos de HAFSH. El procedimiento y la matemática asociada, que concluyen con un ejemplo instructivo con cálculos completos, se encuentran en las siguientes secciones.

rango, D se lo determina por el tipo de planta a utilizar y la profundidad de sus raíces. Los juncos (*Scirpus*) y los carrizos (*Phragmites*) son dos de las plantas más eficaces para el tratamiento de efluentes, con raíces que tienen profundidades del orden de 0,8 y 0,6 m, respectivamente.

2. Seleccione el medio de soporte granular preferido con granulometría equivalente a la de una grava (idealmente, también el que se encuentre disponible con mayor facilidad a nivel local). La grava debe ser tan uniforme como sea posible, libre de finos y con un diámetro entre 5 mm y 32 mm.
3. Determine la porosidad de la grava (Figura 4.48). Se puede calcular de forma aproximada llenando un balde (o contenedor más pequeño graduado) con una muestra representativa de la grava –previamente saturada- hasta una línea que marca el volumen, como por ejemplo una línea de 5 L, asegurándose de que la superficie del material coincida horizontalmente con la línea. Luego, llene el recipiente con agua hasta que alcance la línea del volumen de referencia. Finalmente, vierta toda el agua en otro balde o cualquier otro recipiente, que tenga marcas precisas del volumen con aproximación del orden de 10 mL. Divida la cantidad de agua medida entre el volumen original para obtener así la fracción que representa a P. Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal funcionan mejor cuando el valor de la porosidad se encuentra entre 0,35 y 0,40.



Figura 4.48. . . Esquema del ensayo de porosidad.

4. Calcule el área superficial AS con base en la Fórmula 1, que corresponde a la ecuación de remoción de DBO para flujo pistón y que se presenta a continuación. Para ello se requiere que el usuario ingrese los valores de la DBO para el afluente y el efluente (determinado este último por los estándares de vertimiento o reúso locales) así como los de caudal, temperatura, porosidad y profundidad. Nótese que, en climas fríos, T debe disminuir ligeramente ya que la temperatura de invierno del lecho del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal será mucho menor que su valor promedio anual debido a una pérdida significativa de calor.

$$\text{Fórmula 1} \quad AS = \frac{Q \cdot (\ln|DBO_{\text{afluente}}| - \ln|DBO_{\text{efluente}}|)}{P \cdot D \cdot 1,104 \cdot 1,06^{(T-20)}}$$

5. Use la Fórmula 2 para calcular el ancho necesario W (determinante de la sección transversal) para garantizar una tasa de flujo subsuperficial suficiente (Q_s), la cual se establece igual a Q . Si Q_s es menor que Q , podría ocurrir la aparición de flujo superficial, que es la principal condición que debe evitarse a toda costa para los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal. Esta ecuación requiere valores para conductividad hidráulica (CH), D y el gradiente hidráulico (GH), que es el descenso o caída de la altura del perfil de agua superficial desde la entrada hasta la salida del humedal. Se suele asumir un valor de 0,01.

$$\text{Fórmula 2} \quad W = \frac{Q}{CH \cdot 0,01 \cdot D}$$

6. Complete el procedimiento matemático calculando las dimensiones de las celdas individuales. Una vez se ha determinado W , el AS total puede ser dividida en pequeñas celdas para garantizar adecuados valores en la relación largo: ancho (no mayor de 3:1 y no menor de 0,4:1). Esto dependerá de la naturaleza del sitio y de la configuración del área de terreno disponible.
7. Consulte con un ingeniero local para determinar la configuración ideal de las celdas, dado que las restricciones de espacio pueden no ser favorables para una fila larga (en cuanto al ancho) de celdas paralelas.

Ejemplo: Una pequeña subdivisión residencial rural de 50 hogares, con un promedio de cuatro personas por vivienda y una tasa de producción de aguas residuales típica de 200 L/persona/d, produce un caudal Q de 40 m³/d. El nivel medio de la DBO afluente a partir de varias muestras medidas en un laboratorio local es 250 mg/L y los estándares locales de vertimiento de efluente definen una concentración máxima de 20 mg/L para la descarga. La temperatura media anual del lugar es de 25 grados Celsius. Los desarrolladores del proyecto conducen el proceso de cinco pasos como se presenta a continuación:

1. Buscan un sitio relativamente plano con suficiente profundidad para la presencia de roca dura o aguas subterráneas, preferiblemente de al menos a 0,6 m para permitir la siembra de juncos o carrizos. Se elige un sitio con una profundidad de 0,6 m, apropiado para las abundantes especies locales de juncos.
2. Buscan un lugar para suministro de grava a precios económicos con una granulometría que oscile entre 5 y 32 mm, y dado que en el entorno local se encuentra disponible en abundancia una grava fina de 16 mm se selecciona dicho material a partir de un proveedor de la región. Para dicho material se tiene que la conductividad hidráulica CH es de 0,154 cm/s = 133 m/d
3. Llenan un balde de 5 L con la grava saturada de tamaño 16 mm y posteriormente completan su contenido con agua. El volumen de agua

medido para cálculo de la porosidad fue de 1,9 L. Dicho valor se divide entre 5 L para determinar que la porosidad de la grava es de 0,38.

4. Con base en los anteriores datos y utilizando la Ecuación 1 como se ilustra a continuación se determina el área de la superficie del HAFSH:

$$\text{Fórmula 1 AS} = \frac{40 \cdot (\ln 250 - \ln 20)}{0,38 \cdot 0,60 \cdot 1,104 \cdot 1,06^{(25-20)}}$$

$$\text{AS} = 299,9 \approx 300 \text{ m}^2$$

El área de la superficie del HAFSH debería ser de 300 m².

5. Aplicando la Fórmula 2 se determina el ancho necesario como se ilustra a continuación:

$$\text{Fórmula 2 W} = \frac{40}{133 \cdot 0,01 \cdot 0,60}$$

$$\text{W} = 50,1 \approx 50 \text{ m}$$

6. Luego, la herramienta divide ese ancho de 50 m entre 15 m para obtener 3,3 celdas, valor que es redondeado hasta 4. El ancho de 50 m es luego dividido entre 4 partes para determinar un ancho por celda de 12,5 m. La longitud se encuentra dividiendo el área superficial de 300 m² entre el ancho total de 50 m para obtener una longitud de 6 m.
7. El ingeniero presenta al desarrollador del proyecto las dos opciones de configuración de celdas más simples de 6 m por 12,5 m — bien sea por medio de una fila de cuatro celdas paralelas, que requiere un espacio de 6 por 50 m o mediante dos filas adyacentes de dos celdas cada una, que requieren un espacio de 12 m por 25 m.



Guía de humedales construidos relativa a las características de la fuente y limitaciones del sitio:

- caudal afluente: aunque los humedales construidos pueden ser ampliados para manejar grandes flujos, esto no es usualmente posible en la mayoría de escenarios ya que los requisitos de mayor terreno pueden establecer barreras en términos de área disponible para su localización y/o costos.

Para los propósitos de una guía conservadora, los humedales artificiales pueden ser considerados como opciones viables para fuentes con tasas de flujo (caudales) de menos de 100 m³/d;

- concentración del afluente: los humedales construidos están sujetos a obstrucciones, motivo por el cual pueden requerir del reemplazo total de la grava; por lo tanto, se recomienda asegurarse de verificar la concentración de aceites y grasas, sólidos y materia orgánica. Aunque en algunos casos un afluente con una DBO elevada puede ser aceptable durante cortos períodos de tiempo, se puede tomar como referencia un límite superior de 170 mg/L, que es el valor promedio para un afluente de aguas residuales sometidas a tratamiento primario que ingresa a los humedales construidos, valor registrado en una revisión de cientos de unidades (Vymazal y Kröpfelová, 2009), y que es apropiado para garantizar una operación sostenida a largo plazo. Si la concentración del afluente sobrepasa dicho nivel, utilice un pretratamiento adicional y dispositivos de tratamiento primario para reducir la concentración de ingreso al humedal;
- pendiente: los humedales construidos requieren espacios de terreno que se encuentran relativamente a nivel, siendo la pendiente ideal del 1 por ciento. Evite el uso de la tecnología para sitios con pendientes mayores que esta, ya que no pueden ser excavados o rellenados de forma económica
- restricciones locales del uso de la tierra: instalaciones cercanas tales como las conformadas por aeropuertos, pueden no permitir la instalación de dichos sistemas de tratamiento ya que podrían causar problemas debido a olores, zancudos o un exceso de pájaros u otras formas de vida silvestre;
- otras consideraciones: asuntos específicos del sitio relativos a las fuentes de grava disponibles y el clima, que conducen al crecimiento de zancudos y hierbas pueden ser causas de problemas. Asegúrese de que la obtención e instalación del material granular (la grava) no solamente sea económico, sino que también se lleve a cabo correctamente, ya que puede estar contaminada con material fino, polvo y escombros. Se recomienda el uso de grava prelavada para evitar este problema.

4.6.3 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización de aguas residuales (WSP: Waste Stabilisation Ponds) son estanques o cuencas con fondo y paredes impermeables que tratan las aguas residuales por medio de la acción física de la sedimentación y la acción biológica de la digestión microbiana. También conocidas simplemente como lagunas de estabilización, son populares por ser relativamente baratas y fáciles de diseñar, instalar y mantener y pueden producir un efluente de buena calidad; sin embargo, requieren extensas áreas de terreno.

En muchas aplicaciones, los sistemas de lagunas de estabilización usan unidades múltiples para lograr el tratamiento primario, secundario y terciario. Dicha secuencia de tratamiento gradual se muestra en la Figura 4.49, aunque en algunos casos se puede utilizar lagunas aireadas dentro o fuera de la serie. Aunque estos sistemas se usan frecuentemente para el manejo de aguas residuales comunitarias a nivel urbano o rural, en general, son opciones válidas para SDMAR (trabajando en serie o de manera aislada o individual) que vale la pena considerar para muchas aplicaciones, incluyendo servir como el componente de tratamiento principal dentro de programas de manejo de residuos sépticos.²²

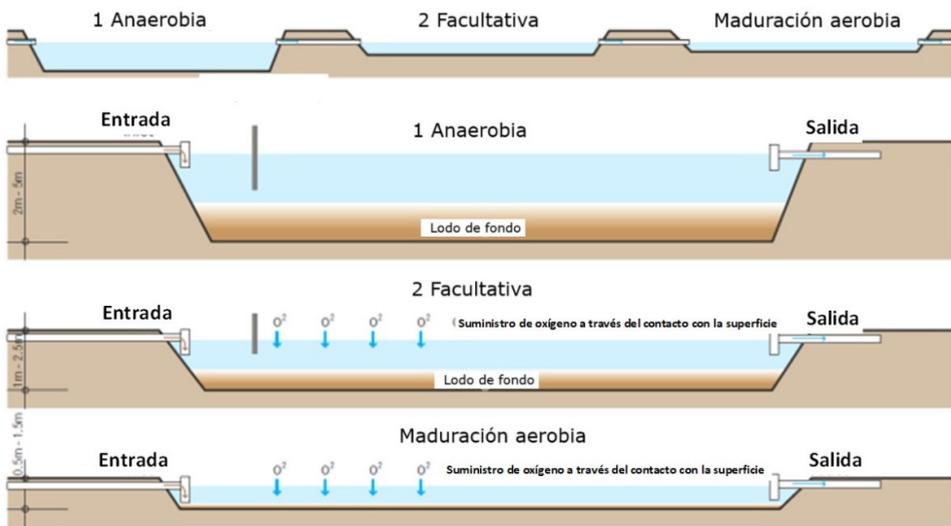


Figura 4.49. . . Serie típica de lagunas de estabilización (Fuente: Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 110)

4.6.3.1 Lagunas anaerobias

En general, las lagunas anaerobias se pueden considerar como unidades de tratamiento primario, ya que estabilizan anaeróbicamente y sedimentan la materia orgánica y los sólidos. Sin embargo, se presentan aquí en la sección del tratamiento secundario debido a su frecuente vinculación gradual con los otros dos tipos principales de lagunas de estabilización, lagunas facultativas y lagunas aerobias, que son las etapas de tratamiento secundario y terciario,

²² Para una perspectiva general básica de este esquema de lagunas de estabilización, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014).

respectivamente. Esto no quiere decir que las lagunas anaerobias, como mecanismos altamente eficientes de tratamiento primario, no se puedan usar en secuencia con opciones de tratamiento sin lagunas (a nivel secundario y posiblemente terciario). Este escenario está garantizado por requisitos de espacio, ya que las lagunas anaerobias requieren menos terreno que los otros tipos de lagunas para un cierto caudal, lo que las hace más prácticas cuando es difícil encontrar suficiente disponibilidad de terreno.

En general, las lagunas anaerobias carecen deliberadamente de aireación, calentamiento o mezcla, y poseen columnas de agua con profundidades de 2 a 4 m, o incluso 5 m (Tilley et al., 2014); y cuanto más profundas, mejor. Estas características, particularmente la profundidad, no permiten que el oxígeno llegue a la zona del fondo, lo que propicia el dominio de las condiciones anaerobias. Las lagunas anaerobias son diferentes a las lagunas facultativas o aerobias, que son menos profundas, y sus condiciones son similares a las que ocurren dentro de un digestor anaerobio no calentado. Los digestores convencionales suelen usarse para la estabilización de lodos, mientras que los sistemas de lagunas normalmente se usan para el tratamiento primario y secundario de aguas residuales. Sin embargo, las lagunas anaerobias y las lagunas facultativas pueden ser diseñadas específicamente para el tratamiento de lodos fecales, lo que se ilustra en el estudio de caso de la ciudad de Duaguete, Filipinas, que se presentará más adelante.

Pese a la simplicidad operacional de este tipo de lagunas es de gran importancia la concepción hidráulica del sistema, pues al recibir una alta carga de sólidos en suspensión y sedimentables son susceptibles de presentar problemas operacionales, los cuales se evitan con un buen diseño. Algunas observaciones relativas a este tipo de lagunas se presentan a continuación en la Figura 4.50.

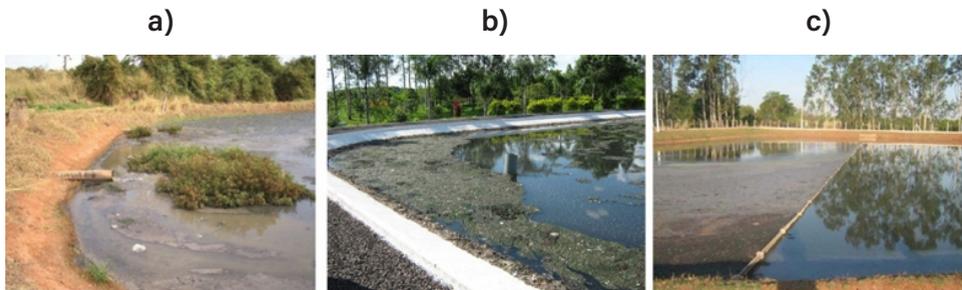


Figura 4.50. . . Particularidades observadas en lagunas anaerobias en el estado de São Paulo, Brasil (a) excesiva acumulación de lodos a la entrada de la laguna, lo que produjo el surgimiento de vegetación de gran tamaño en el municipio Neves Paulista (b) acumulación típica de lodos flotantes en proximidades a la entrada sumergida en el municipio de Jales (c) acumulación de lodos en la zona de entrada, primer canal de una laguna anaerobia con bafle divisor en el municipio de Santa Fé do Sul.

4.6.3.2 Lagunas facultativas

El siguiente paso en la secuencia tradicional de lagunas de estabilización son las lagunas facultativas, usadas principalmente para el tratamiento secundario de aguas residuales municipales e industriales. Estas unidades en material térreo son usualmente excavadas a profundidades entre 1 y 2,5 m (Tilley et al., 2014), y no presentan ni mezcla ni aireación mecanizada. La capa de agua más cercana a la superficie contiene oxígeno disuelto debido a la reaireación atmosférica y por la fotosíntesis de las algas, lo que brinda soporte a los organismos aerobios y facultativos. Los depósitos de lodos se acumulan en el fondo de la laguna, donde prevalecen los organismos anaerobios. La capa intermedia, conocida como zona facultativa, oscila entre la zona aerobia cerca de la superficie y la anaerobia en el fondo y soporta ambos tipos de degradación microbiana de la materia orgánica y de inactivación de los organismos patógenos. Al igual que con las lagunas anaerobias, también se pueden usar como parte de una secuencia de tratamiento de lagunas de estabilización (con los niveles primario y posiblemente terciario).²⁴

Cuando se prevé la presencia de bajas cargas orgánicas se puede proporcionar tratamiento al agua residual directamente por medio del uso de lagunas facultativas primarias; en caso contrario, formarán parte de la secuencia antes mencionada y deberán ser antecedidas por lagunas anaerobias u otro tipo de tratamiento primario. En la Figura 4.51 se presentan algunas formas de uso de lagunas facultativas en el tratamiento de aguas residuales municipales.

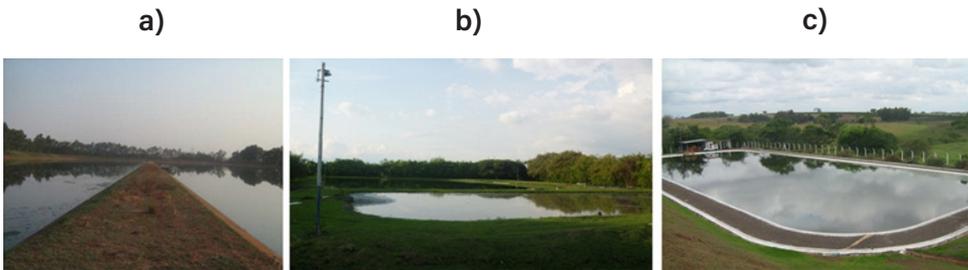


Figura 4.50. . Tipos de uso de lagunas facultativas para tratamiento de aguas residuales domésticas (a) lagunas facultativas primarias dispuestas en paralelo, en la parte central se observa el dique común de las unidades de tratamiento del municipio Ilha Solteira, São Paulo-Brasil (b) laguna facultativa secundaria -al fondo-, después de una laguna anaerobia en el municipio de Ginebra, Valle del Cauca-Colombia (c) laguna facultativa primaria, cuyo efluente recibe tratamiento físico químico en el municipio de Marinópolis, São Paulo-Brasil.

²⁴ Para más información técnica y detallada sobre las lagunas facultativas, consulte *Waste water Technology Fact Sheeton Facultative Lagoons* (US EPA, 2002d) [.https://www3.epa.gov/npdes/pubs/faclagoon.pdf](https://www3.epa.gov/npdes/pubs/faclagoon.pdf).

4.6.3.3 Lagunas aerobias

Las lagunas aerobias, un ejemplo de las cuales se muestra en la Figura 4.52, completan la serie de lagunas de estabilización proporcionando el pulimento final reduciendo los niveles de patógenos y nutrientes. También conocidas como lagunas de maduración o pulimento, son unidades cuyas profundidades normalmente oscilan entre 0,5 y 1,5 m. Las concentraciones de oxígeno disuelto son usualmente altas debido a la fotosíntesis algal, así como por la acción del viento y las olas que permiten la reaireación natural, la cual combinada con los efectos de la radiación UV estimula el crecimiento de comunidades de microalgas.²⁵

Adicionalmente, las algas alteran el pH del agua fuera del rango tolerado por la mayoría de patógenos e incorporan en su biomasa altas cantidades de fósforo y nitrógeno. Los macronutrientes (N y P) pueden ser removidos del agua residual tratada cuando las algas son debidamente cosechadas o consumidas por peces, en caso de practicar piscicultura; de lo contrario, tales nutrientes serían descargados y podrían representar una amenaza a los hábitats acuáticos de los alrededores. Como los dos tipos de lagunas anteriores, también pueden formar parte de una secuencia de tratamiento por medio de lagunas de estabilización.



Figura 4.51. Laguna aerobia en la ciudad de Dumaguete, Filipinas.

4.6.3.4 Lagunas aireadas

En las lagunas aireadas, el oxígeno se suministra principalmente por aireación mecánica o difusa en lugar de la fotosíntesis de las algas (Figura 4.53). Las lagunas aireadas normalmente se clasifican por la cantidad de mezcla suministrada. Un sistema de mezcla parcial proporciona únicamente la aireación suficiente

²⁵ Para revisar una discusión más detallada sobre las lagunas aerobias se recomienda consultar la referencia de (Sasse, 1998).

para satisfacer los requisitos de oxígeno del sistema y no provee energía para mantener todos los sólidos orgánicos en permanente suspensión, lo que es necesario para los sistemas de mezcla total que presentan mayor eficiencia en el tratamiento, junto con costos más elevados. En términos generales este tipo de lagunas presentan requisitos de electricidad del orden de 1 a 3 W por metro cúbico de volumen de laguna (Sasse, 1998); adicionalmente, debido a la experiencia y conocimientos necesarios para su construcción, operación y mantenimiento generalmente hacen de esta una tecnología menos adecuada para SDMAR que los otros tipos de lagunas de estabilización.²⁶

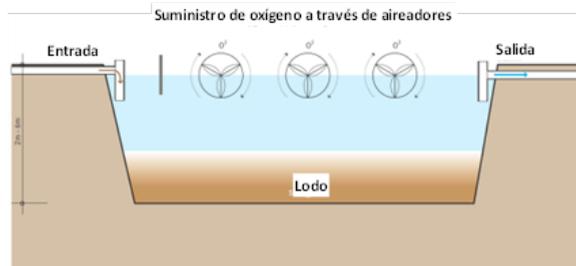


Figura 4.53. Esquema de una laguna aireada, (Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 112)

Por su alta eficiencia en la remoción de la materia orgánica para efluentes con diferentes concentraciones, este tipo de lagunas de estabilización ofrecen múltiples aplicaciones –principalmente a nivel industrial- como las que se ilustran a continuación en la Figura 4.54.



Figura 4.54. Usos de las lagunas aireadas en el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Pasto, Nariño-Colombia (a) para tratamiento de efluentes de una planta de sacrificio de ganado (b) en el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario municipal.

²⁴ Para más información técnica y detallada sobre las lagunas aireadas se recomienda consultar: Wastewater Technology Fact Sheet on Aerated, Partial Mix Lagoons, (US EPA, 2002e): <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/apartlag.pdf>.

4.6.3.5 Caídas hidráulicas-Escaleras de aireación

Algunas legislaciones, bien sean de carácter nacional, regional o local establecen dentro de sus estándares de vertimiento de efluentes valores mínimos de concentraciones de oxígeno disuelto. Es de esperar que los efluentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales por medio de lagunas de estabilización tengan concentraciones del gas como fruto de la fotosíntesis algal; sin embargo, es probable que las concentraciones de oxígeno disuelto sean aún insuficientes para enmarcarse en los valores normativos. Cuando exista disponibilidad de carga hidráulica (diferencia de nivel) entre el punto final del tratamiento y el lugar de vertimiento del efluente, es recomendable la implementación de unidades de aireación del líquido por medio de sistemas como las caídas hidráulicas con escaleras de aireación. Una ilustración de tales unidades se presenta a continuación en la Figura 4.55.

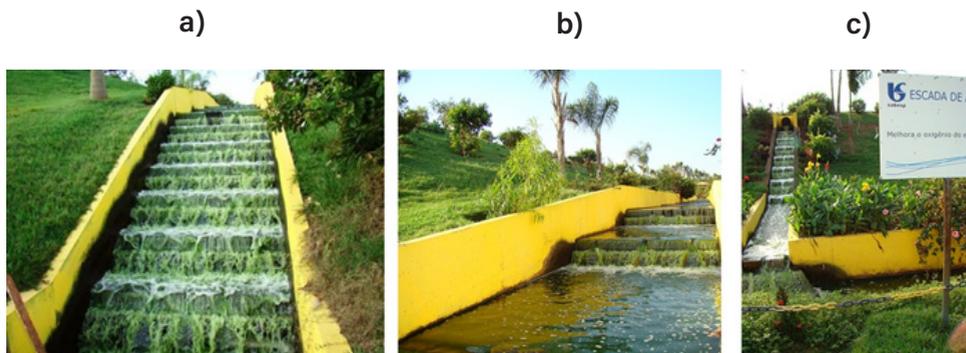


Figura 4.55. . . Sistema de transferencia de oxígeno al efluente final de lagunas de estabilización por medio de escaleras de aireación en la ciudad de Jales, estado de São Paulo-Brasil.

Estrategia de diseño para lagunas de estabilización:

El conjunto de herramientas que se describen a continuación ayudan a los usuarios a aplicar algunas ecuaciones para sus proyectos de lagunas de estabilización. Los procedimientos y cálculos matemáticos asociados, que concluyen con un ejemplo instructivo con cálculos completos, se presentan en las siguientes secciones.

Las diversas configuraciones de la serie de lagunas de estabilización suelen basarse en la concentración inicial del afluente. Si la DBO de las aguas residuales del afluente es moderadamente alta — para estos propósitos, por lo menos de 400 mg/L — la primera laguna de la serie será anaerobia; de lo contrario, será una laguna facultativa primaria. Si la DBO es muy alta, una o más lagunas anaerobias serán necesarias para reducir la DBO lo suficiente antes de que una laguna facultativa secundaria pueda recibir las aguas



residuales. En todos los casos, dichas lagunas deberán estar seguidas de una o más lagunas de maduración para lograr la suficiente remoción de patógenos. En general, la configuración de la serie de lagunas y los cálculos para el dimensionamiento de cada laguna depende de ciertas variables, las cuales se describen a continuación:

- Caudal (Q), que es la carga volumétrica diaria del afluente, dado en m^3/d
- Carga orgánica dada en mg/L, para el afluente (DBOi), así como para el estándar de vertimiento de efluentes (DBOe) definido por la legislación nacional o local, que normalmente se toma como máximo del orden de 50 mg/L
- Evaporación neta (E), que es la pérdida de agua por medio de la evaporación menos el ingreso del líquido por la lluvia, dado en mm/año
- Temperatura (T), dada en grados Celsius, que influencia las tasas de aplicación superficial y volumétrica de la DBO
- Profundidad (D) del suelo susceptible de ser excavado en el sitio, basada en las condiciones particulares del terreno, expresada en metros

Ya que la literatura no ha establecido una única convención para la definición de una serie de lagunas de estabilización con base en los valores de la DBOi o la DQOi, los autores han propuesto un sistema, que se describe a continuación, cuyos principios se explicarán mejor con un ejemplo. Si la DBO afluente DBOi es 600 mg/L, aplicando las fórmulas que se explican más adelante se obtendrá una DBO efluente DBOe de alrededor de 37,5 mg/L usando una serie de lagunas Anaerobia-Facultativa-Aerobia. Si se utilizase la misma serie de lagunas para una DBOi de 300 mg/L se obtendrá una DBO efluente DBOe de 18,75 mg/L.

Como para el segundo caso este último valor es innecesariamente bajo al considerar que la concentración exigida para la DBOe es de 50 mg/L, la laguna anaerobia puede ser omitida, lo que permitiría que la laguna facultativa sirva como el mecanismo de tratamiento primario y se obtendría una DBOe de 37,5 mg/L. Este fenómeno conduce a la selección preferencial de la siguiente serie de lagunas basada en el criterio de la materia orgánica afluente DBOi, ello a partir del supuesto de que DBOe no pueda exceder los 50 mg/L.

Como criterios para la selección del tipo de configuración del tren de tratamiento con lagunas de estabilización se puede recurrir a las siguientes alternativas:

- Para DBOi superior a 4444 mg/L, usar una serie de cinco lagunas así Anaerobia-Anaerobia-Facultativa-Aireada-Aireada
- Para DBOi mayor a 1333 mg/L, usar una serie de cuatro lagunas Anaerobia-Anaerobia-Facultativa-Aireada
- Para DBOi superior a 400 mg/L, usar una serie de tres lagunas Anaerobia-Facultativa- Aireada

- Para DBO_i menor o igual a 400 mg/L, usar una serie de dos lagunas Facultativa- Aireada

La referencia completa sobre las fórmulas que se utilizarán a continuación es de Kayombo et al. (2005). Los recursos se han sintetizado en el siguiente procedimiento paso a paso que simplifica los cálculos:

1. Después de determinar Q , DBO_i , DBO_e , T , E y D , se usa la DBO_i para determinar la configuración de la serie de lagunas de estabilización.
2. Se realizan los cálculos para el dimensionamiento de una o dos lagunas anaerobias (cuando son necesarias). La tasa de carga volumétrica de DBO para las lagunas anaerobias (TCVDBO) se determina con base en T usando una función sencilla de un paso, que asume una TCVDBO mínima de 100 g/m³ para $T < 10^\circ\text{C}$ y 350 g/m³ para $T > 25^\circ\text{C}$. Se usa en la Fórmula 1 que se muestra a continuación, junto con el caudal y la DBO afluente. Con ella se calcula el volumen de la laguna anaerobia, que dividido entre la profundidad adoptada reporta el área de la superficie necesaria para dicha laguna. Sabiendo que, para las lagunas de estabilización, la longitud de cada laguna debería ser tres veces el valor de su ancho, es sencillo encontrar la longitud y el ancho de la laguna anaerobia (y los de otras lagunas), que es igual a la raíz cuadrada del “área de la superficie dividida entre 3”. La DBO_e para una laguna anaerobia, que se convierte en la DBO_i para la siguiente laguna anaerobia o facultativa, se obtiene al multiplicar la DBO_i por un valor que oscila entre 0,60 (40 por ciento de reducción de DBO) para $T < 10^\circ\text{C}$ y de 0,30 (70 por ciento de reducción de la DBO) para $T > 25^\circ\text{C}$. Los valores dentro de este rango de 0,30 a 0,60 se obtienen a partir de una simple función que depende exclusivamente de T .

$$\text{Fórmula 1: Volumen Anaerobia} = \frac{DBO_i \cdot Q}{TCV}$$

3. Se hacen los cálculos para dimensionar una única laguna facultativa. La tasa de aplicación superficial de la DBO (TASDBO) se determina con base en el valor de T usando una función etiquetada como Fórmula 2, que se presenta a continuación. Dicha tasa, junto con la DBO_i (DBO_e del Paso 2) y Q , se usan para calcular el área superficial de la laguna facultativa (Fórmula 3, a continuación), que se puede multiplicar por el valor de D (adoptado como 2,1 m) para obtener el volumen de la laguna facultativa. La DBO_e se encuentra multiplicando DBO_i por el factor de remoción, que para este caso fue asumido del 75 por ciento.

$$\text{Fórmula 2: TAS}_{DBO} \text{ Facultativa} = 350 * (1,107 - (0,002 * T))^{T-20}$$

$$\text{Fórmula 3: Área superficial Facultativa} = \frac{10 \cdot DBO_i \cdot Q}{TAS}$$

4. Se efectúan los cálculos del tamaño necesario para una o dos lagunas de maduración. El área superficial de las lagunas se basa en los valores de Q y de D (asumida como 1,3 m), E y el tiempo de retención hidráulica (TRH). El último término, utilizado en las ecuaciones para dimensionamiento de tecnologías de SDMAR, se asume como del orden de cinco días para los propósitos de aplicación de esta herramienta. La Fórmula 4, que se muestra a continuación, ilustra cómo las lagunas de maduración están relacionadas con dichas variables.

$$\text{Fórmula 4: } \quad \text{Área superficial Maduración} = \frac{2 \cdot Q \cdot \text{TRH}}{2 \cdot D + 0,001 \cdot \frac{E}{365}}$$

Ejemplo: se propone un escenario para un proyecto de una plaza de mercado pública especializada en distribución de carnes. Los administradores del mercado decidieron seguir un proceso de planificación paso a paso para determinar el potencial del uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de sus efluentes. El proceso fue como se presenta a continuación:

1. Contrataron a un ingeniero local para que recolectara los datos, quien determinó que el Q promedio era de 50 m³/d y que la carga orgánica descargada (DBOi) era de alrededor de 1.600 mg/L. Dicho valor de DBOi les permitió determinar, siguiendo las indicaciones antes mencionadas, que se requería una serie de cuatro lagunas Anaerobia-Anaerobia-Facultativa-Aireada. La temperatura anual característica del sitio era de 20°C, la profundidad máxima utilizable del suelo era de 4,8 m (al considerar un borde libre de seguridad de 0,3 m se tuvo un valor para D de 4,5 m), adicionalmente se estimó E con un valor de 1.300 mm/año.
2. A partir de las indicaciones comentadas, con los datos disponibles se estimó la tasa de carga orgánica volumétrica de las lagunas anaerobias TCVDBO de 300 g DBO/m³ al día, la cual se usó en la Fórmula 1 con los otros datos para así calcular los volúmenes de 266,7 y 106,7 m³ para la primera y la segunda laguna anaerobia, respectivamente. Dado el valor D de 4,5 m, se calculó las áreas superficiales necesarias de 87 y 42 m² para la primera y segunda lagunas, respectivamente. Las remociones de la DBOi del 60 por ciento aplicadas para cada una de las lagunas permitieron determinar una DBOe de las lagunas anaerobias de 256 mg/L.
3. El valor de 256 mg/L fue tomado luego como DBOi para la laguna facultativa. Dicho número, junto con Q y la tasa de aplicación superficial de la laguna facultativa TASDBO (calculado por medio de la Fórmula 2 y que resultó ser 350 g/m²), se usó en la Fórmula 3 para determinar que el área de superficie necesaria para la laguna facultativa era de 365,7 m². Multiplicando dicho valor por la profundidad asumida de 2,1 m se

determinó un volumen de $707,3 \text{ m}^3$. Dicho valor es un poco menor que el del producto de $2,1 \text{ m}$ y $365,7 \text{ m}^2$ porque el volumen real de la laguna es menor que el volumen que un prisma rectangular con esas dimensiones, ello debido a que las paredes laterales de la laguna poseen una pendiente hacia adentro. Asumiendo un 75 por ciento de eficiencia de remoción de la DBO en la laguna facultativa se tiene que su efluente posee una DBO_e de 64 mg/L .

4. Con base en lo anteriormente recomendado se calculó el área de la superficie necesaria para la laguna de maduración, usando una DBO_i de 64 mg/L (del Paso 3), Q , E y se asumieron valores de D y TDH de $1,3 \text{ m}$ y 5 días, respectivamente. El valor del área superficial fue de 191 m^2 , con un volumen de 233 m^3 y DBO_e final de 32 mg/L . En resumen, la herramienta estimó los requisitos de área de la superficie global de las cuatro lagunas (terreno) y el volumen (excavación) en 686 m^2 y 1.314 m^3 , respectivamente, que se aproxima al área de la superficie de un cuadrado cuyo lado sea de 26 m .



Guía para lagunas de estabilización en relación con las características de la fuente y limitaciones del sitio:

- pendiente: las lagunas requieren grandes áreas de terreno que estén relativamente a nivel, siendo la ideal una pendiente del 1 al 2 por ciento. Evite el uso de la tecnología para sitios con pendientes que superen dichos valores ya que no pueden ser excavadas o rellenadas de forma económica y rentable para garantizar tales pendientes;
- condiciones limitantes relativas a la profundidad del suelo: la instalación de lagunas anaerobias, que requieren de profundidades mínimas de 2 m y preferiblemente con profundidades del orden de 4 a 5 m , solamente se puede hacer en sitios con perfiles de suelo muy profundos. Esto puede implicar la necesidad de realizar estudios geotécnicos adicionales del sitio y la ejecución de excavaciones de prueba para verificar que sea factible lograr de forma segura la profundidad de la laguna, así como su borde libre de $0,3 \text{ m}$;
- restricciones locales del uso de la tierra: las construcciones y parcelamientos cercanos pueden no permitir la instalación de lagunas anaerobias, ya que pueden causar problemas debido a la generación de olores, presencia de zancudos o un exceso de pájaros y otros tipos de vida silvestre;



Lagunas de estabilización usadas para el manejo de residuos sépticos en Dumaguete, Filipinas.

La ciudad de Dumaguete está situada en la isla de Negros en la región de Vasayas de Filipinas. En 2008, el gobierno de la ciudad comenzó a planificar su programa de manejo de residuos sépticos, que involucra la eliminación de lodos de tanques sépticos cada cinco años. El programa es un esfuerzo conjunto entre el gobierno de la ciudad, que diseñó y maneja el sistema de tratamiento y el Distrito de Agua de la Ciudad, que maneja el programa de recolección de los lodos.

El sistema de tratamiento de residuos sépticos usa una serie de celdas de lagunas anaerobias y facultativas (Figura 4.56) y humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial (Figura 4.57). Los lechos de secado de lodos se encargan de extraer el agua de los biosólidos acumulados y, con excepción de las dos bombas de lodos, el sistema es totalmente pasivo pues no requiere de energía eléctrica. El sistema de tratamiento es capaz de manejar una carga diaria de 80 m³ de lodos fecales.



Figura 4.56. Josie Antonio, de la oficina de Planeación de Dumaguete frente a las lagunas de estabilización de lodos.



Figura 4.57. Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal que conjuntamente con el humedal de flujo superficial trata el efluente de las lagunas de estabilización.

“El sistema funciona impresionantemente bien”, según Josie Antonio, Oficial de Planeación de la Ciudad y principal proponente del sistema. También resalta que “nuestros resultados de las últimas muestras mostraron que la DBO del efluente final fue menor a 20 mg/L [en relación con la DBOi de 5.000 mg/L], indicando un alto nivel de tratamiento, mientras que los peces que viven en la laguna final como indicadores biológicos parecen estar muy saludables”. Para lograr este éxito, fue necesario realizar un estudio sobre eventuales crecientes por inundaciones e instalar diques para estabilización de las orillas del río, ya que el sistema está ubicado en las riberas del Río Okoy. Adicionalmente, la variabilidad del caudal es alta y en el proyecto se anticiparon varios años antes de que el sistema fuera utilizado completamente.

4.6.4 Filtros biológicos con medio soporte

Los filtros biológicos con medios de soporte son dispositivos de tratamiento secundario de aguas residuales que tratan el efluente primario pasándolo por medios como roca, plástico o biomasa. El medio provee el área de superficie donde los microorganismos se adhieren a través de una película conformada principalmente por material extracelular. A medida que el efluente pasa sobre la biopelícula, los microorganismos consumen la materia orgánica como alimento. Ejemplos de esta tecnología incluyen los filtros percoladores, los filtros de fibra de coco y los filtros de arena. Estos sistemas de “crecimiento fijo” son útiles en áreas con restricciones de terreno, ya que ocupan poco espacio. Las innovaciones en la tecnología de filtros de medios se están reflejando en productos con mayor eficiencia y fácil operación y mantenimiento, a un costo reducido.

Un ejemplo común de la tecnología de filtros de medios es el filtro percolador (Trickling filter), que es la versión aerobia de un filtro anaerobio. Para mantener aireados la biopelícula y el medio soporte conformado por roca gruesa, las aguas residuales se esparcen desde la parte superior mientras que tanto la parte superior como el fondo del filtro son ventilados (Figuras 4.58 y 4.59). Para garantizar dicha condición se requiere la instalación y operación y mantenimiento de expertos, así como una tasa de flujo constante y suministro de energía eléctrica. Estos aspectos hacen que los filtros percoladores sean factibles en su mayoría para SDMAR aplicados en asentamientos humanos densamente poblados.

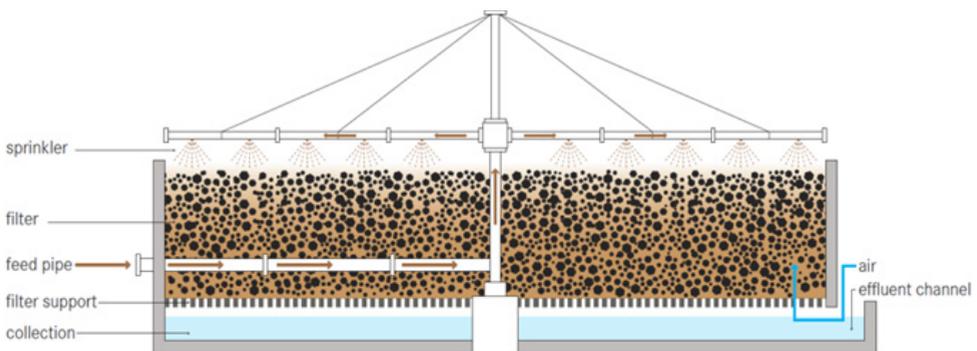


Figura 4.58. Esquema de un filtro percolador (Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 120)

A continuación, en la Figura 4.59 se presenta la fotografía de un biofiltro percolador con relleno de material sintético y con aireación natural tanto en la parte superior como inferior.



Figura 4.59. Biofiltro percolador para tratamiento de un caudal de 0,1 L/s (izquierda); tipo de medio soporte sintético con reúso de tubería de PVC (derecha) en la PTAR de Ginebra, Valle del Cauca-Colombia.

La fibra de coco y el polvillo que queda cuando se remueve la fibra de los cocos triturados es otro medio soporte para biofiltros usados para tratamiento secundario. Tal como se muestra en la Figura 4.60, es un sistema que propicia el crecimiento de biopelícula en un medio soporte fijo, de bajo costo que se puede aplicar a los SDMAR en regiones productoras de coco. Los principales beneficios de los filtros de fibra de coco como tratamiento secundario son su capacidad para reducir la contaminación, las bajas necesidades de área, los bajos costos relativos al ser comparados con los humedales construidos y las lagunas de estabilización y el reducido tiempo necesario para su implementación. El ejemplo que se muestra a continuación trata las aguas residuales de 700 estudiantes y maestros por menos de un centavo de dólar americano por usuario por día.



Figura 4.60. Biofiltro de fibra de coco para la escuela primaria de Putatan, ciudad de Muntinlupa, Filipinas.

Los filtros con medio soporte en fibra de coco pueden lograr entre el 80 y el 90 por ciento de reducciones de patógenos, SST y DBO para afluentes con DBO hasta de 350 mg/L. Son capaces de manejar con flexibilidad el afluente secundario de aguas residuales residenciales o industriales con niveles de materia orgánica y tasas de flujo variables, lo que los hace adecuados para viviendas o instituciones pequeñas, aunque al igual que con todos los filtros con medio soporte, se debe tener especial cuidado de someterlos a un adecuado pretratamiento para remoción de grasas y aceites.

Los filtros de arena y grava (Figura 4.61) son unidades de tratamiento de aguas residuales altamente efectivos y poseen diversas aplicaciones para SDMAR. Pueden ser alimentados intermitentemente o diseñarse como filtros con altas tasas de recirculación (aunque este tipo de operación aun es de tipo experimental). La tecnología ha sido usada por años en aplicaciones de potabilización de agua con desarrollo de aplicaciones más recientes para el tratamiento de aguas residuales. La selección de medios y un pretratamiento adecuado son claves para la funcionalidad a largo plazo, la arena debe ser de un grano grande y uniforme y libre de partículas finas. Se debe practicar el manejo adecuado de las grasas, ya que para reparar los filtros con medios soporte colmatados una vez que están obstruidos requiere del reemplazo total del medio filtrante, lo cual es caro y consume tiempo²⁷

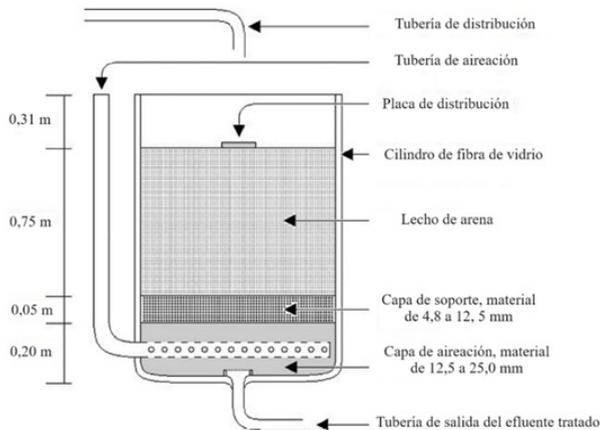


Figura 4.61. Esquema de un filtro de arena (Fuente: Adaptada de Santos & Athayde, 2019, p. 99)

²⁷ Para más información técnica y detallada sobre los filtros percoladores, se recomienda consultar *Wastewater Technology Fact Sheet on Trickling Filters* (US EPA, 2000f): https://www3.epa.gov/npdes/pubs/trickling_filter.pdf.

Para más información técnica y detallada sobre filtros de arena, consulte *Technology Fact Sheet on Intermittent Sand Filters* (US EPA, 1999b): <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/isf.pdf>.

4.6.5 Sistemas de tratamiento aerobio

Hay muchas configuraciones diferentes en la tecnología de sistemas aerobios. Se puede recurrir a que la biomasa de microorganismos tenga crecimiento fijo, crecimiento suspendido o una combinación de ellos para lograr el tratamiento de aguas residuales. En su mayoría, estas tecnologías, con excepción de los contactores biológicos rotativos, bombean oxígeno a un tanque de aireación para soportar el rápido crecimiento de las bacterias aerobias en suspensión que consumen y por ello conducen a altas reducciones de materia orgánica. Para la aplicación en SDMAR, los sistemas de tratamiento aerobio se aplican principalmente en sitios con limitaciones de terreno y estrictos requisitos locales en cuanto a la calidad del efluente. Se presentan a continuación cuatro tecnologías de tratamiento aerobio para ofrecer una perspectiva general al lector. Revise los recursos en la sección de referencias para una discusión más amplia de la tecnología aerobia. Las cuatro tecnologías que se presentan en este texto son:

- Lodos activados
- Sistemas de tratamiento por aireación extendida
- Reactores aerobios discontinuos de lotes secuenciales (SBRs: Sequencing Batchreactors)
- Contactores biológicos rotativos (RBCs: Rotating Biological Contactors)

El proceso de lodos activados se ha utilizado desde hace más de 130 años y representa el pilar del tratamiento secundario de aguas residuales municipales alrededor del mundo, ya que puede manejar flujos diarios entre miles y decenas de miles de metros cúbicos al día. Tal como se observa en la Figura 4.62, este sistema de tratamiento airea y mantiene en suspensión el afluente para permitir que las bacterias aerobias y otros tipos de microorganismos degraden la materia orgánica. Posteriormente, las aguas residuales ricas en biomasa bacteriana se envían a una cámara de clarificación en la cual los flóculos biológicos se sedimentan y se depositan en el fondo. Las aguas residuales más purificadas (efluente decantado) son enviadas después hacia un mecanismo de descarga o de tratamiento terciario, mientras que los lodos pueden ser removidos y parcialmente recirculados de nuevo hacia la primera cámara, donde la biomasa propicia un nuevo crecimiento bacteriano y continúan la degradación aerobia del nuevo afluente.

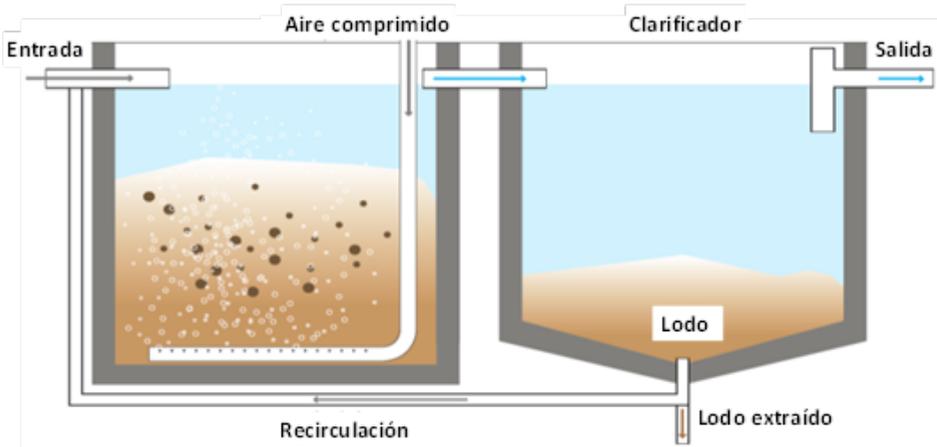


Figura 4.62. Esquema del sistema de tratamiento por lodos activados (Adaptada de Tilley et al., 2014, p. 124)

A continuación, en la Figura 4.63 se presentan fotografías de un sistema de lodos activados funcionando en escala plena para el tratamiento de las aguas residuales del municipio de Presidente Prudente, en el estado de São Paulo, Brasil.



Figura 4.63. Reactor de lodos activados (izquierda) y sedimentador secundario (derecha), en la modalidad de sistema convencional de la PTAR de Presidente Prudente, Sao Paulo-Brasil.

El proceso de lodos activados puede adaptarse para caudales mucho menores en un sistema más integral, conocido como sistema de aireación extendida (Figura 4.64), que puede ser usado en el SDMAR para fuentes tales como hospitales, escuelas o condominios. La planta de tratamiento simplifica el proceso de lodos activados al agregar varios compartimientos (tanques)

para la igualación o eculización del flujo, desinfección, así como para la retención y digestión de lodos, y en algunos casos, para sedimentación primaria. Conjugar estas funciones, dentro de un solo tanque, crea una unidad todo en uno que, dependiendo de la presencia del tamizado por medio de rejillas y la sedimentación de sólidos primarios, puede servir, en casos especiales, como el único mecanismo de tratamiento para fuentes con altos flujos y baja carga orgánica.

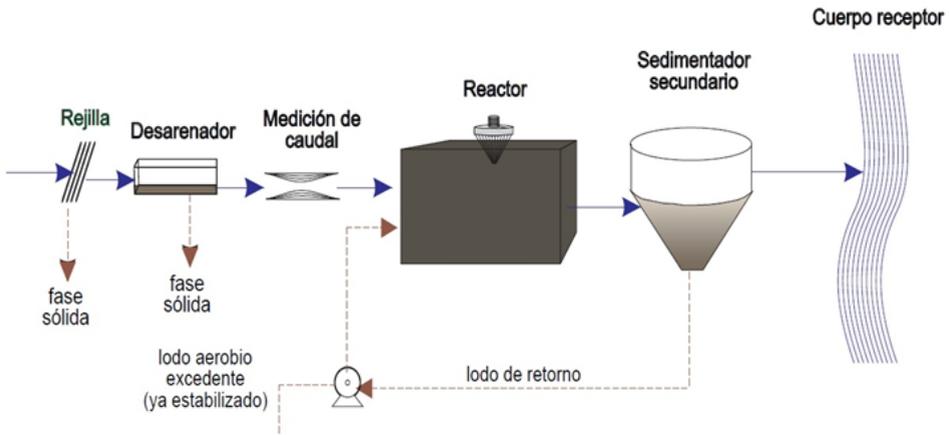


Figura 4.64. Esquema del sistema de aireación extendida
(Fuente: von Sperling, 2014, p. 26)

El reactor discontinuo secuencial es otra versión del proceso de lodos activados en el cual los procesos de aireación y sedimentación ocurren en un solo tanque, requiriendo menos área de terreno que los sistemas anteriores. Las aguas residuales se tratan mediante una serie de pasos que requieren de un tiempo específico y que involucran la igualación del flujo y a menudo la sedimentación primaria. Todas las etapas dependen del diseño y propósito del reactor discontinuo secuencial, que generalmente es tratar fuentes de aguas residuales con caudales bajos o intermitentes (US EPA, 1999c).

En contraste con los sistemas aerobios anteriores de “crecimiento suspendido”, el contactor biológico rotativo es un sistema de “crecimiento fijo” que consta de discos rotativos grandes con área superficial maximizada. Dicha característica proporciona espacio para la formación de la biopelícula que realiza la degradación microbiana de la materia orgánica, la cual se mejora con la rotación periódica del disco por dentro y por fuera del agua, lo que le brinda condiciones aerobias a la biopelícula. Parte de los equipos necesarios para el montaje de contactores biológicos rotativos deben ser importados, posiblemente a un alto costo; y de manera similar a la mayoría de los otros sistemas de tratamiento secundario mecanizado, requieren instalación, operación y mantenimiento por parte de expertos, así como requieren de una

fuente de potencia continua. En la Figura 4.65 se presentan fotografías de un sistema de biodiscos para el tratamiento de un caudal de 0,1 L/s de aguas residuales municipales.²⁸



Figura 4.65. Sistema de contactor biológico rotativo para tratamiento de un caudal de 0,1 L/s (izquierda); detalle de la disposición de los biodiscos giratorios en relación con el nivel del agua residual en la PTAR de Ginebra, Valle del Cauca-Colombia.

²⁸ Para una perspectiva general básica del proceso de lodos activados, consulte el Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento (Tilley et al., 2014), pp. 124-125. Para mayor información técnica y más detallada sobre las plantas tipo aireación extendida, consulte *Waste water Technology Fact Sheet on Package Plants* (US EPA, 2000g): https://www3.epa.gov/npdes/pubs/package_plant.pdf. Para más información técnica y detallada sobre los reactores discontinuos secuenciales, consulte *Wastewater Technology Fact Sheet on Sequencing Batch Reactors* (US EPA, 1999c): https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sbr_new.pdf.

Para una perspectiva general integral de los contactores biológicos rotativos, consulte *Fact Sheet Rotating Biological Contactors Spuhler* (2010): <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments/r>.



Claves para seleccionar y planificar sistemas de tratamiento secundario:

- Verifique los máximos niveles de descarga de contaminantes permitidos para efluentes tratados según lo establecido por la legislación nacional, regional, o local para el proyecto en particular y utilice tecnologías que logren ajustarse a dichos niveles;
- ya que hay una gran variedad de opciones de tratamiento que podrían ser adecuadas para una aplicación específica, se debe analizar con cuidado la publicidad que ofrece soluciones compactas (especialmente las relativas a la compra de opciones mecanizadas caras) sin aplicar un diligente proceso de selección de tecnologías;
- identifique los costos totales del ciclo de vida de las tecnologías que están siendo consideradas para incluir el costo de capital para su instalación, los costos recurrentes de operación y mantenimiento, la disponibilidad y costo de los repuestos y la longevidad del sistema. Aprenda sobre esto hablando con los propietarios de instalaciones cercanas que usan dichas tecnologías, antes de hacer cualquier compra, y verifique las referencias disponibles;
- revise los acuerdos con los subcontratistas para verificar que la construcción cumplirá con todos los requisitos locales y nacionales, que los tanques serán sometidos a pruebas de fugas, que el sistema será arrancado y probado antes de su entrega y que le entregarán un plan completo de operación y mantenimiento del sistema a su finalización.

4.7 Tratamiento terciario

Aún después del tratamiento secundario, los niveles de patógenos en el efluente pueden ser demasiado altos para su descarga o reutilización seguras. El tratamiento adicional para la reducción e inactivación de microorganismos puede lograrse, entre otras tecnologías, a través de la filtración y la desinfección, que se describirán en las siguientes secciones.

4.7.1 Filtración terciaria

En algunos casos, cuando los niveles de DBO y de patógenos (especialmente para protozoarios) en el efluente secundario aún son mucho más elevados que los requeridos definidos por la legislación para el vertimiento en cuerpos de agua receptores, el SDMAR debería usar una etapa de filtración terciaria, para ello se podría involucrar una filtración por medio de membranas, aunque la filtración lenta por medio de arena (Figura 4.66) es generalmente menos cara y produce excelentes resultados.



Figura 4.66. Filtro lento de arena en construcción, mostrando los lechos de grava y arena, cerca de Tullamore, Irlanda (Fuente: Molloy, 2013)

4.7.2 Desinfección

Existen tres métodos comunes de desinfección que pueden ser apropiados para el SDMAR, que son:

- Radiación usando luz ultravioleta (UV)
- Desinfección química usando cloro
- Desinfección física usando ozono

Ya que la ozonización es raramente utilizada en los países en vías de desarrollo, este texto se centrará en la desinfección por luz UV y la cloración.

4.7.2.1 Radiación ultravioleta

La luz ultravioleta es un componente natural de la luz solar y también puede ser generada mediante lámparas especiales. Los mayores niveles de energía del espectro ultravioleta son eficaces para la inactivación de los microorganismos. Aunque la luz UV generada artificialmente por lámparas especiales es comúnmente usada para desinfectar aguas residuales, sobre todo, es útil para sistemas grandes con altos volúmenes.

Sin embargo, la desinfección UV natural se practica frecuentemente en los países en desarrollo usando tanques poco profundos denominados lagunas de maduración, lagunas aerobias o de pulimento, tal como se mencionan en la Sección 4.6.3.3. Dichas lagunas, que pueden ser instaladas como unidades independientes, separadas de la serie de lagunas de estabilización, se diseñan con profundidades lo suficientemente bajas para permitir que la luz solar



penetre y desinfecte la totalidad de la columna de agua. Con la carga apropiada proveniente de un sistema de tratamiento secundario y una operación y mantenimiento rutinarios para mantener la superficie libre de vegetación flotante y emergente, el efluente puede desinfectarse hasta un nivel que cumpla con los estándares de descarga.²⁹

4.7.2.2 Cloración

Aunque las lagunas de pulimento tienen ventajas obvias, el método de desinfección primaria usado en sistemas de tratamiento de aguas y aguas residuales de todas las formas y tamaños del mundo, es la cloración. El cloro degrada los patógenos al entrar en contacto con él por un corto período de tiempo, siempre y cuando esté lo suficientemente concentrado para evitar que la materia orgánica presente en las aguas residuales lo consuma en su totalidad. Una cloración efectiva requiere:

- Adecuadas concentraciones de cloro.
- Mezcla completa, para combinar el cloro disuelto con las aguas residuales.
- Tiempo de contacto del orden de 20 a 30 minutos.

La concentración adecuada de cloro se agrega al efluente secundario, ya sea como un líquido diluido que es dosificado al flujo de aguas residuales a través de bombas, o como un sólido en la forma de tabletas que suministran cloro al efluente a medida que se disuelven. La determinación de dicha concentración se basa principalmente en la cantidad de materia orgánica del afluente, ya que puede alterar la composición del cloro y hacerlo menos eficaz para la desinfección. La cantidad de cloro que es “consumida” por la materia orgánica se llama “demanda de cloro”; de igual manera, la concentración de cloro necesaria depende del nivel de cloro residual permitido para vertimiento, basado en los estándares locales o regionales.

Aunque a pequeña escala, los costos del equipo alimentador son relativamente bajos, los costos de la solución de cloro y los de operación y mantenimiento son considerablemente elevados. Las tabletas de cloro sólido están disponibles a nivel comercial y son cargadas a tubos de alimentación vertical de entrega (Figura 4.67). La limpieza rutinaria es necesaria para remover el material endurecido e incrustado en los tubos que puede restringir la mezcla completa.³⁰

²⁹ Para mayor información técnica y más detalles sobre la desinfección usando UV, consulte *Waste water Technology Fact Sheet On Ultraviolet Disinfection* (US EPA, 1999d): <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/uv.pdf>.

³⁰ Para más información técnica y detallada sobre la cloración, consulte *Waste water Technology Fact Sheet On Chlorine Disinfection* (US EPA, 1999e): <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/chlo.pdf>.

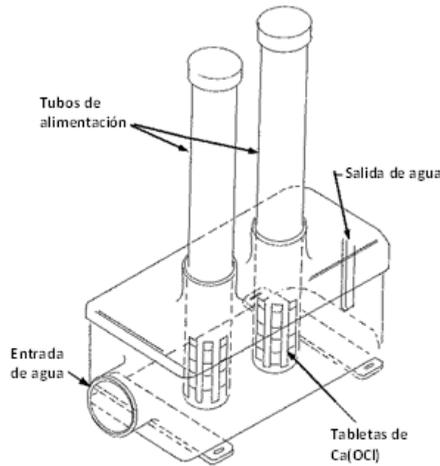


Figura 4.67. Esquema de dispositivo de cloración por tubos verticales (Fuente: Adaptada de Jones, 2004, p. 2)

Los cloradores líquidos descritos anteriormente utilizan cloro líquido, en la forma de hipoclorito de sodio, que no es otro que el blanqueador líquido utilizado a nivel doméstico. El blanqueador se mezcla con agua en un tanque de alimentación y se usa una bomba pequeña para dosificar la cantidad a adicionar a las aguas residuales en la medida que ingresan al tanque de contacto. Esta es una tecnología relativamente sencilla, pero requiere operación y mantenimiento rutinarios para funcionar apropiadamente. En la Figura 4.68 se ilustra un sistema de cloración para una planta de tratamiento de efluentes municipales de mayor tamaño; a la izquierda se aprecia el tanque de aplicación del cloro y a la derecha el tanque de contacto, caracterizado por un canal que propicia la mezcla para homogenizar la concentración del cloro en el líquido a desinfectar.



Figura 4.68. Sistema de desinfección del efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales en Presidente Prudente, São Paulo-Brasil a) zona de aplicación del cloro b) canal de contacto.



Consideraciones de manejo para sistemas de desinfección:

- ciertos patógenos (principalmente los protozoarios) en el afluente pueden ser resistentes a dosis bajas de cloro. Por lo tanto, si se sabe que la fuente de aguas residuales tiene altos niveles de protozoarios o si se percibe que el manejo de lodos (ricos en protozoarios) es una debilidad en el SDMAR podría ser necesario optar por una desinfección por UV;
- en caso de ser necesaria la implementación de sistemas de desinfección para una aplicación específica de SDMAR, es probable que también sea necesario monitorear la eficiencia de la desinfección por medio de pruebas microbiológicas de laboratorio rutinarias. Las pruebas de laboratorio también son útiles porque permiten evaluar la demanda de cloro del efluente secundario, lo cual sumado al límite de cloro residual basado en los estándares locales, determina la concentración de cloro inicial necesaria para la dosificación. Aunque en la literatura están disponibles valores estimados aproximados de la demanda de cloro para varias fuentes de aguas residuales y también se puede indagar sobre los valores usados en otras experiencias, es recomendable determinar la dosis necesaria con base en experiencias específicas en pruebas de laboratorio. Todo esto sugiere la necesidad de verificar las capacidades de los laboratorios locales al evaluar los costos totales del ciclo de vida del sistema de desinfección;
- es recomendable evaluar la posible generación de subproductos de la desinfección de efluentes con altos contenidos de materia orgánica, pues al utilizar desinfectantes a base de cloro, suelen producirse trihalometanos, los cuales poseen potencial efecto cancerígeno en humanos
- el contacto con el cloro, aún en dosis bajas, puede ser peligroso para los humanos y puede ser letal para la vida acuática en general. Use protección para ojos y manos en todo momento que se manipule esta sustancia tóxica y corrosiva y asegúrese de que los niveles residuales no superan los límites de vertimiento, especialmente si el cuerpo de agua receptor es un ecosistema delicado y valioso.

4.8 Fin del ciclo — descarga o reutilización segura

La descarga o vertimiento proveniente del SDMAR se refiere al desagüe del efluente tratado fuera del sitio en zanjas o alcantarillados combinados o directamente en arroyos, ríos, estuarios u océanos. La descarga del SDMAR es permisible en la mayoría de áreas siempre y cuando el efluente cumpla con las limitaciones establecidas por los gobiernos nacionales, regionales o locales. Esto suele implicar el trámite de permisos donde se especifican el tipo, número y frecuencia de las pruebas de laboratorio que deben realizarse para verificar el cumplimiento de los estándares.

Tal como se mencionó en los Capítulos 2 y 3, la reutilización del efluente tratado (a menudo complementado con el uso de biosólidos) frecuentemente involucra la irrigación de plantas de jardinería o de cultivos de especies con fines o no alimenticios y en una menor medida, la aplicación para acuicultura, lagunas de plantas macrófitas flotantes o para descarga (lavado) de inodoros. Aunque el estudio de los aspectos relativos a la seguridad del reúso de estos últimos tres escenarios, especialmente la reutilización para lavado de inodoros, es importante y requiere la investigación de los lineamientos locales, experiencia, y buenas prácticas; adicionalmente es fundamental entender los problemas de seguridad de los principales métodos agrícolas. Los métodos de reúso para irrigación por inundación del terreno son: irrigación por medio de zanjas poco profundas, irrigación por aspersion e irrigación por goteo del efluente, los cuales requieren consideraciones especiales en términos de su aplicación ingenieril y del análisis de riesgo microbiológico tanto para los consumidores de los productos cultivados como desde el punto de vista ocupacional para los agricultores que estarán en contacto con las aguas residuales tratadas y el suelo contaminado.



Reutilización segura de aguas residuales en la agricultura:

En las áreas rurales y periurbanas de la mayoría de países en desarrollo, la reutilización de aguas residuales para irrigación es una práctica común. Las aguas residuales a menudo son la única fuente de agua para irrigación en dichas áreas. Aún en zonas donde existen otras fuentes de agua, los pequeños agricultores a menudo prefieren aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas porque su alto contenido de nutrientes puede reducir, o aún eliminar, la necesidad de costosos fertilizantes químicos. En vista de esta práctica, es necesario considerar los riesgos de salud y ambientales, pero al mismo tiempo se debe considerar la importancia de dicho reúso para la subsistencia de los incontables pequeños agricultores.

Estos principios y métodos de reutilización segura son el tema de un manual de capacitación para escuelas de campo para agricultores publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, financiado por el Programa de Desafío para Agua y Alimentos del CGIAR. El documento tiene como título “On farm practices for safe use of wastewater in urban and peri-urban horticulture” (Sobre las prácticas agrícolas para el uso seguro de aguas residuales en la horticultura urbana y periurbana), el cual ofrece explicaciones fáciles de entender y ejercicios prácticos útiles para que los involucrados puedan aplicar de manera segura la reutilización de aguas residuales en agricultura.

El lector podrá descargar aquí la guía y estudiar el programa del CGIAR (FAO, 2019): <https://www.fao.org/3/CA1891EN/ca1891en.pdf/>.



Los demás principales procesos de reúso incluyen la acuicultura y las lagunas de estabilización de plantas flotantes. La acuicultura es el cultivo de especies hidrobiológicas; en el caso del cultivo de peces, su énfasis se refiere a aquellas especies que consumen algas y otros organismos en el agua cuyo contenido de nutrientes es enriquecido con la adición de aguas residuales tratadas. Los estanques para piscicultura requieren climas cálidos tropicales; además, los peces deben ser capaces de tolerar bajo contenido de oxígeno disuelto en el agua. Aunque los peces no mejoran en gran medida la calidad del agua, su valor económico y nutritivo (ya sea como alimento para humanos o animales) puede compensar los costos de capital del sistema y proporcionar una fuente barata de proteína para las áreas que carecen de ella.

La adición del efluente a estanques de plantas flotantes puede ser usada para cultivar biomasa en la forma de jacintos de agua, lentejas acuáticas ricas en proteína y otras macrófitas cuyas raíces capturan nutrientes y contribuyen a purificar el efluente. Estos estanques son normalmente poco profundos y pueden recurrir al uso de aireación mecánica, ya que su propósito primordial es la remoción de DBO y sólidos mientras producen biomasa. La biomasa generada puede tener un valor económico local para alimentación de animales o residuos verdes para procesos tales como la digestión aerobia o para compostaje.

El efluente tratado también puede servir para uso en interiores en edificios o para lavado de inodoros en algunas áreas, pero ello requiere de estrictos controles sobre la calidad del efluente y estándares del sistema de tuberías. En tales situaciones, la tubería de agua de reúso debe tener un código de color específico, así como los dispositivos necesarios para proteger las instalaciones de agua potable del cruce de conexiones. A medida que el precio del agua potable aumenta y su disponibilidad disminuye, seguirán surgiendo métodos más innovadores de reutilización y reciclaje de efluentes.

4.9 Determinación de nivel de tratamiento requerido

Determinar el nivel de tratamiento de las aguas residuales requerido para lograr metas específicas es un paso importante en la selección de tecnologías para SDMAR. Esta evaluación se basa en los requisitos de evaluación de efluentes usados para:

- Lograr el cumplimiento de las normas relativas al vertimiento de efluentes.
- Cumplir con los estándares de reutilización.

Es fundamental tomar esta determinación en las etapas de planificación del desarrollo del proyecto. Fallar en proporcionar suficiente tratamiento a las aguas residuales puede resultar en notificaciones de violación de las normas,

multas, órdenes de cumplimiento o reformas obligatorias del SDMAR con capacidad de tratamiento adicional. Por otra parte, brindar más tratamiento que el necesario puede resultar en inversiones innecesarias de costos de capital y operativos.

4.9.1 Cumplimiento de los estándares de descarga u otros niveles de acatamiento normativo

Las directrices para vertimiento de aguas residuales tratadas en el medio ambiente son altamente variables y dependen de los estándares nacionales, y en muchos casos, de los requisitos locales para cuencas hidrográficas específicas. A menudo, los estándares de descarga están determinados por la calidad del agua superficial donde se pretende hacer la descarga. En Filipinas, por ejemplo, las aguas Clase A son prístinas y altamente protegidas, requiriendo un grado muy elevado de tratamiento de aguas residuales; situación similar ocurre en Brasil con las aguas de “clase especial”. Por otra parte, los ríos Clase C, típicamente en áreas urbanas, ya están muy impactados por la contaminación de las aguas y permiten en la descarga mayores concentraciones de materia orgánica, sólidos y patógenos; en el contexto de los países latinoamericanos se aplican condiciones semejantes relacionadas con la clasificación de las aguas superficiales, sus usos y límites de contaminantes en vertimientos; como por ejemplo, para el caso colombiano entre las normativas usadas está la Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para Brasil se utiliza la Resolución CONAMA No 430, de 13 de mayo de 2011.

En muchos países en desarrollo, los estándares normativos para efluentes están establecidos al nivel nacional para materia orgánica, sólidos suspendidos, varios compuestos químicos o nutrientes y grasas y aceites. Las regulaciones basadas en estos parámetros son necesarias para garantizar que el medio ambiente circundante, particularmente los cuerpos de agua cercanos en los que hay contacto corporal primario o que son usados para suministro de agua potable, no reciban un impacto negativo por la descarga y que la vida acuática y la salud humana estén protegidas. Es importante durante el proceso de planificación revisar los aspectos normativos de descargas con las autoridades reguladoras para entender y verificar completamente los requisitos de vertimientos para el proyecto específico.

4.9.2 Cumplimiento de los estándares de reutilización

La reutilización del efluente para agricultura, acuicultura y otras actividades debe hacerse de una forma segura e higiénica para proteger a los trabajadores y minimizar el flujo o escurrimiento superficial del efluente. Además de los estándares normativos para reutilización al nivel nacional de cada país, que para el caso de Colombia se determinan mediante el Decreto 1076 de 26



de mayo de 2015 en el que se promueve el reúso de las aguas residuales a través de los Planes de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos, la Organización Mundial de la Salud también ha establecido estándares para la reutilización de aguas residuales en la agricultura y acuicultura. Sus volúmenes sobre el uso en la agricultura: Volumen 2 (WHO, 2006a), uso de aguas residuales y excretas en la acuicultura: Volumen 3 (WHO, 2006b) y uso de excretas y aguas grises en la agricultura: Volumen 4 (WHO, 2006c), deberían ser consultados antes de llevar a cabo esta actividad. Como un resumen de la guía ofrecida, en general, las aguas residuales reutilizadas en la agricultura deberían tener un valor medio de menos de un huevo de helminto (un protozooario patógeno) por litro de muestra del líquido para el 90 por ciento de todas las muestras, mientras que, con base en las condiciones específicas de irrigación y cultivo, debe haber una reducción entre el 99 y el 99.99999 por ciento de rotavirus para asegurar una reutilización segura. Esto se puede lograr mediante el uso de procedimientos de reducción microbiana que complementen el tratamiento de aguas residuales, tales como la propia irrigación por goteo o aspersión, el lavado, la desinfección, el pelado o la cocción de los productos, los cuales tienen valores estimados de reducción del porcentaje de microorganismos, situaciones que deberían ser bien comprendidas cuando se planifique la reutilización para irrigación.³¹

En el contexto de Colombia, la Resolución No. 1256 del 23 de noviembre de 2021, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia, 2021), en su Artículo 5 establece que las aguas residuales se podrán usar en usos agrícolas e industriales. Por su parte, el Decreto 1076 de mayo 26 de 2015 (Colombia, 2015b) define dichos usos de la siguiente manera:

- Uso agrícola, según el Artículo 2.2.3.3.2.5: Se entiende por uso agrícola del agua, su utilización para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias.
- Uso industrial, según el Artículo 2.2.3.3.2.8: Se entiende por uso industrial del agua, su utilización en actividades tales como:

Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexas y complementarios;

³¹ Para una descripción más detallada de estos estándares de reutilización, consulte las Directrices de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises

- o Generación de energía;
- o Minería;
- o Hidrocarburos;
- o Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares;
- o Elaboración de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución.

Para efectos del reúso de aguas residuales con fines agrícolas, el Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015 establece los criterios de calidad para uso agrícola, donde se listan las concentraciones máximas permisibles de diversos elementos químicos, y adicionalmente determina que el NMP de coliformes totales no deberá exceder de 5.000 y el NMP de coliformes fecales no deberá exceder de 1.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto. Como complemento a ello, el Artículo 5 de la Resolución No. 1256 de 2021 define algunos criterios de calidad adicionales de aguas residuales para uso agrícola.



Aplicaciones prácticas para reutilización del efluente:

La capacidad de reutilizar el efluente tratado puede ser una motivación significativa para aumentar la disposición de invertir en el tratamiento de aguas residuales. Siga esta guía práctica para maximizar ese valor agregado:

- El nivel de tratamiento necesario para cumplir con los estándares de reutilización de aguas residuales puede resultar en la eventual selección de tecnologías caras. Considere llevar a cabo un análisis de costo-beneficio para determinar el nivel adecuado de tratamiento basado en los costos y beneficios de la actividad de reúso deseado y el tratamiento adicional necesario;
- Considere cómo la variabilidad del flujo podría ejercer un impacto en las actividades de reutilización. Para necesidades críticas tales como irrigación agrícola, verifique que existan fuentes alternativas para su uso durante los tiempos de bajo flujo de aguas residuales; y
- La operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento para reutilización, incluyendo sistemas de filtración y desinfección, es crítico para mantener la salud y seguridad ambiental. Determine los requisitos especiales de operación y mantenimiento para el equipo de reutilización y detállelos en el correspondiente plan de operación y mantenimiento.

05

**SELECCIÓN DE
TECNOLOGÍAS
PARA TRATAMIENTO
DE AGUAS
RESIDUALES**

En este capítulo se discute cómo la selección de tecnologías para SDMAR puede ser enriquecida, al comprender bien las características de la fuente de aguas residuales de un proyecto; así como el lugar y el área de terreno disponibles para el manejo de los efluentes. En tal sentido, se comparan las ventajas y desventajas de diferentes tecnologías de SDMAR, para ayudar a los profesionales a seleccionar las mejores tecnologías para sus proyectos.



Figura 5.1. Planta para tratamiento de aguas residuales con Reactor Discontinuo Secuencial para la plaza de mercado y centro comercial en la ciudad de San Fernando, La Unión, Filipinas. Este es un ejemplo de cómo la limitada disponibilidad de terreno puede ser el factor clave en el proceso de toma de decisiones para seleccionar la tecnología para SDMAR

PREÁMBULO

La Figura 5.1 es un ejemplo de cómo una tecnología altamente mecanizada podría ser apropiada para los países en desarrollo. La meta del proyecto fue mejorar el saneamiento en el distrito comercial central en la ciudad de San Fernando, Provincia de La Unión, en la isla de Luzon al norte de Filipinas. La ciudad no cuenta con un sistema centralizado para tratamiento de aguas residuales, por lo que se requiere de un SDMAR para tratar las descargas de efluentes. Para este proyecto, las aguas residuales de varias fuentes comerciales, incluyendo el mercado público, son recolectadas en tanques de bombeo que las envían a la planta de tratamiento. Para este proyecto, la falta de espacio, el elevado caudal y la alta concentración de las aguas residuales fueron los factores limitantes.

Para abordar este problema complejo, los diseñadores del sistema seleccionaron el reactor discontinuo secuencial (SBR: Sequencing Batch Reactor) con tecnología de desinfección por medio de la aplicación de cloro. Los reactores discontinuos secuenciales, descritos en el Capítulo 4, son una de las formas de tratamiento aerobio, pero a diferencia de las otras alternativas de lodos activados, requieren muy poca operación y mantenimiento de parte del personal de mantenimiento del municipio.

Entre los expertos en desarrollo, existe un debate acerca de los méritos de usar tecnologías mecanizadas en SDMAR tales como el reactor discontinuo secuencial para el tratamiento de aguas residuales. Se suele creer que esos reactores son demasiado complejos y que las comunidades de países en vías de desarrollo no tendrán condiciones para darle mantenimiento, que la electricidad es demasiado cara y que en un cierto momento se suspenderán los sistemas para ahorrar energía. Aunque esto puede ser verdad en algunas regiones, la pregunta real es quién tomará esta determinación; para el proyecto de San Fernando, fue la ciudad con el apoyo del equipo de desarrollo que optó por esta tecnología. La decisión se basó en la capacidad local del departamento de ingeniería de la ciudad y de su personal para operar el sistema de manera adecuada, en el nivel de interés en mejorar las condiciones sanitarias de la ciudad expresadas por los gobiernos local y regional y en el respaldo de los interesados que estuvieron involucrados en el proyecto desde su inicio.

En este caso, después de varios años desde su instalación, al parecer fue una decisión acertada ya que el sistema aún está funcionando adecuadamente y ha llenado las expectativas. La ciudad de San Fernando ofrece un buen ejemplo del proceso de planificación de abajo hacia arriba, con poder de decisión de las bases, en funcionamiento y de cómo la toma de decisiones para tecnologías de SDMAR puede y debería ser un proceso dirigido por las partes involucradas. Es interesante notar que el éxito rápido y visible del proyecto del mercado público en la ciudad de San Fernando condujo a replicar el proceso para nuevos

sistemas de tratamiento de aguas residuales tales como su centro de sacrificio de ganado, un sistema interceptor comunitario y un programa integral más novedoso para el manejo de aguas servidas. La ciudad de San Fernando está en camino a adoptar el SDMAR como un modelo viable para la mejora del saneamiento a gran escala en sus áreas urbanas.

5.1 Interpretación de los datos recolectados a partir de la fuente y el sitio

Cuando la fuente se caracteriza y se evalúa el sitio, el diseñador puede comenzar a tomar algunas decisiones con respecto a la selección de tecnologías para el sistema de manejo de aguas residuales. Esto comienza por la evaluación de los datos recolectados, la determinación de las condiciones limitantes y las condiciones específicas presentadas por el proyecto. Los datos recolectados hasta este punto se pueden resumir en la lista de control que se representa como la Tabla 5.1 a continuación.

Tabla 5.1. Resumen de la lista de control necesaria para la consideración de tecnologías

Parámetros	Descripción	SI	NO
Cantidad de flujo a tratar	¿Se ha determinado el caudal de aguas residuales de diseño?		
Carga orgánica	¿Se ha determinado la tasa de carga orgánica?		
Variabilidad del flujo	¿Existe variación en los flujos a nivel diario, semanal o estacional? ¿Puede ser de utilidad la ecualización del flujo?		
Nutrientes y otros aspectos problemáticos de los contaminantes	¿Será requerido el manejo especial de nutrientes, grasa, pelusa, residuos sólidos en particular, temperatura, pH u otro contaminante en el agua residual?		
Selección del(los) sitio(s) y área(s)	Al analizar las opciones de posibles terrenos disponibles, ¿se han estimado las áreas requeridas para el manejo del SDMAR?		
Características de los horizontes del suelo	¿Se han evaluado los suelos en cuanto a la profundidad de estratos, se han caracterizado los tipos de suelos, se conocen propiedades fisicomecánicas básicas, se han identificado niveles de aguas subterráneas oscilantes según la estación climática y otros factores limitantes?		
Pendiente y topografía del sitio	¿Se ha identificado y registrado la naturaleza de la pendiente y el relieve del sitio?		
Tasa de infiltración a largo plazo del sitio y otros problemas de suelos	¿Es la dispersión en el suelo una opción para el efluente, ha sido estimada una tasa de infiltración a largo plazo? Si se pretende instalar estructuras a nivel subsuperficial, ¿se ha evaluado la estabilidad de los suelos?		

Aguas superficiales	¿Se han identificado y cuantificado los aspectos relativos a las aguas superficiales y zonas de inundación relacionadas con estas?		
Usos del suelo	¿Se han identificado el uso del suelo circundante y se ha abordado la eventualidad de posibles conflictos? ¿qué indicaciones ofrece el plan de ordenamiento territorial para el lugar?		
Servicios básicos y SDMAR preexistentes	¿Hay electricidad y/o agua disponible en los lugares escogidos y han sido identificados y abordados otros problemas de infraestructura tales como SDMAR preexistentes?		
Acceso	¿Es suficiente el acceso al sitio para la instalación, operación y mantenimiento y usos de equipos?		
Reutilización y aspectos normativos	¿Se han identificado y abordado las oportunidades de reutilización y posibles regulaciones limitantes?		

5.1.1 Concepto de la relación entre el caudal y la disponibilidad de terreno

Determinar el área de terreno que se encuentra disponible para el volumen de aguas residuales a tratar es un insumo crítico para identificar las tecnologías apropiadas. Después de que se ha determinado, se puede usar la relación entre el Caudal y la Disponibilidad de Terreno (Caudal: Área → Q:A) para indicar cuáles tipos de tecnologías de SDMAR podrían o no ser apropiadas para la fuente y el sitio específicos. La relación Q:A es un número que está expresado en litros al día por metro cuadrado de terreno disponible:

$$Q:A = \text{Caudal de diseño (L/día)} / \text{Área de terreno disponible (m}^2\text{)}$$

Las diferentes tecnologías para tratamiento de aguas residuales tienen diferentes requisitos de espacio. Por ejemplo, las lagunas de estabilización requieren de un área extensa, mientras que los sistemas de tratamiento aerobio para el mismo caudal tienen requisitos de espacio mucho menores; por tal razón, la relación Q:A ayuda a cuantificar este concepto.

En términos generales, mientras más alta es la relación Q:A (más flujo por metro cuadrado de área disponible), más intensivo tiene que ser el manejo de las aguas residuales. Siguiendo con el ejemplo, las lagunas de estabilización y los humedales artificiales suelen ser tecnologías pasivas con relativamente pocos requisitos en cuanto a su manejo, con excepción de algún mantenimiento periódico. Por otra parte, los sistemas aerobios son altamente mecanizados y presentan requisitos de operación y mantenimiento y electricidad significativos. Estas dos tecnologías representan ambos extremos del espectro de requisitos de terreno.

Consulte la Tabla 5.2 donde las tecnologías son clasificadas generalmente de acuerdo con la relación Q:A. Interpretar la tabla es sencillo - si la relación Q:A para una fuente y sitio específicos está por encima del rango recomendado de Q:A para una cierta tecnología de SDMAR, eso generalmente significa que no hay suficiente espacio de terreno disponible para esa tecnología y que se debería escoger otra opción con un rango mayor de Q:A. Aunque por supuesto, hay otros muchos factores que no están relacionados con el caudal y el área de terreno y que intervienen en la selección de tecnologías, lo cual significa que estos rangos de Q:A con frecuencia pueden ser muy flexibles, los tres rangos mostrados en la Tabla 5.2 pareados con sus tecnologías apropiadas pueden servir como una buena guía inicial de selección.

Tabla 5.2. Relación Q:A y cómo se relaciona con la selección de tecnologías

Rango de la Relación Q:A	Nivel de Mecanización	Tecnologías Apropriadas - Tratamiento Primario	Tecnologías Apropriadas - Tratamiento Secundario
Generalmente menos de 250	A menudo no mecanizado	Lagunas anaerobias	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de dispersión en el suelo en suelos arcillosos; • Sistemas de irrigación por goteo; • Lagunas facultativas; • Lagunas aerobias; • Humedales artificiales de flujo superficial
Usualmente entre 250 y 1000	Alguna mecanización, tal como los sistemas de bombeo, puede ayudar a reducir los requisitos de terreno	Biodigestor anaerobio	<ul style="list-style-type: none"> • sistemas de dispersión en el suelo en suelos arenosos; • Humedales artificiales de flujo superficial; • Lagunas aireadas; • Filtros con medio soporte; • Sistemas de montículos
Generalmente mayor que 1000	Usualmente requiere mecanización total	Tanques sépticos, Reactores anaerobios con deflectores	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados; • Reactores discontinuos secuenciales; • Contactores biológicos rotativos; • Lodos activados, aireación extendida

Con esta información y con la de la Tabla 5.1, el profesional tiene suficiente información para comenzar a identificar cuáles tecnologías podrían ser adecuadas para su proyecto específico, y cuáles no. Las siguientes secciones abordarán cómo el número de tecnologías posiblemente apropiadas se pueden reducir a las más adecuadas, dado el caudal específico de la fuente y las características del sitio del proyecto, así como ciertos requisitos de recursos de las diversas tecnologías.



Lagunas de estabilización usadas para el manejo de residuos sépticos en Dumaguete, Filipinas.

Con base en la caracterización de la fuente y la evaluación del sitio, la administración de LORMA tuvo conocimiento de lo siguiente:

- Tenían una pequeña área disponible y un caudal elevado (una relación Q:A alta), lo que puso de manifiesto la necesidad de un SDMAR altamente mecanizado, constituido finalmente por un reactor discontinuo secuencial (Figura 5.2);
- Debido al potencial de inundaciones del lugar, sería requerido un sistema localizado por encima del nivel natural del terreno;
- La reutilización del efluente tratado no fue una consideración ya que la administración local favoreció la implementación de un sistema de descarga a un cuerpo receptor con cumplimiento de la legislación;
- Un alcantarillado por gravedad podía ser usado para conectar los tanques sépticos existentes, pero se requeriría de una estación de elevación del flujo para bombear las aguas residuales hasta la planta de tratamiento;
- El manejo de grasas fue requerido debido a las actividades de preparación de alimentos, y ya que el espacio exterior para un interceptor de grasa externo era limitado, se decidió que se usarían trampas de grasa debajo de los lavaplatos;

Se requería el manejo de la pelusa procedente de la lavandería en el sitio y se eligieron trampas de pelusa individuales para cada máquina lavadora industrial, como método de pretratamiento.





Figura 5.2. Sistema de reactor discontinuo secuencial del Centro Médico LORMA instalado por BioSafe, Inc.

Una evaluación del sistema, realizada cuatro años después de haber sido instalado, indica que está funcionando bien. Es una solución altamente exitosa que indica que aún en países en vías de desarrollo, es factible la aplicación de sistemas mecanizados para el manejo de aguas residuales.

Para el proyecto de LORMA, la administración se contactó con un cierto número de proveedores de servicios y recibió cotizaciones de varios de ellos antes de seleccionar a BioSafe, Inc. A partir de esta experiencia, el presidente de LORMA, el Dr. Rufino Macagba, ha expresado las siguientes lecciones aprendidas:

- La institución o la comunidad que requieren del servicio deben iniciar con la identificación de por lo menos tres posibles contratistas usando recomendaciones de otros profesionales de la industria;
- antes de seleccionar una oferta, se debe revisar minuciosamente las referencias y verificar que el propietario está legalmente autorizado para operar en el área;
- se recomienda visitar instalaciones similares previamente ejecutadas por el contratista y hablar con los propietarios y/o usuarios acerca de sus experiencias. Esto ayudará al ejecutor a tener una idea de cómo se comportará el sistema una vez sea instalado;
- solicitar un cronograma de las fases de la construcción junto con los ítems o etapas más significativos del proyecto. Es importante que los pagos o desembolsos se desarrollen con base en la ejecución de los ítems;
- es fundamental asegurarse de que el contratista esté trabajando acorde con las directrices de regulación local para garantizar la obtención de todos los permisos requeridos y que todos los impuestos y tasas sean pagados;
- preparar un contrato, con la debida asesoría jurídica, en el que especifique claramente los servicios contratados y el plazo de entrega.

5.2 Estrategias para la selección de tecnologías

El propósito de las siguientes secciones es organizar la información sobre cada una de las tecnologías discutidas en este libro y así dar una guía adicional para el proceso de selección. La guía no pretende ser exhaustiva ya que hay docenas de tecnologías para tratamiento de efluentes que podrían ser utilizadas para el manejo de un tipo de aguas residuales específico, y nuevas tecnologías están siendo desarrolladas año tras año. La mayoría caen dentro de las categorías presentadas o están lo suficientemente cerca de otras, por lo que el lector puede hacer comparaciones. Más importante aún, la información se ofrece para que los lectores puedan entender mejor la relación entre las características de la fuente y las restricciones del sitio o condiciones limitantes y cómo considerar ambas puede conducir hacia la selección de tecnologías de SDMAR.

Las Tablas 5.3 a 5.7 enumeran varias características de las tecnologías de SDMAR que se presentan agrupadas con base en su orden dentro del esquema del Modelo de Desarrollo de SDMAR, que agrupa las tecnologías de la siguiente manera:

- Tecnologías de pretratamiento: Tabla 5.3.
- Tecnologías de conducción: Tabla 5.4.
- Tecnologías de tratamiento primario: Tabla 5.5.
- Tecnologías de tratamiento secundario: Tabla 5.6.
- Tecnologías de tratamiento terciario: Tabla 5.7.

Las tablas califican cómo cada tecnología de SDMAR puede ser definida en términos de las consideraciones de su fuente/sitio, así como el costo de operación y mantenimiento y la efectividad del tratamiento. Las tablas simplemente tratan de ayudar a comparar las tecnologías generales y no deben ser consideradas como recomendaciones conclusivas para la selección de alguna de las tecnologías para un proyecto específico. En general, se recomienda a los lectores que usen la información de las tablas para hacer una evaluación general de cuáles tecnologías podrían ser apropiadas para sus necesidades específicas y que luego hagan una búsqueda más profunda de las informaciones asociadas a tales tecnologías antes de hacer la selección definitiva. Las fuentes de información adicional pueden incluir, entre otras, las referencias proporcionadas en este texto, contratistas que están suministrando servicios con sistemas de tratamiento de aguas residuales, usuarios de tecnologías para tratamiento de efluentes, autoridades locales y grupos de la sociedad civil local que puedan estar participando en este campo.

La clave para el efectivo pretratamiento es la operación y mantenimiento. Las trampas de grasa ofrecen un buen ejemplo, los tipos de trampa de grasa dispuestas bajo el lavaplatos es un sistema de bajo costo que funcionará bien si recibe mantenimiento adecuado. Las trampas de grasa en exteriores son



mucho más fáciles de mantener, pero su costo es mayor debido al bombeo periódico, mientras que el interceptor de grasa de alta eficiencia es más caro, pero genera un subproducto susceptible de ser utilizado.

La planificación cuidadosa de las rutas de los alcantarillados para minimizar la variabilidad de la pendiente ayuda a mantener los costos bajos a la vez que se pueden evitar fallas, asegurándose de que las tuberías no tengan fugas y que están adecuadamente protegidas con material de base por debajo de la tubería y suficiente cobertura de suelo sobre la misma. Además de la adecuada instalación, la educación de los usuarios y labores de operación y mantenimiento preventivas son claves para la buena operación del alcantarillado; para el caso de alcantarillados asociados a tanques sépticos se debe implementar el pretratamiento adecuado (separación de residuos sólidos de gran tamaño) y adicionalmente se requiere el manejo integral de los residuos sépticos.

Cuando se cumplen todas estas condiciones, los métodos de alcantarillado innovadores, tales como sistemas libres de sólidos, sistemas simplificados condominiales y sistemas a presión, pueden ser exitosamente aplicados en los países en vías de desarrollo. Como ejemplo, en la Isla de Panglao, una comunidad turística en Filipinas, se utiliza sistemas de bombeo para cada uno de sus hoteles localizados en zona de playa para remover las aguas residuales de la orilla y bombearlas a una instalación central para su respectivo tratamiento. También se ha utilizado el alcantarillado simplificado con gran éxito en diversas localidades de Brasil y otros lugares para comunidades de más de 20,000 personas.

Los sistemas de tratamiento primario remueven los sólidos más densos en las aguas residuales a través de la sedimentación y las grasas y aceites a través de la flotación. Los tanques sépticos pueden funcionar bien cuando han sido adecuadamente dimensionados y reciben mantenimiento apropiado. Los reactores anaerobios con deflectores son más eficientes que los tanques sépticos, pero aun requieren tratamiento secundario. La digestión anaerobia para la producción de biogás (metano) es viable si los residuos contienen un alto porcentaje de sólidos volátiles, como por ejemplo el estiércol fresco de animales; dichos residuos pueden ser mezclados con residuos humanos, de cosechas o restos de alimentos para mejorar la producción de metano. Las lagunas de estabilización anaerobias son viables siempre que puedan ser ubicadas bastante alejadas de los centros poblacionales. Aplique criterios y conocimientos ingenieriles calificados para obtener el mejor diseño de los sistemas; los sistemas adecuadamente diseñados proveerán un grado moderado de tratamiento de aguas residuales, a menudo acorde con los de tratamientos secundarios estándar, aunque la variabilidad estacional podría impactar en la calidad del efluente. Las lagunas facultativas, las lagunas aerobias o los humedales artificiales son frecuentemente instalados después de lagunas anaerobias.

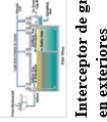
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sitio	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 Trampa de grasa bajo el lavadero	Bajo	Media	Baja - puede realizar lavado durante flujos altos	Baja	Cualquier	N/A	Bajo	Altos - deben dar servicio diariamente	Media	Puede generar olor en la cocina al dársele mantenimiento
 Interceptor de grasa en exteriores	Medio a alto	Cualquiera	Cualquier	Alta - usualmente instalado en áreas de estacionamiento	Baja	Media	Medio	Bajos - el contenido del tanque debe ser bombeado cada cierto número de meses	Media	Debe estimarse el tráfico si se instala en el área de estacionamiento; la grasa recolectada es saturada y no es útil como materia prima para productos comerciales
 Interceptor de grasa de alta eficiencia	Cualquier	Alta	Cualquier	Media - se puede instalar dentro de la cocina o afuera de las instalaciones	Cualquier	Baja	Medio	Medios - renueva la grasa cada mes; se puede hacer manualmente o con camión de bombeo	Alta	Es posible que el interceptor no esté disponible localmente; la grasa recolectada es casi pura y puede ser usada como materia prima para biodiesel u otros productos
 Trampa de residuos sólidos	Cualquier	Cualquier	Cualquier	Baja	Cualquier	N/A	Bajo	Altos - limpieza diaria	Media	Olor si no se le da mantenimiento regular; obstrucción del alcantarillado si no se limpia con frecuencia
 Trampa de pelusa	Cualquier	Media	Cualquier	Baja	N/A	N/A	Bajo	Altos - requiere de limpieza diaria	Media	Productos adaptados para uso en máquinas individuales o para todo el sistema.

Tabla 5.3. Guía de comparación de tecnologías de pretratamiento, basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

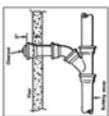
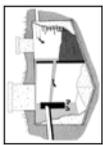
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sitio	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 Alcantarillados para edificaciones	Cualquier	Cualquier	Cualquier - asegúrese de dimensionar para caudales pico	Baja	Cualquiera, preferiblemente 1 % al 2 % para flujo por gravedad; use cámaras de caída en sitios con pendiente pronunciada	Baja - generalmente excavado a bajas profundidades	Bajo	Bajos	N/A	Mantenga los residuos sólidos de gran tamaño fuera del alcantarillado. Use tapas de acceso selladas y con cierre para seguridad.
 Alcantarillados simplificados	Bajo a Medio	Baja	Baja a Media	Baja	Baja	Baja a Media	Bajo	Medios	Baja	Preferido en zonas de denso uso del terreno a nivel residencial; es necesaria la cooperación de los propietarios de viviendas para operación y mantenimiento
 Alcantarillados libres de sólidos	Bajo a Medio	Media a alta	Baja a Media	Media	Baja a Media	Niveles medios - altos de aguas subterráneas o el lecho de roca pueden limitar la profundidad de excavación del tanque	Medio a alto	Medios a altos	Media	Debe tener un programa de manejo de residuos sépticos y limpieza frecuente de los tanques
 Alcantarillados a presión	Bajo a Medio	Baja a Media	Baja a Media	Media	Cualquier	Media a alta	Alto	Medios a altos	Alta	Electricidad necesaria para bombeo

Tabla 5.4. Guía de comparación de tecnologías de alcantarillado basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

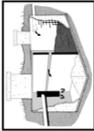
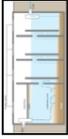
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sitio	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 Tanque séptico	Bajo	Baja a media - usualmente para fuente(s) residencial(es)	Cualquier	Baja	Cualquier	Niveles medios-altos de aguas subterráneas o el lecho de roca pueden limitar la profundidad de excavación del tanque	Bajo	Bajos	Baja	Olores en caso de no ser ventilado de manera adecuada
 Reactor anaerobio con defletores	Medio	Media, para fuente(s) residencial(es) y/o comercial(es)	Cualquier	Baja a Media	Cualquier	Media. Niveles medios-altos de aguas subterráneas o el lecho de roca pueden limitar la profundidad de excavación del tanque	Medio	Bajos	Alta	Olores en caso de no ser ventilado de manera adecuada
 Biodigestor anaerobio	Bajo a Medio	Alto - estiércol animal, residuos de alimentos; requiere ingeniería cuidadosa para un diseño adecuado	Baja	Media	Baja a Media	Depende del tipo de digestor: media para domos y tambores flotantes, baja para unidades tubulares	Medio a alto	Altos	Media	Olor; monitoreo y seguridad para la producción de gas; uso del biogás residual y biosólidos
 Laguna Anaerobia	Alto	Alta - para afluentes con fuertes cargas de materia orgánica	Media	Alta	Baja	Alta - rango de profundidad de 2 a 5 m, con frecuencia limitado por aguas subterráneas o lecho de roca	Medio a alto	Bajos	Media	Olor; zancudos; mantener la distancia adecuada a centros poblacionales

Tabla 5.5. Guía de comparación de tecnologías de tratamiento primario basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

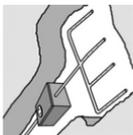
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sifto	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 Sistemas no mecánicos de dispersión en el suelo	Bajo	Baja	Cualquier	Media a alta	Baja a Media	Media - los suelos arcillosos no son los ideales e incrementan las necesidades de terreno	Bajo a Medio	Bajos	Media a alta	Infiltración poco eficiente por evaluación inadecuada de los suelos, resultando en malas tasas de infiltración a largo plazo, mala o inapropiada selección de la profundidad del suelo
 Sistemas mecánicos de dispersión en el suelo (montículos)	Bajo	Baja	Cualquier	Media	Baja	Media - los suelos arcillosos pueden ser limitantes; suelos poco profundos pueden ser adecuados	Medio a alto	Medios	Alta	Electricidad necesaria para bombeo
 Sistemas mecánicos de dispersión en el suelo (irrigación por goteo)	Bajo a Medio	Baja a Media	Cualquier	Media a alta	Baja a Media	Media - los suelos arcillosos pueden ser limitantes; suelos poco profundos son adecuados	Bajo a medio	Bajos a medios, con frecuencia es necesario desobstruir la tubería	Alta	La falta de disponibilidad de materiales a nivel local puede ser un factor limitante.
 Humedales construidos (de flujo horizontal)	Bajo a Medio	Baja a Media	Cualquier	Media a alta	Baja	Media - usualmente requiere excavación a 1 m de profundidad; los suelos arcillosos pueden no requerir de impermeabilizar el fondo	Medio	Bajos	Media a alta	Oportunidad para fusionar el tratamiento de aguas residuales con la creación de un hábitat generando ecoturismo o la sustitución de humedales.

Tabla 5.6. Guía de comparación de tecnologías de tratamiento secundario basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

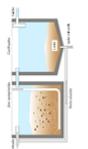
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sitio	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 <p>Lagunas facultativas</p>	Medio a alto	Medio a alta	Cualquier	Alta	Baja	Alta - generalmente se debe excavar hasta 2 a 3 m de profundidad	Medio	Bajos operación y mantenimiento requeridos para minimizar asuntos relativos a molestias	Media	Olor; zancudos
 <p>Biofiltros</p>	Bajo a Medio	Baja a Media	Cualquier	Baja	N/A	N/A	Medio	Medios - reemplazo regular del medio soporte	Alta	Electricidad necesaria para dosificación; disponibilidad local del medio filtrante; producción de lodos
 <p>Sistemas aerobios</p>	Alto	Medio a alta	Media	Baja	N/A	N/A	Alto	Altos - requieren mano de obra calificada	Alta	Ruido; se necesita electricidad; alta producción de lodo

Tabla 5.6. (Continuación). Guía de comparación de tecnologías de tratamiento secundario basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

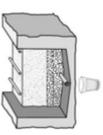
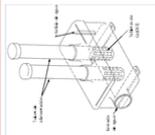
Tecnología	Caudal	Concentración del afluente	Variabilidad tolerada del flujo	Necesidad de espacio	Pendiente del sitio	Necesidad de suelos buenos y profundos	Costo	Operación y mantenimiento	Efectividad del tratamiento	Otras preocupaciones
 <p>Filtración por arena</p>	Bajo a Medio	Media a alta - ideal para efluentes secundarios con altas concentraciones de contaminantes disueltos	Baja	Media	Cualquier	Baja	Medio - los medios filtrantes pueden ser caros	Medios	Alta	Se requiere de un efectivo tratamiento secundario previo a la filtración terciaria
 <p>Lagunas de maduración</p>	Cualquier	Baja	Cualquier	Alta	Baja	Media	Medio - al igual que con otros tipos de lagunas y con los humedales, depende de los costos de excavación	Bajos	Baja	Olores; zancudos
 <p>Cloración</p>	Cualquier	Baja - a menudo requiere ser antecedita por filtración terciaria	Baja a Media	Baja	Cualquier	Baja	Los dispositivos y la solución química podrían ser caros a nivel local	Medios	Media	Electricidad necesaria para la dosificación, seguridad en la manipulación ya que el cloro es un químico reactivo tóxico

Tabla 5.7. Guía de comparación de tecnologías de tratamiento terciario basada en los niveles adecuados para varios parámetros clave (“cualquier” quiere decir que es aceptado cualquier nivel del parámetro y “N/A” significa que el parámetro no se aplica a la tecnología)

La apropiada selección de tecnologías de tratamiento secundario es una función de:

- La cantidad de terreno disponible para el sistema (relación Q:A).
- La suficiencia de área y propiedades de los suelos para la dispersión en el terreno.
- La proximidad del sitio del proyecto a centros poblacionales.
- El nivel de habilidad de la mano de obra que llevará a cabo la operación y mantenimiento del sistema.
- Los fondos disponibles para la instalación, operación y mantenimiento y eventual sustitución del sistema.

Más allá de estos factores, se requiere una evaluación cuidadosa de los aspectos sociales, financieros y de gobernanza de la comunidad que recibirá los servicios del sistema. Para proyectos más grandes, la gobernabilidad (la capacidad del gobierno local o distrito de servicios básicos de establecer y cobrar cuotas e imponer multas y castigos por incumplimiento) tiene un gran impacto en la selección de la tecnología de SDMAR. Si los fondos estarán limitados para la operación y el mantenimiento del sistema una vez que esté construido, esto se convierte en un factor motivador clave en el proceso de toma de decisiones. Considerar cuidadosamente todos estos factores y hacerlo mediante un proceso abierto, transparente y dirigido por los interesados puede conducir a mejores elecciones de tecnologías y a una mayor disposición de pagar por los servicios en el largo plazo.

El efluente de aguas residuales tratadas que será reutilizado en edificaciones para lavado de inodoros, descargado en cuerpos de agua o reciclado para irrigación de cultivos usualmente necesita recibir tratamiento terciario, que suele estar constituido por procesos de filtración y desinfección. La etapa de filtración, crítica para una desinfección eficaz, puede realizarse de forma confiable mediante filtración de arena; aunque esta tecnología no se ha presentado extensamente en este texto, hay mucha información de calidad a la que se puede acceder a partir de la sección de referencias del Capítulo 4.

La filtración en arena remueve la mayoría del remanente de sólidos suspendidos presentes en la descarga del efluente secundario, esto es importante ya que los sólidos suspendidos pueden proteger a los patógenos del efecto del cloro y la radiación UV. Una vez que el afluente se ha filtrado, bajos niveles de cloro o luz UV pueden reducir drásticamente el número de patógenos en las aguas residuales.

Si hay disponibilidad de terreno, considere el uso de lagunas de maduración para el control de patógenos; si la disponibilidad es limitada, el cloro puede ser la única opción práctica de desinfección. Considere cuidadosamente los beneficios y desventajas del cloro líquido y del cloro sólido, sus problemas de

seguridad, los costos a largo plazo y la disponibilidad del producto antes de seleccionar una tecnología.

5.3 Conclusiones de cara al futuro

En este texto se han presentado los procedimientos paso a paso para caracterizar fuentes de aguas residuales, para evaluar los sitios donde estas serán manejadas, usando los datos recolectados y los parámetros de la tecnología de SDMAR para recopilar informaciones que apoyen las decisiones relativas a la selección de las tecnologías de SDMAR. La guía ha sido presentada desde la perspectiva del proyecto individual, por ejemplo, para una escuela, hospital o bloque de viviendas. A medida que se desarrollen más proyectos individuales en una comunidad dada y se afiancen los conceptos de SDMAR, las ciudades y municipios comenzarán a promover los SDMAR como un medio para mejorar el saneamiento a gran escala. Los gobiernos locales pueden hacer mucho para lograr esto proactivamente a través de los siguientes pasos:

- Promover los beneficios del saneamiento mejorado, destacando primero el problema y luego describiendo cómo el SDMAR puede ser parte de la solución. Se puede recurrir a los interesados, ONG's y grupos de la sociedad civil para divulgar las informaciones pertinentes. A medida que la gente comience a ver los beneficios del saneamiento mejorado y entienda cómo tendrá un impacto positivo en sus vidas y comunidades, comenzarán a estar más dispuestos a pagar por los servicios.
- Desarrollar políticas y aprobar ordenanzas locales sobre saneamiento que requieren manejar las aguas residuales, especialmente para nuevas construcciones y para fuentes de aguas residuales consideradas un peligro para la salud.
- Capacitar al personal en los tipos de tecnología de SDMAR y los métodos paso a paso descritos en este manual. Existen muchos recursos sin costo alguno que se pueden usar para comenzar el proceso de capacitación del personal; por ejemplo, trabajar con las universidades locales cuando sea posible, utilizar el hermanamiento y compartir trabajos con los municipios o comunidades que estén más adelantados en el proceso como una forma para crear la capacidad local.
- Vincular los requisitos para un SDMAR adecuado con la emisión de permisos de construcción. Capacitar a los inspectores e interventores de construcción sobre los procedimientos para inspeccionar tanques sépticos y otras tecnologías de SDMAR.
- Desarrollar un estilo de “ventanilla única” para la aceptación y revisión de permisos, haciéndolo lo más fácil posible para

que la ciudadanía pueda cumplir con las directrices del caso. Ofrecer asistencia técnica, según sea necesario.

- Promover buenas prácticas de construcción para tanques sépticos y otras tecnologías de SDMAR a través de talleres, seminarios y ejercicios prácticos de capacitación.
- Solicitar ayuda. El desarrollo de las comunidades funciona mejor cuando lo dirige la demanda, en vez de implementar procesos que obligan a la comunidad; por ello, los grupos de apoyo al desarrollo comunitario desearán brindar asistencia a quienes soliciten su apoyo.



APÉNDICES

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS DATOS DE EVALUACIÓN DE SUELOS

Entender la naturaleza de los suelos en un sitio dado es crítico para la implementación adecuada del SDMAR, no solo para que sirva de base para tomar decisiones sobre la tecnología a utilizar y garantizar una instalación adecuada de la alternativa seleccionada. El Capítulo 3 describe procedimientos detallados sobre cómo los proveedores de servicios pueden efectuar adecuadas y rigurosas evaluaciones del suelo. Las siguientes páginas ofrecen información complementaria e ilustran cómo todos los hallazgos se pueden organizar en un formato estándar con el propósito de registrar e interpretar los datos. Los apéndices se proporcionan en el siguiente orden:

El Apéndice I brinda información adicional y definiciones de varias propiedades de los suelos y procedimientos utilizados dentro de la evaluación de suelos, con el propósito de determinar una tasa de infiltración a largo plazo para los suelos de un sitio en particular; adicionalmente, brinda un formulario de evaluación

de suelos estándar junto con tablas para ajustar la TILP a partir de condiciones específicas de los suelos identificados;

El Apéndice II presenta un ejemplo de cálculo de la TILP basado en un sitio hipotético, permitiendo a los lectores visualizar cómo los datos de los suelos son recolectados, reportados y usados para determinar la TILP última.

Muchos investigadores han contribuido a la práctica de evaluaciones de suelos para SDMAR. Los autores desean hacer un reconocimiento a las siguientes personas y organizaciones que han contribuido de manera significativa a la aplicación de la ciencia de los suelos y la han convertido a un enfoque práctico que puede ser usado en cualquier parte para mejorar la función a largo plazo de los componentes de SDMAR que se basen en la aplicación de efluentes en los suelos:

David Lindbo

North Carolina State University
Soil Science Dept., P.O. Box 762
Raleigh, NC 27695-7619 (david_lindbo@ncsu.edu)

Randy Miles

University of Missouri
302 Anheuser-Busch Bldg.
Columbia, MO 65211 (milesr@missouri.edu)

DeAnn Presley

Kansas State University
2014 Throckmorton Plant Sci. Ctr.
Manhattan, KS 66506-5504 (deann@ksu.edu)

Nora E. Ransom

Kansas State University
Dep. of English, 108 E/CS Building
Manhattan, Kansas 66506-6501 (nransom@ksu.edu)

Agradecimientos especiales a *The Soil Science Society of America*, www.soils.org por la autorización para reimprimir sus recursos.



APÉNDICE I

ASPECTOS ADICIONALES SOBRE LA EVALUACIÓN DE SUELOS

A1.1 Generalidades del proceso de evaluación de suelos

Los procedimientos de evaluación de suelos presentados en la Sección 3.3 introducen el concepto de usar pruebas sencillas que pueden ser realizadas en el campo para recopilar información acerca de los aspectos más relevantes de los suelos. La profundidad y espesor de los horizontes de los suelos y la presencia de aguas subterráneas o del lecho de roca se deben determinar para todos los tipos de proyectos de SDMAR, ya que pueden ejercer impacto en la instalación de tanques, zanjas y reservorios. Otras características como textura del suelo, estructura, consistencia, pendiente y posición del relieve determinan cuán bien se desempeñarán los suelos en la dispersión y el tratamiento. Estos factores se presentan en estas páginas con un procedimiento paso a paso para evaluar los suelos para la dispersión del efluente en el sitio.

Aunque el objetivo de estos procedimientos es determinar la tasa última de infiltración a largo plazo (TILP) de cada horizonte de suelo que revista importancia en un sitio, es interesante notar que algunos de estos parámetros también pueden incidir en la instalación del sistema. Por ejemplo, la adhesividad o adherencia (también llamada “pegajosidad”) del suelo, una de las características cuyo procedimiento de evaluación se presenta más adelante, puede afectar profundamente en la instalación de zanjas de infiltración (también conocidas en algunos países como zanjas de lixiviación). Para los suelos que presentan moderada a alta adhesividad, la instalación debería estar limitada a la época más seca del año.

Antes de comenzar la discusión sobre la determinación de la TILP, es conveniente incluir una nota sobre las unidades utilizadas en estos apéndices. Buena parte de los avances en la ciencia del suelo se ha llevado a cabo en Estados Unidos; por tal razón, por convención, las unidades de medida se presentarán en unidades inglesas. A continuación, se provee una fórmula de conversión de las unidades típicas de TILP.

El valor de medida más importante en esta discusión es la TILP, que se expresa en:

Galones al día por pie cuadrado o gal/d.pie²

Para convertir al sistema métrico se utiliza el factor de conversión 40,7 así:

$$\text{gal/d.pie}^2 \times 40,7 = \text{litros/día por metro cuadrado} = \text{L/d}^* \text{m}^2$$

Esta es una expresión de cuánto volumen (litros) se pueden aplicar a un área de suelo (metro cuadrado) durante cada día. En este caso, el área se describe como la superficie infiltrante o el área donde la estructura de infiltración se junta con el suelo natural. Para una zanja de infiltración, consistirá en la pared lateral y el fondo, aunque en ciertas áreas y en el contexto de este manual, no se considerará el fondo para así efectuar diseños más conservadores. Recuerde que, para las zanjas de infiltración, hay dos paredes laterales y el área de cada una se mide desde la base de la tubería de distribución; para los lechos de infiltración, la superficie infiltrante es el fondo del lecho; y para los campos de irrigación, la superficie infiltrante será toda el área del campo.

Las siguientes tablas se utilizan en el proceso paso a paso para determinar la TILP y será referenciada en las próximas páginas como base para ajustar los valores de la TILP para varias condiciones de propiedades del suelo (Lindbo et al., 2008).

Tabla A1.1 Valores de TILP según la textura del suelo de evaluación

Textura según USDA	Grupo Rango (gal/d.pie ²)	Valor medio (gal/d.pie ²)	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)
Arena (Sand: "S")	I 1,2 – 0,8	1,0	na
Franco arenoso (Loamysand: "LS")			na
Arenoso franco (Sandy loam: "SL")	II 0,8 – 0,6	0,7	na
Franco (Loam: "L")			na
Franco limoso (Siltyloam: "SiL")	III 0,6–0,3	0,45	-0,05
Limo (Silt: "Si")			-0,1
Franco arcillo arenoso (Sandy clayloam: "SCL")			na
Franco arcilloso (Clayloam: "CL")			na
Franco arcillo limoso (Siltyclayloam: "SiCL")			-0,05
Arena arcillosa (Sandy clay: "SC")	IV 0,4–0,1	0,25	na
Arcilla (Clay: "C")			na
Arcillo limoso (Siltyclay: "SiC")			-0,05

Tabla A1.2 Otras consideraciones acerca de la textura del suelo

Mica	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)	% de fragmentos gruesos	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)
Paramicáceo	-0,05	0-15	na
Micáceo	-0,1	15-35	-0,05
		35-60	-0,1
		>60	inadecuado

Tabla A1.3 Estructura del suelo – grado, tamaño y tipo

Grado	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)	Tamaño	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)	Tipo	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)
0– Grano individual	na	Muy fino	0,05	Granular	0,05
0– Masivo	inadecuado	Fino	0,05	Bloque subangular	na
0– Roca de tamaño controlado	-0,05	Medio	na	Bloque angular	-0,05
1- débil	-0,05	Grueso hasta 1"	-0,05	En cuñas	inadecuado
2- moderado	na	Muy grueso	inadecuado	Prismático	inadecuado
3- fuerte	0,05			Laminar	inadecuado

Tabla A1.4 Consistencia del suelo y mineralogía (ver nota a pie*)

Consistencia	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)	Pegajosidad al estar húmedo	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)	Plasticidad al estar húmedo	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)
Suelto	na	No pegajoso	0,05	No plástico	0,05
Muy frágil	0,05	Ligeramente pegajoso	na	Ligeramente plástico	na
Frágil	na	Medianamente pegajoso	-0,05	Moderadamente plástico	-0,05
Firme	-0,05	Muy pegajoso	inadecuado	Muy plástico	inadecuado
Muy firme	inadecuado				
Duro	inadecuado				

*Solamente realizar un ajuste por consistencia del suelo, adoptar el más restrictivo

Tabla A1.5 Profundidad de suelo para condiciones inadecuadas

Profundidad por debajo de la superficie de infiltración en texturas de los grupos II a IV	Profundidad por debajo de la superficie de infiltración en textura del grupo I	Ajuste a la TILP (gal/d.pie ²)
<12"	<18"	inadecuado
12 a 18"	18 a 24"	-0,05
18 a 24"	24 a 30"	na
>24"	>30"	0,05

Tabla A1.6 Posición del terreno, en términos de su pendiente

Posición de la pendiente y nomenclatura en inglés	Ajuste a la TILP
Cumbre o cresta (Summit or ridge "Su")	0,05
Hombro (Shoulder "Sh")	0,05
Pendiente lateral superior (Back or side slope – upper "Bs")	na
Pendiente lateral inferior (Back or side slope – lower "Bs")	-0,05
Pendiente al pie de la ladera (Footslope "Fs")	-0,05
Pendiente en el fondo de la ladera (Toe slope "Ts")	-0,1
Canal o vía de drenaje	Inadecuado
Depresión	Inadecuado
Llanura de inundación	-0,1

Tabla A1.7 Descripción de la pendiente del terreno

Descripción de la pendiente	Ajuste a la TILP
XX - Convexa, convexa	0,05
LX - Lineal, convexa	0,05
XL - Convexa, lineal	Na
LL - Lineal, lineal	Na
CX - Cóncava, convexa	-0,05
LC - Lineal, cóncava	-0,05
XC - Convexa, cóncava	-0,1
CL - Cóncava, lineal	-0.1
CC - Cóncava, cóncava	-0,15

Tabla A1.8 Corrección de la pendiente: necesidad de adición de suelo sobre la zanja cuesta abajo para trincheras perpendiculares a la pendiente del terreno. La corrección es de hasta 22" de profundidad según la pendiente del terreno y el ancho de la zanja o trinchera

Pendiente (%)	Ancho de la trinchera (en pulgadas)						Pendiente (%)	Ancho de la trinchera (en pulgadas)					
	36	30	24	18	12	6		36	30	24	18	12	6
5	2	2	1	1	1	0	33	12	10	8	6	4	2
6	2	2	1	1	1	0	34	12	10	8	6	4	2
7	3	2	2	1	1	0	35	13	11	8	6	4	2
8	3	2	2	1	1	0	36	13	11	9	6	4	2
9	3	3	2	2	1	1	37	13	11	9	7	4	2
10	4	3	2	2	1	1	38	14	11	9	7	5	2
11	4	3	3	2	1	1	39	14	12	9	7	5	2
12	4	4	3	2	1	1	40	14	12	10	7	5	2
13	5	4	3	2	2	1	41	15	12	10	7	5	2
14	5	4	3	3	2	1	42	15	13	10	8	5	3
15	5	5	4	3	2	1	43	15	13	10	8	5	3
16	6	5	4	3	2	1	44	16	13	11	8	5	3
17	6	5	4	3	2	1	45	16	14	11	8	5	3
18	6	5	4	3	2	1	46	17	14	11	8	6	3
19	7	6	5	3	2	1	47	17	14	11	8	6	3
20	7	6	5	4	2	1	48	17	14	12	9	6	3
21	8	6	5	4	3	1	49	18	15	12	9	6	3
22	8	7	5	4	3	1	50	18	15	12	9	6	3
23	8	7	6	4	3	1	51	18	15	12	9	6	3
24	9	7	6	4	3	1	52	19	16	12	9	6	3
25	9	8	6	5	3	2	53	19	16	13	10	6	3
26	9	8	6	5	3	2	54	19	16	13	10	6	3
27	10	8	6	5	3	2	55	20	17	13	10	7	3
28	10	8	7	5	3	2	56	20	17	13	10	7	3
29	10	9	7	5	3	2	57	21	17	14	10	7	3
30	11	9	7	5	4	2	58	21	17	14	10	7	3
31	11	9	7	6	4	2	59	21	18	14	11	7	4
32	12	10	8	6	4	2	60	22	18	14	11	7	4

A1.2 Pasos para determinar la TILP

Con base en el análisis de textura del suelo se puede obtener el valor de referencia de TILP (valor del punto medio en la Tabla A1.1, basado en la clasificación del suelo dentro de los grupos I-IV) y agregue los correspondientes ajustes debidos a la sub-textura dentro del grupo de suelos relevante.

1. Cuando sea el caso, realice los ajustes de textura adicionales provenientes de la Tabla A1.2.
2. Identifique la estructura del suelo y aplique los factores de ajuste del componente según sea el caso, a partir de la Tabla A1.3.
3. Determine la consistencia del suelo y aplique el mayor valor de factor de ajuste para dichas pruebas, los cuales se encuentran en la Tabla A1.4.
4. Determine el ajuste debido a la profundidad del suelo, según sea necesario, y aplique el factor de ajuste de la Tabla A1.5.
5. Evalúe la posición del relieve y la descripción de la pendiente y haga los correspondientes ajustes según lo establecido en las Tablas A1.6 y A1.7, según sea necesario.

La suma de la TILP de referencia y los ajustes respectivos proporcionarán el valor de la TILP final. Asegúrese también de corregir la pendiente de la zanja de infiltración usando los factores de corrección de esta (Tabla A1.8). La evaluación de suelos puede ser completada observando la cobertura del terreno y el micro clima que pueden presentar desafíos u oportunidades adicionales para la dispersión del efluente en el sitio. Para todo el proceso, use el formato de registro del apique de exploración del suelo que se proporciona a continuación en la Figura A1.1 para registrar sus resultados.

A1.3 Métodos y procedimientos para evaluación de suelos

A1.3.1 Textura y estructura del suelo

En la sección 3.3.3 se cubrió el procedimiento para analizar la textura del suelo. El paso siguiente tras determinar la textura es determinar la estructura del suelo, que se define como el tipo, tamaño y grado de los agregados del suelo. Para determinar el tipo de agregado simplemente se lo debe comparar con la Figura A1.2. Las seis categorías principales, usadas para planificar los sistemas de dispersión e infiltración de efluentes en el suelo, son: granular, forma de bloque subgranular, bloque angular, cuña, prismático y laminar. Las demás categorías indican suelos pobres (horizontes) que no deberían ser utilizados para dispersión de efluentes en el suelo.

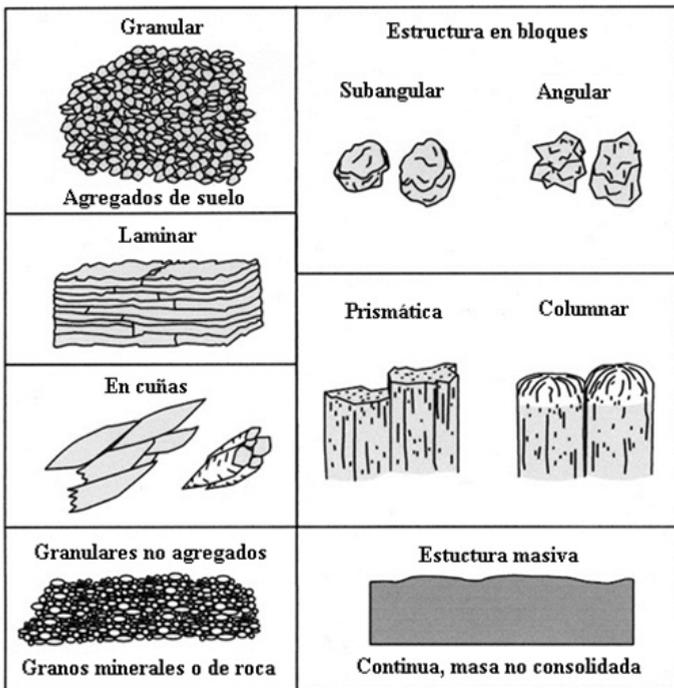


Figura A1.2. Tipos comunes de agregados en la estructura del suelo. Fuente: (Adaptada de Lindbo, 2009, p. 58)

Por lo tanto, interpretar el tipo de suelo se refiere a la designación del tamaño de este, lo que requiere conocer el tipo de suelo (clase) para luego medir su grosor o diámetro (su dimensión más pequeña). El tipo de suelo determina cuál columna de la Tabla A1.10 debe ser examinada, mientras que la medida (tal como está designada por los títulos de columna para las clases de grupos de suelo) determina qué fila debería ser seleccionada. Cada fila, cuando se

sigue a la izquierda, revela la adecuada clasificación según el tamaño (o clase) del agregado. Hay que saber qué medir para cada tipo de clase (grosor o diámetro, como se describe en la casilla correspondiente) y considerar que al haber agregados muy ásperos (o muy gruesos) en un horizonte de suelo, lo hace inadecuado para sistemas de dispersión de efluentes.

Tabla A1.10. Clasificación del tamaño del agregado basada en su tipo de configuración y dimensiones (Fuente: Adaptada de Lindbo et al., 2008)

Clase de suelo	Grosor del gránulo o placa**	Diámetro de la columna, prisma o cuña**	Dimensión de la forma de bloque angular o subangular**
Muy fino o delgado*	<1	<10	<5
Fino o delgado*	1 a < 2	10 a < 20	5 a < 10
Medio	2 a < 5	20 a < 50	10 a < 20
Áspero o grueso	5 a < 10	50 a < 100	20 a < 50
Muy áspero o grueso	10+	100 a < 500	50+
Extremadamente áspero	-	500+	-

Delgado solamente se usa para las placas o láminas **El tamaño corresponde a la menor dimensión, en mm.

El grado del gránulo se puede dividir en cuatro grupos, como sigue:

- Sin estructura: Grupo 0: no se pueden ver agregados de suelo diferenciados en el horizonte o en una muestra tomada con la mano.
- Débil: Grupo 1: los gránulos apenas se pueden ver diferenciados en el horizonte o en una muestra representativa tomada con la mano;
- Moderado: Grupo 2: los gránulos se aprecian claramente cuando se miran en el horizonte y en la muestra tomada con la mano.
- Fuerte: Grupo 3: los gránulos se aprecian de manera bien diferenciada y se separan fácilmente entre sí al ser movidos.

Dado que cada componente de la estructura del suelo influirá en el flujo de efluente a través del suelo, se requiere considerarlo en la determinación de la TILP final. Consulte la Tabla A1.3 para aplicar los factores de ajuste apropiados relativos a la estructura del suelo.

A1.3.2 Consistencia del suelo

La consistencia se juzga usando los tres métodos principales que se presentan a continuación, que todos constituyen un factor para el cálculo de la TILP. Resistencia al rompimiento:

Esta clasifica al agregado en una consistencia en función de la humedad (Tabla A1.11) basada en cuánta fuerza (relacionada con la humedad) puede soportar el agregado cuando está siendo comprimido entre el pulgar y el dedo índice antes de que se rompa. Para ensayar esto, tome un bloque de suelo con una longitud de alrededor de 3 cm (para suelos o agregados en forma de placa tomar un bloque de alrededor de 1 cm de largo y 0,5 cm de espesor) y empújelo entre dichos dedos por un segundo. Comience con una pequeña fuerza y aumentela cada vez más hasta que el suelo o el agregado se rompa. Cuando esto ocurre, la clase de humedad apropiada, de la que hay cinco clasificaciones entre suelto y muy firme (este último es inadecuado para la dispersión), puede juzgarse según la tabla antes mencionada y que se presenta a continuación.

Tabla A1.11. Clasificación del nivel de humedad basado en la resistencia a la ruptura del suelo (Fuente: Adaptada de Lindbo et al., 2008)

Consistencia en función de la Humedad	Operación
Suelto	El espécimen no se pudo obtener
Muy friable	Fuerza muy leve entre los dedos
Friable (desmenuzable)	Fuerza leve entre los dedos
Firme	Fuerza moderada entre los dedos
Muy firme	Fuerza intensa entre los dedos

Adherencia (Pegajosidad, también asociado a la plasticidad del suelo):

Esto se refiere a qué tanto se adhiere el agregado a otros objetos o superficies. Se hace la prueba triturando fragmentos de suelo en la mano y empujando el suelo entre el pulgar y el dedo índice mientras se vierte agua en la muestra de suelo hasta que se adhiere lo máximo posible a los dedos (Tabla A1.10). Ejecute esta prueba varias veces con diferentes niveles de agua adicionada para averiguar qué nivel de humedad brinda la máxima adherencia a la muestra. La adherencia global se evaluará a ese nivel de humedad y se puede clasificar en cuatro niveles que oscilarán entre la categoría “sin adherencia” (SA) hasta la categoría “con alta adherencia” (AA, el cual es inadecuado para efectos de dispersión de efluentes en el suelo). Esta clasificación, a realizarse de acuerdo con la Tabla A1.12, está basada en cuánto suelo queda adherido a los dedos después de soltar la presión.

Tabla A1.12. Sistema de clasificación de la adherencia (Fuente: Adaptada de Lindbo et al., 2008)

Clase	Criterios de adherencia
Sin adherencia (SA)	Poco o nula cantidad de suelo se adhiere a los dedos después de soltar la presión.
Con ligera adherencia (LA)	El suelo se adhiere a ambos dedos después de soltar la presión con poco estiramiento al separar los dedos.
Con moderada adherencia (MA)	El suelo se adhiere a ambos dedos después de soltar la presión con algún estiramiento al separar los dedos.
Con alta adherencia (AA)	El suelo se adhiere firmemente a ambos dedos después de soltar la presión, presenta mucho estiramiento al separar los dedos.

Plasticidad:

Se refiere a cuánto suelo puede ser enrollado y convertido en una sola pieza hasta que esta se rompa, es similar al ensayo de límite líquido, anteriormente comentado con los de consistencia, o límites de Atterberg en el Capítulo 3. Para determinar la plasticidad tome un poco de suelo con el mismo nivel de humedad que usó para la prueba de adherencia y enróllelo entre las manos para formar un cilindro lo más largo y delgado posible. El diámetro y resistencia del rollo se pueden usar para clasificar la muestra de suelo en cuatro categorías de plasticidad que oscilan entre un suelo “no plástico” (NP) hasta la de un suelo con “alta plasticidad” (AP, no adecuado para dispersión), tal como se muestra en la Tabla A1.13.

Tabla A1.13. Sistema de clasificación de la plasticidad (Fuente: Adaptada de Lindbo et al., 2008)

Clase	Criterios de Plasticidad
No plástico (NP)	No será posible formar un rollo de 6 mm de diámetro, o si lo forma, no se puede sostener a sí mismo si se lo sujeta desde uno de sus extremos.
Ligeramente plástico (LP)	Un rollo de 6 mm de diámetro se sostiene a sí mismo; pero un rollo de 4 mm no lo hace al ser sujetado desde uno de sus extremos.
Moderadamente plástico (MP)	Un rollo de 4 mm de diámetro se sostiene a sí mismo si se lo sujeta desde uno de sus extremos; sin embargo, uno de 2 mm no lo hace.
Altamente plástico (AP)	Un rollo de 2 mm se sostiene a sí mismo al ser sujetado desde uno de sus extremos.

A1.3.3 Descripción de la pendiente y posición del paisaje

Estos aspectos interrelacionados ejercen influencia sobre el nivel de conveniencia o aptitud de un sitio para instalar el SDMAR afectando la naturaleza del flujo de aguas superficiales al acercarlo o al alejarlo del lugar de

implementación del SDMAR. Aunque los principios y terminología relativos a la pendiente y posición del paisaje se describen de manera más general en la Sección 3.4.3, se presentan aquí en mayor detalle para que el lector pueda ver cómo ambos aspectos del sitio afectan la TILP. La descripción de la pendiente se basa en identificar la inclinación tanto en el sentido vertical (cuesta abajo) como en el sentido lateral, y ambos tipos de inclinaciones podrían clasificarse como lineal, cóncava o convexa. Cóncava significa que el sitio está situado en un área similar al fondo de un tazón, mientras que la forma opuesta (parte superior de un tazón boca abajo) se denomina convexa. Dentro de la estimación de la TILP, estos términos se usan para describir las nueve posibles combinaciones horizontales y verticales de tipos de pendientes, tal como se indica a continuación en la Figura A1.3.

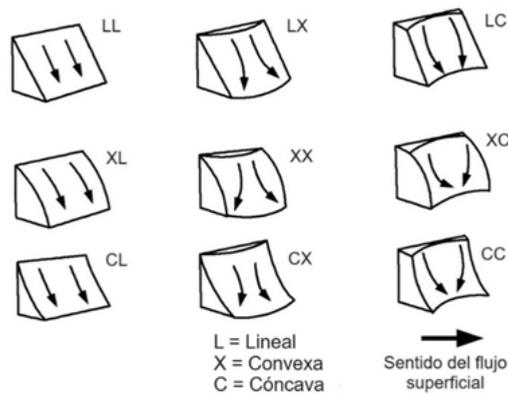


Figura A1.3. Gráfico de descripción de las pendientes (Adaptada de Lindbo et al., 2008)

Mientras más cóncava es una pendiente, más baja debe ser la TILP porque eso implica una mayor tendencia a acumular agua dentro del sitio, lo cual reduce la aptitud del sitio para el SDMAR, tal como se describe en la Sección 3.4.3. Esto explica por qué, en términos generales, al observar desde la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha de la Figura A1.3, los valores de los ajustes de la TILP aumentan. Al igual que con todas las pruebas sensoriales de suelos u observaciones del sitio basadas en la topografía descritas en este Apéndice y en las Secciones 3.3 y 3.4, los sistemas de clasificación del suelo y los correspondientes eventuales ajustes de la TILP se describen después en un estudio de caso para el cálculo completo de la TILP a partir de datos hipotéticos del sitio y de los suelos.

Mientras que las condiciones de la pendiente se pueden pensar desde una óptica más local, que ocurren en el sitio específico donde se instalará el SDMAR, la posición del relieve se puede concebir de una forma más general en términos de su pendiente, proporcionando una evaluación general del lugar relativa al medio ambiente que rodeará al SDMAR.

Las Figuras A1.4 y A1.5 se usan junto con la Tabla A1.6.a para determinar el apropiado factor de ajuste de la TILP basado en la pendiente del proyecto. Durante la investigación del sitio, el proveedor de servicios debe determinar las características de posición del paisaje y la pendiente del lugar escogido para la evaluación, posteriormente se debe hacer corresponder la categoría de la posición con los valores proporcionados en la Tabla A1.6.

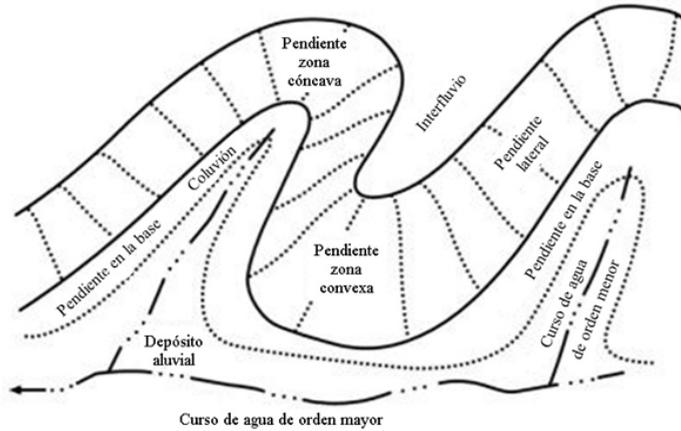


Figura A1.4. Esquema de la posición del paisaje y características de la pendiente (Adaptada de Lindbo et al., 2008)

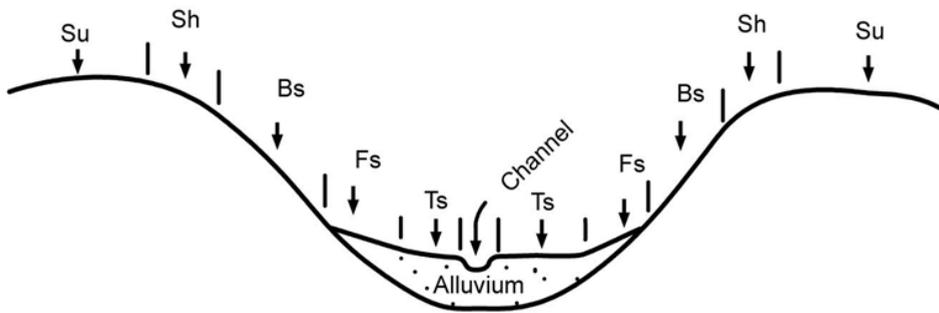


Figura A1.5. Nombres de las pendientes (Adaptada de Lindbo, 2009)

Los nombres de las pendientes que corresponden a la Tabla A1.6 y a la Figura A1.5, con sus respectivas equivalencias y siglas en inglés, son:

Cumbre o cresta (Summit orridge “Su”); Hombro (Shoulder “Sh”); Pendiente lateral superior (Back orsideslope – upper “Bs”); Pendiente lateral inferior (Back orsideslope – lower “Bs”); Pendiente al pie de la ladera (Foothslope “Fs”); Pendiente en el fondo de la ladera (Toe slope “Ts”); Canal, o vía de drenaje, o camino de desagüe (Channel); Llanura de inundación (Alluvium).

APÉNDICE II

EJEMPLO DE INTERPRETACIÓN DE DATOS DE EVALUACIÓN DE SUELOS Y CÁLCULO DE TILP.

Con los datos del registro de informaciones de un apique para evaluación de suelos (cuyos elementos principales se presentan a continuación), el siguiente proceso paso a paso muestra cómo las condiciones de los suelos (y del sitio) permiten determinar la TILP, así como las profundidades inicial y final de la zanja de infiltración. Las condiciones clave del suelo son: textura, estructura y consistencia, mientras que las condiciones del sitio son la posición del paisaje y la pendiente.

Ejemplo de formato de evaluación de suelos simplificado

Posición el paisaje: Pendiente en la parte baja posterior (Back orsideslope – lower) Bs;

Tipo de pendiente: Pendiente vertical lineal, pendiente horizontal lineal LL; →

Pendiente del terreno : 10 % →

Condición limitante observada y menor profundidad del suelo observada: 36" (90 cm)

Porcentaje de fragmentos ásperos en el horizonte restrictivo : 10 %

Los datos que describen las informaciones encontradas para cada uno de los estratos identificados en el perfil de terreno se presentan a continuación en la Tabla A2.1.

Tabla A2.1. Resumen de los datos encontrados en el perfil de suelos del ejemplo

Horizonte	Profundidad, pulgadas (cm)	Textura (Grupo)	Estructura (grado, tamaño, tipo)	Consistencia (húmedo, adherencia, plasticidad)
1	0-6 (0-15)	Franco (L)	Débil, medio, granular	Friable, Con ligera adherencia (LA), Ligeramente plástico (LP)
2	6-20 (15-50)	Franco arcilloso (CL)	Moderado, medio, forma de bloque subangular	Friable, Con ligera adherencia (LA), Ligeramente plástico (LP)
3	20-36 (50-90)	Arcilla (C)	Moderado, medio, forma de bloque subangular	Friable, Con ligera adherencia (LA), Moderadamente plástico (MP)
4	36-45 (90-115)	Franco arcilloso (CL)	Moderado, grueso, forma de bloque subangular	Friable, Con ligera adherencia (LA), Moderadamente plástico (MP)
5	45+ (115+)	Franco Arenoso (SL)	Masivo	Friable, Con ligera adherencia (LA), Ligeramente plástico (LP)

Ejemplo de procedimiento para evaluación del sitio/suelos

Paso 1: Determinación de la profundidad de los horizontes y condición limitante. El análisis del apique reveló que había cinco horizontes de suelo hasta la mínima profundidad aconsejable de la excavación de 1,2 m, con sus profundidades medidas y datos principales diligenciados en la columna respectiva. Mientras se inspeccionaban los horizontes, se apreciaron agrupaciones de manchas a 36" (90 cm) de profundidad, que sirvieron como referente para establecer la condición limitante de profundidad mínima del suelo y se marcaron como tales en el formulario.

Paso 2: Determinación de la textura de cada horizonte y el horizonte más restrictivo de todos. Se sometió a pruebas cada uno de los cinco horizontes usando la evaluación sensorial de tales materiales, que generó grupos de textura que se mencionan más adelante. Observando dentro de los horizontes antes comentados, se evidenció que el horizonte 3, conformado por material arcilloso (Grupo IV), fue el grupo más restrictivo, haciendo de ese horizonte el punto de inicio para el cálculo de la TILP. Según la Tabla A1.1, la TILP de base se identificó con un valor medio de 0,25 galones por día por pie cuadrado (gal/d.pie², a ser convertida a unidades métricas al final). No

se realizó ajuste de la TILP por concepto de la subtextura ya que el material correspondió a una arcilla (C). Igualmente, a partir de los datos de la Tabla A1.2, y considerando que el porcentaje de fragmentos ásperos en el horizonte restrictivo fue de 10 % - en el rango de valores de 0 a 15%-, no se realizó ajuste al valor de la LTAR.

Paso 3: Determinación de la estructura de cada horizonte. La inspección visual y los procesos de medición se efectuaron para evaluar los aspectos estructurales principales -grado, tamaño y tipo del agregado- para cada horizonte y fueron registrados en el correspondiente formato. Estas observaciones fueron usadas para contemplar los ajustes pertinentes de la TILP para cada uno de los tres aspectos asociados a la estructura del suelo (para el horizonte restrictivo, en este caso el número 3), según se puede observar en la Tabla A1.3. Ya que la clasificación del material arcilloso correspondió a un grado moderado, no fue necesario realizar ajuste por este concepto (na) a la TILP. Dado que los agregados observados en el horizonte en cuestión presentaron un tamaño medio no se aplicó ajuste de la TILP (na). Como los agregados observados presentaron una forma de bloque subangular, nuevamente no fue necesario ajustar la TILP. Con base en lo anterior, en lo que concierne a la estructura del horizonte restrictivo, los tres posibles ajustes reportaron un valor de 0, por ello la TILP continúa con un valor de 0,25 gal/d.pie².

Es importante notar que, si alguno de los tres aspectos evaluados en el presente paso hubiese sido clasificado con valores de ajuste de TILP de “inadecuado”, significaría que el suelo analizado sería clasificado como inestable, literalmente inadecuado, para dispersión de efluentes (lo cual es aplicable para todos los suelos que hayan obtenido parámetros clasificados como “inadecuado” en las tablas analizadas en el presente anexo). Esto hubiese significado que el horizonte restrictivo debería ser nuevamente seleccionado, correspondiendo al inmediatamente anterior al actualmente analizado, a partir de su textura tal como se describió anteriormente, y en caso que no haya suficiente profundidad del suelo (por lo menos 75 cm) para dispersión sobre el fondo del nuevo horizonte restrictivo, entonces sería necesario elegir otro sitio.

Paso 4: Determinación de la consistencia de cada horizonte. Las pruebas de resistencia de rompimiento, adherencia y plasticidad fueron efectuadas sobre muestras de suelos húmedos de cada horizonte, tal como se describió en la Sección 3.3.3.4 y los resultados fueron debidamente diligenciados en la columna correspondiente del formato de registro. Según la Tabla A1.4, ya que el horizonte 3 estuvo conformado por un suelo friable -frágil- no fue necesario aplicar ajuste al valor de la TILP. Por tratarse de un suelo con ligera adherencia -ligeramente pegajoso-, no se justificó ajuste de la tasa de

infiltración a largo plazo por este concepto. Ya que el análisis de plasticidad del suelo lo clasificó como moderadamente plástico, es necesario ajustar la TILP por un valor de $-0,05 \text{ gal/d.pie}^2$. Ya que el valor más bajo de los tres posibles ajustes de la TILP por concepto de la consistencia del horizonte fue de $-0,05$, se adopta dicho valor -tal como se describe en la recomendación de la nota al pie de la Tabla A1.4; por lo tanto, el valor de TILP ajustado es de $0,20 \text{ gal/d.pie}^2$.

Paso 5: Determinación de la profundidad del suelo entre el fondo del sistema de dispersión y la condición limitante del suelo. La profundidad de la condición limitante de profundidad mínima del suelo fue de 36" (90 cm), que corresponde a la parte inferior del horizonte de suelo arcilloso. La necesidad de una capa de suelo de "amortiguación" de 12" (30 cm) sobre él y el hecho de que por lo menos debe haber 18" de cubierta de suelo sobre el fondo de la zanja limitarían la profundidad del fondo de la zanja a un rango entre 18 y 24" (resultado de calcular 36" menos 12"). Al elegir una distancia de 18" (45 cm) hasta la condición limitante del suelo, esta se encontraría dentro del rango de 12 a 18 pulgadas recomendado por la Tabla A1.5 para suelos con textura correspondiente al Grupo IV (entre los que se encuentran las Arcillas); para dicha condición, la tabla recomienda un ajuste de la TILP de $-0,05 \text{ gal/d.pie}^2$. Con base en lo anterior, se obtiene una TILP ajustada de $0,15 \text{ gal/d}^* \text{ft}^2$.

Cabe comentar, que si la distancia seleccionada hasta la condición limitante de profundidad mínima del suelo se hubiese encontrado en el rango entre 18 y 24" se habría tenido un ajuste nulo de la TILP; adicionalmente, si dicha distancia hubiera superado las 24" se tendría un ajuste de $+0,05 \text{ gal/d.pie}^2$, lo que muestra cuantitativamente cómo al elegir sitios con mejores suelos y más profundos viabiliza el trabajo con tasas de infiltración mayores.

Paso 6: Determinación de la posición del terreno y descripción de la pendiente del sitio. Con el estudio topográfico se determinó que el sitio elegido para el tratamiento por dispersión tenía con respecto al paisaje circundante una pendiente predominante en la parte lateral inferior (Bs); por ello, con base en la Tabla A1.6 se determinó que era necesario realizar un ajuste a la TILP del orden de $-0,05 \text{ gal/d.pie}^2$. Adicionalmente, el levantamiento topográfico permitió determinar que, en términos generales, las pendientes vertical y lateral del terreno se clasificaron como lineales (LL), según la Tabla A1.7 se observó que no era necesario realizar ajustes de la TILP por dicho concepto. Al sumar los dos factores de ajuste se obtuvo un valor de $-0,05 \text{ gal/d.pie}^2$ y por ello, la TILP ajustada final fue de $0,10 \text{ gal/d.pie}^2$ ($4,07 \text{ L/d.m}^2$).

En cuanto a otros impactos en el diseño de disposición de efluentes en suelos por aspersión, si la pendiente del sitio es mayor o igual que el 5 por ciento (que se considera el valor ideal), la profundidad del fondo de la zanja necesita

ser elevada con cobertura del suelo con base en un valor de ajuste, según se muestra en la Tabla A1.8. En este caso, si el ancho de la trinchera que se pretende implementar es de 36", para una pendiente longitudinal del 10 % implica un ajuste de 4" -10 cm-, obtenido en la sexta fila de dicha tabla. Esto significa que el fondo de la zanja de 100 metros de longitud en un terreno con pendiente longitudinal del 10 %, con su fondo localizado 18" por debajo de la superficie del suelo en el punto inicial (o más alto) terminaría solamente con una profundidad de 14" por debajo de la superficie en el punto final de dicha zanja. Esta situación violaría el principio de tener por lo menos 18" de suelo sobre el fondo de la zanja, por ello se hace necesario que desde el punto de inicio de la zanja su fondo se encuentre a una profundidad de $18" + 4"$; es decir de 22". Para pendientes muy pronunciadas es necesaria la adición de importantes capas de suelo, situación que hace cada vez más costoso implementar un sistema de disposición de efluentes en el suelo, al considerar el alto impacto de este aspecto de ajuste para pendientes muy elevadas se necesitará buscar otros terrenos con suelos profundos susceptibles de utilizarse para tal fin.

Este ejercicio de ajuste, que no necesitaría realizarse si la pendiente del sitio fuese menor a 5 % (el valor deseable), es crucial para garantizar una pendiente adecuada para la zanja, y los cálculos adecuados para su dimensionamiento. La diferencia de profundidades del fondo de la zanja debido a la pendiente del terreno, afecta la "profundidad efectiva de la pared lateral", cuyo valor es simplemente el promedio de las dos profundidades; dicho valor se usa para calcular la longitud efectiva de la zanja, tal como ilustró en la determinación de las dimensiones de la zanja en la Sección 4.6.1.1. Ese ejemplo también demuestra cómo se usan los valores de TILP para determinar el tamaño de las zanjas de infiltración, que representa el valor principal de este procedimiento simplificado de evaluación de suelos.



APÉNDICE III

INFORMACIONES ÚTILES PARA SDMAR SOBRE ESTUDIOS DE CASO

A continuación, se presentan informaciones relativas a aspectos técnicos de estudios de caso asociados a los SDMAR aplicados en diversos contextos de países de América Latina que pueden dar ideas a los lectores sobre posibles alternativas a adoptar en sus aplicaciones específicas.

***ESTUDIO DE CASO 1:** Manejo integrado de aguas residuales y biosólidos en un matadero municipal en León, Nicaragua*

Autores: Reuter, S., Demant, D., Heredia, G., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., Ulrich, L. y Zurbrügg, C. (2022). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento para la Región del Gran Caribe. *Bremen Overseas Research and Development Association* (BORDA). Bremen, Alemania.

Aspectos generales. El estudio presenta el manejo de los residuos orgánicos del proceso de sacrificio de ganado vacuno y porcino ubicado en un barrio densamente poblado de León (Nicaragua). Hasta 2015, las aguas residuales del matadero municipal de León se vertían diariamente sin tratamiento

alguno a la red de alcantarillado de la ciudad. El sistema de alcantarillado en especial las estaciones de bombeo presentaban constantes problemas de obstrucción debido a las altas cargas orgánicas y restos de huesos, sangre, grasa, cabello, etc. provenientes del matadero municipal. Los residuos orgánicos generados en el matadero no fueron considerados de valor y 1,5 toneladas diarias de estiércol del rumen (intestinos) de los bovinos fueron transportados al relleno sanitario municipal de la ciudad de León.

Aspectos técnicos. Se incorporó el enfoque del nexo “agua-energía-seguridad alimentaria” para lograr una perspectiva holística que se desvía de la visión tradicional del subsector. Esto se refleja en el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en la huerta orgánica y el calentamiento del agua con el biogás generado como subproducto del tratamiento anaerobio y biológico de las aguas residuales.

Se implementaron una serie de módulos para crear una solución descentralizada de tratamiento de aguas residuales eficaz, eficiente y asequible. La elección tecnológica se basa en el principio de fácil mantenimiento y consumo de energía insignificante.

Las instalaciones de la solución descentralizada de tratamiento de aguas residuales están diseñadas y dimensionadas de tal manera que el agua tratada cumpla con los parámetros estipulados por las leyes y reglamentos ambientales. El proceso de tratamiento se basa en cuatro pasos:

Reactores de biogás: Esta etapa involucra la sedimentación y flotación ya que la separación de sólidos es un paso crucial para la eficiencia del sistema en su conjunto. Esta etapa inicial del proceso busca lograr la mayor separación de sólidos sedimentables y sólidos flotantes. El sistema consta de tres reactores: reactor de biogás para cerdos, con un área de 21 m² y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2 días; reactor de biogás para intestinos, con área de 19 m² y TRH de 10 días; reactor de biogás para ganado, con área de 30 m² y TRH de 0,6 días (Figura A.3.1).



Figura A.3.1. Acceso de servicio al reactor de biogás de campana flotante. Fuente: Reuter et al. (2022)

Reactor anaerobio con deflectores: El efluente es forzado a circular por varias cámaras, las cuales están aisladas entre sí y comunicadas únicamente por tuberías que conducen el fluido, desde la parte superior de una cámara hasta el fondo de la siguiente, con área superficial de 120 m² y un TRH que varía entre 2 y 3 días. Cuando el fluido se desplaza por el reactor anaerobio, entra en contacto con los lodos activos (ricos en microorganismos) del fondo de cada cámara, lo que facilita la digestión de la materia orgánica presente en el agua. A continuación, en la Figura A.3.2 se ilustra una foto de la parte superior del reactor anaerobio.



Figura A.3.2. Reactor anaerobio con deflectores cubierto con carpa de membrana. Fuente: Reuter et al. (2022)

Filtro anaerobio: Esta etapa consta de cámaras independientes que contienen rocas volcánicas sobre una rejilla de hormigón que funciona como filtro anaerobio. El cuerpo irregular y la porosidad de las rocas volcánicas facilitan la proliferación de comunidades bacterianas. A medida que el efluente circula de una cámara de tratamiento a otra, se ve obligado a pasar a través de este filtro de roca. Cada cámara facilita la sedimentación de los sólidos aún presentes en el agua.

Laguna de oxidación: La última etapa del proceso se realiza aerobiamente en lagunas de oxidación, que facilitan una mayor reducción de la carga orgánica (medida como concentraciones de DBO y DQO).

Manejo de lodos: Los lodos provenientes de las diversas fases del proceso de tratamiento de los efluentes pasa a deshidratación y estabilización en eras de secado (Figura A.3.3).



Figura A.3.3. Manejo y uso de lodos. Fuente: Reuter et al. (2022)

Aprovechamiento de subproductos: El agua residual tratada se reutiliza mediante un sistema de bombeo solar y riego por goteo en la huerta orgánica del matadero. El bombeo se realiza a través de energía solar, y suministra 2000 m³/año de aguas residuales tratadas a través de un sistema de riego por goteo para la producción de hortalizas orgánicas con 34 semilleros, cada uno de 1,2 m de ancho y 26 m de largo (Figura A.3.4).



Figura A.3.4. Irrigación por goteo del efluente tratado. Fuente: Reuter et al. (2022)

Se realiza proceso de compostaje utilizando biosólidos provenientes de los procesos del matadero y de los corrales de los animales. El compost se enriquece con harina de huesos o virutas de cuerno. En 2021 se vendieron 20 toneladas de fertilizante orgánico.

Los efluentes generados (hasta 16000 m³/año) cumplen con los límites máximos permisibles para su disposición en el alcantarillado según la normatividad nicaragüense para vertimiento de aguas residuales tratadas: < 900 mg/L de DQO, < 400 mg/L de DBO y < 400 mg/L de SS.

ESTUDIO DE CASO 2: *Tratamiento de efluentes y biosólidos de una planta de sacrificio en Nariño, Colombia*

Fuente: *Los autores.*

Aspectos generales. El estudio de caso presenta el eficiente y responsable manejo de los efluentes y residuos sólidos del proceso de sacrificio de ganado vacuno y porcino, generados por la empresa Frigovito, localizada en la periferia de San Juan de Pasto, Nariño (Colombia). La empresa presta el servicio de sacrificio, tanto de bovinos como de porcinos, y cuenta con 25 operadores y entre 10 y 12 funcionarios.

Aspectos técnicos. En el tren de tratamiento se involucran tres líneas de afluentes: una proveniente de los corrales con el estiércol y orina que se genera por parte de los animales, junto con aguas lluvias o agua de lavado ya se empiezan a generar aguas residuales; aguas residuales domésticas provenientes de las unidades sanitarias y cafetería; aguas provenientes de la planta de sacrificio propiamente dicha.

El tren de tratamiento consta de unidades de tratamiento preliminar seguidas de sistemas biológicos para tratamiento secundario y pulimento. El proceso de tratamiento se basa en cuatro pasos:

Pretratamiento a efluentes de corrales: El agua residual colectada de los corrales pasa a unidades de pretratamiento físico mediante trampas de grasas, donde el agua entra por tubería y por medio de un tabique se permite el paso del líquido y la separación de material flotante; así como por medio de desarenadores, para retención de los sólidos sedimentables más densos y de mayor tamaño (Figura A.3.5).



Figura A.3.5. Pretratamiento para separación de material flotante y sedimentable proveniente de los corrales.

Pretratamiento a efluentes de la planta de sacrificio: El agua residual colectada de la unidad de sacrificio entra por tubería a una trampa de grasas (Figura A.3.6) para retención de los sólidos flotantes más ligeros y su separación del líquido, que se dirige hacia un sedimentador primario y posteriormente hacia las unidades de tratamiento biológico.



Figura A.3.6. Trampa de grasas para el efluente de la planta de sacrificio.

En el sedimentador (Figura A.3.7) se dispone de una cámara para succión del efluente líquido, que posteriormente se dispondrá en las unidades de tratamiento biológico.



Figura A.3.7. Sedimentador primario para el efluente de la planta de sacrificio.

Cámara de homogenización de caudal: Ya que la topografía del lugar no favoreció la disposición del tren de tratamiento para funcionamiento por gravedad el bombeo aumenta la energía de posición al líquido y lo descarga a una cámara que separa el flujo en dos partes iguales mediante vertederos rectangulares (Figura A.3.8), el líquido pasa a través de mallas inclinadas que retienen los sólidos y permiten que el líquido caiga por gravedad hacia dos canaletas de distribución del afluente hacia la primera laguna del tren de tratamiento biológico.



Figura A.3.8. Cámara de homogenización y distribución de caudal.

Laguna aireada: La laguna presenta una profundidad de 2 m y cuenta con la presencia de bacterias aerobias para estabilización de la materia orgánica. La transferencia de oxígeno se garantiza por medio de aireadores con potencia de 4,5 HP; el tiempo de retención hidráulica de la laguna es de 18 horas, y el TRH total del sistema es de 64 horas (Figura A.3.9).

En la superficie de la laguna hay formación de natas, las cuales se remueven diariamente y junto con sólidos flotantes y retenidos en las mallas de la cámara de homogenización se someten a proceso de compostaje. La remoción de las natas propicia la clarificación del agua y favorece el proceso oxidativo.



Figura A.3.9. Laguna aireada.

Laguna de sedimentación: La laguna posee una profundidad de 1,50 m, en ella se busca la sedimentación de los sólidos suspendidos y la estabilización de la materia orgánica contribuye a ajustar cada vez más la calidad del agua a los valores permisibles para el vertimiento. En las lagunas se utiliza la simbiosis entre bacterias y microalgas (Figura A.3.10).



Figura A.3.10. Laguna de sedimentación.

Laguna de maduración: La laguna posee una profundidad menor para favorecer la inactivación de patógenos y organismos de contaminación fecal (Figura A.3.11).



Figura A.3.11. Laguna de maduración.

Manejo de lodos: Los lodos provenientes de las diversas etapas de tratamiento de los efluentes se transfieren a eras de secado cubiertas para su deshidratación y estabilización (Figura A.3.12).



Figura A.3.12. Pilas de compostaje para estabilización de residuos sólidos.

Manejo de residuos sólidos: Los residuos sólidos provenientes de las fases del mantenimiento de los animales en los corrales y del sacrificio de los mismos se transfiere a pilas de compostaje revueltas mediante procesos mecanizados (Figura A.3.13).



Figura A.3.13. Pilas de compostaje para estabilización de residuos sólidos.

Los efluentes generados cumplen con los límites máximos permisibles para su disposición en el cuerpo receptor según la normatividad colombiana para vertimiento de aguas residuales tratadas.

ESTUDIO DE CASO 3: *Tratamiento semicentralizado de aguas residuales para nuevos desarrollos habitacionales en Nindirí, Nicaragua*

Autores: Reuter, S., Demant, D., Heredia, G., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., Ulrich, L. y Zurbrügg, C. (2022). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento para la Región del Gran Caribe. Bremen Overseas Research and Development Association (BORDA). Bremen, Alemania.

Aspectos generales. En 2012 el condominio Monte Cielo, un nuevo desarrollo habitacional ubicado en el municipio de Nindirí, Masaya (Nicaragua) completó la implementación de un sistema de saneamiento para 5040 personas.

Aspectos de planificación. El desarrollador decidió implementar un sistema de alcantarillado convencional para recolectar las aguas residuales domésticas de 847 viviendas y conducir las a una planta de tratamiento semicentralizada que fue diseñada exclusivamente para satisfacer las necesidades del condominio. El diseño de ingeniería se desarrolló para una población atendida de 5040 habitantes y para una dotación diaria 120 L/hab*d; el sistema de tratamiento de los efluentes se realizó para un caudal medio de 7 L/s, un caudal mínimo de 3,5 L/s y un caudal máximo de 22,7 L/s.

Aspectos técnicos. El tren de tratamiento implementado en el proyecto incluye los siguientes componentes:

Tratamiento preliminar y pozo de bombeo: Evita el paso de sólidos que puedan obstruir la planta como residuos sólidos, bolsas plásticas, grava y arena. El pozo de bombeo almacena temporalmente las aguas residuales y desde este punto se bombea al tanque desde el cual se bombean hacia el tanque de distribución, que conduce el flujo hacia los reactores anaerobios (Figura A.3.14).



Figura A.3.14. Tanque de distribución del agua residual hacia los reactores anaerobios. Fuente: Reuter et al. (2022).

Reactores anaerobios de flujo ascendente: En estos reactores circulares de cúpula fija se digiere y reduce la materia orgánica del agua, convirtiéndola principalmente en dióxido de carbono y metano (Figura A.3.15). La eficiencia de remoción de DBO oscila entre el 60 % y el 80 %. Los lodos se retienen en los reactores durante al menos cien días creando una biomasa activa apta para el tratamiento. Es necesario eliminar periódicamente los lodos viejos. Dado que este lodo ha sido digerido, después de su eliminación puede secarse directamente o someterse a compostaje.



Figura A.3.15. Tanque de distribución del agua residual hacia los reactores anaerobios. Fuente: Reuter et al. (2022).

Humedal flotante: Actúa como una tercera etapa en el sistema de tratamiento para reducir las concentraciones de sólidos sedimentables, patógenos y nutrientes por medio de macrófitas que flotan de forma natural, particularmente el Jacinto de agua (Figura A.3.16).



Figura A.3.16. Reactores anaerobios cilíndricos seguidos de los humedales de macrófitas flotantes. Fuente: Reuter et al. (2022).

La concentración media de DBO en el afluente crudo es de 400 mg/L, a la salida del tratamiento anaerobio su concentración desciende a 80 mg/L, y en el efluente final la concentración media es de 24 mg/L.

Instalación de descarga: Transporta las aguas residuales tratadas hacia un canal para su disposición final (Figura A.3.17).



Figura A.3.17. Macrófitas flotantes y canal para disposición final. Fuente: Reuter et al. (2022).

El efluente generado cumple con los límites máximos permisibles para su disposición en el alcantarillado, que según la normatividad nicaragüense para vertimiento de aguas residuales domésticas tratadas es de máximo 80 mg DBO/L.

ESTUDIO DE CASO 4: *Sistema de depuración biológica de aguas residuales domésticas de la escuela San Felipe Neri en el Municipio de Pasto (Colombia)*

Autores: *Karina Elisabeth Moncayo Martínez, Davis Birne Gómez V. e Iván Andrés Sánchez Ortiz*

Descripción de la zona. La institución educativa San Felipe Neri, debido al deterioro de la conducción del alcantarillado sanitario descargaba las aguas residuales domésticas en un bosque primario. La tubería del alcantarillado y la caja de recolección de aguas residuales, se encontraban totalmente tapadas con material de relleno, fruto de ello hubo estancamiento, olores desagradables y erosión del suelo que formó una zanja natural que conducía los efluentes a la quebrada Mijitayo.

La escuela se encuentra a 2 km de Pasto, salida al sur-oeste sobre la vía al corregimiento de Obonuco, su altitud es de 2.650 m.s.n.m, la temperatura media es de 13,1 °C, el área donde se efectúan las labores educativas es de 4.000 m². Se encuentra rodeada de amplias zonas de recreación y cuenta con un bosque primario por el que pasa la quebrada Mijitayo, así como una variedad de cultivos adecuados por la comunidad educativa.

Sistema de tratamiento biológico. El sistema de tratamiento contó con los siguientes elementos constitutivos:

Unidad de pretratamiento: Se implementó una trampa de grasas con dimensiones 0,6 m de largo, 0,6 m de ancho y profundidad 0,80 m, con volumen efectivo de 0,28 m³ y tiempo de retención hidráulica de 3 minutos.

Tratamiento primario: Se instaló un tanque para retención de sólidos orgánicos e inorgánicos con dimensiones: largo: 3,80 m, ancho: 1,50 m y profundidad: 1,20 m, con volumen útil de 2,8 m³ y tiempo de retención hidráulica de seis horas, en su interior se implementaron cámaras para remoción de los sólidos por sedimentación. La Figura A.3.18 presenta una fotografía del sedimentador primario.



Figura A.3.18. Unidad de sedimentación primaria.

Humedal construido: Para desarrollar el tratamiento secundario se implementó un humedal construido con las siguientes dimensiones: ancho: 4,60 m, largo: 6,30 m, profundidad: 0,6 m, con un volumen de 7 m^3 , pendiente longitudinal de fondo de 1 %, área superficial de 29 m^2 y TRH de 14 horas. Para su construcción se impermeabilizó el terreno, se instaló en el fondo y taludes geotextil no tejido n^o 1600 y como medio filtrante y como soporte para el sistema radicular de los vegetales se utilizó grava y arena. Para lograr condiciones de flujo uniforme se instalaron tuberías de recolección perforadas a lo ancho de la celda tanto para la entrada como para su salida. La Figura A.3.19 presenta una imagen del tratamiento secundario. La especie vegetal adoptada para el humedal construido fue *Phragmites australis*.



Figura A.3.19. Fotografía de la construcción del humedal construido

La siembra de la especie vegetal se hizo a partir del trasplante de rizomas al lecho previamente preparado. La Figura A.3.20 presenta una fotografía de los carrizos trasplantados.



Figura A.3.20. Implementación del vegetal depurador de aguas residuales.

A continuación, la Figura A.3.21 presenta una imagen de la especie vegetal plantada en el humedal construido



Figura A.3.21. *Phragmitesaustralis* vegetal implementado en el wetland.

Desempeño de remoción de contaminantes. Para evaluar su desempeño se realizaron tres campañas de monitoreo del afluente y del efluente tanto en su arranque (primer muestreo), así como dos meses (segundo muestreo) y cuatro meses (tercer muestreo) después del inicio de la operación. Las variables monitoreadas fueron: Sólidos suspendidos totales (SST), Nitrógeno total, Fósforo total, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y Coliformes totales.

La DBO afluente varió entre 81 y 160 mg/L, y la DBO efluente varió entre 35 y 90 mg/L, las eficiencias de remoción registradas en los tres muestreos variaron entre 33,3 y 78 %. Las concentraciones de sólidos suspendidos en el afluente variaron entre 103 y 543 mg/L, y en el efluente las mismas variaron entre 42 y 64 mg/L, las eficiencias de remoción registradas en los tres muestreos variaron entre 50,4 y 91,3 %. El nitrógeno total afluente varió entre 12 y 48 mg/L, y el efluente varió entre 10 y 44 mg/L, las eficiencias de remoción registradas en los tres muestreos variaron entre 12,5 y 21,8 %. Las concentraciones de fósforo total en el afluente variaron entre 7,5 y 9,0 mg/L, y en el efluente variaron entre 7,0 y 8,0 mg/L, las eficiencias de remoción registradas en los tres muestreos variaron entre 0 y 11,1 %. La cantidad de Coliformes fecales estimada en el afluente varió entre > 800.000 y >2'400.000 NMP/100 mL, y en el efluente la cantidad estimada varió entre > 800.000 y > 2'000.000 NMP/100 mL, las eficiencias de remoción registradas en los tres muestreos variaron entre 58,3 y 60 %; se requiere un mayor tiempo de retención hidráulica en el sistema, para alcanzar los valores requeridos por la normatividad referente al reúso en agricultura (guías OMS), con un número <100 NMP CF/100 mL.

ESTUDIO DE CASO 5: *Wetlands de flujo subsuperficial asociados a biodigestores para el tratamiento de efluentes de porcicultura y de origen doméstico*

Autores: Karina Elisabeth Moncayo Martínez e Iván Andrés Sánchez Ortiz.

Descripción de la zona. Este estudio de caso reporta detalles relativos a la implementación y desempeño de remoción de algunos parámetros de calidad del agua en cuatro sistemas de tratamiento de efluentes domésticos y de porcicultura, conformados por biodigestores seguidos de wetlands de flujo subsuperficial, implementados en la vereda Dolores, corregimiento de Mocondino, Municipio de Pasto (Nariño).

El monitoreo se realizó después de cuatro meses de la puesta en marcha de los sistemas, para ello se tomaron muestras del agua en el afluente bruto y el efluente final. A las muestras se les realizó el análisis de los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SS) y sólidos totales (ST). Los análisis realizados para cada parámetro de calidad del agua antes citado se basaron en los métodos

definidos por APHA, AWWA & WPCF (1992).

Los biodigestores se diseñaron para un THR entre 20 y 30 días para tratamiento mediante fermentación psicrófila, consisten en cilindros horizontales de longitud variable –según la cantidad de animales criados por cada núcleo familiar, construidos en doble capa de polietileno tubular calibre 8, localizados sobre zanjas excavadas en el suelo (Figura A.3.22 de la izquierda), y cuyo detalle de conexión con la cámara de distribución se ilustra en la Figura A.3.22 de la derecha.

Biodigestores: Tratan los efluentes de las porquerizas con una proporción de estiércol de cerdo y agua para lavado de 1:4, así como las aguas negras producidas por las viviendas de cada núcleo familiar. Dichos efluentes se recolectaban en una cámara de recepción y distribución de flujo construida para tal fin, cuya construcción se ilustra en la Figura A.3.22.



Figura A.3.22. Cámara de recepción de efluentes domésticos y pecuarios y distribución para el biodigestor.

Los biodigestores se diseñaron para un THR entre 20 y 30 días para tratamiento mediante fermentación psicrófila, consisten en cilindros horizontales de longitud variable –según la cantidad de animales criados por cada núcleo familiar, construidos en doble capa de polietileno tubular calibre 8, localizados sobre zanjas excavadas en el suelo (Figura A.3.22 de la izquierda), y cuyo detalle de conexión con la cámara de distribución se ilustra en la Figura A.3.23 de la derecha.



Figura A.3.23. Zanja excavada en material férreo (izquierda), montaje del biodigestor (derecha).

En cada biodigestor se adecuó una válvula de salida del biogás producido (Figura A.3.24 izquierda) y se le realizó pruebas de estanqueidad para verificar y corregir la eventual existencia de fugas o fallas en conexiones, como se observa en la Figura A.3.24 de la derecha.



Figura A.3.24. Montaje del biodigestor: Instalación válvula de salida del biogás producido (izquierda). Prueba de estanqueidad del biodigestor (derecha).

En la Figura A.3.25 se presenta una imagen de un biodigestor con su compartimiento totalmente lleno de aire.



Figura A.3.25. Biodigestor con su compartimiento lleno de aire.

Los efluentes de los biodigestores se juntaron con las aguas grises de las viviendas en un tanque homogenizador y posteriormente ingresaron para su tratamiento al humedal construido (Figura A.3.26).



Figura A.3.26. . Tanque homogenizador y tubería de salida hacia el *wetland*.

Humedales construidos. Los wetlands se diseñaron para un TRH de dos a cuatro días, para tratar los residuos producidos por 30 a 40 cerdos; del orden de 1,5 kg de estiércol/animal*día, se construyeron sobre una capa impermeable de plástico calibre 8 (Figura A.3.27) sobre el que se dispuso un lecho de grava.



Figura A.3.27. Capa plástica impermeabilizante y lecho de grava en el *wetland*.

Por encima de la grava se colocó una malla plástica para separar la capa de arena que se dispuso en la parte superior (Figura A.3.28), y en la que se sembró la especie vegetal del humedal construido.



Figura A.3.28. Lechos de grava y de arena para siembra de la especie vegetal en el *wetland*.

La relación largo/ancho adoptada para cada humedal osciló entre 2:1 y 4:1 y la altura de la lámina de agua contemplada en el diseño en promedio fue de 0,8 m. En la Figura A.3.29 se presentan imágenes de la siembra de carrizo de agua (*Phragmitesaustralis*) y la apariencia del *wetland* concluido.



Figura A.3.29. . Siembra de carrizo de agua (*Phragmitesaustralis*) y *wetland* concluido.

En la Figura A.3.30 se presenta una imagen del tren de tratamiento de las aguas residuales.



Figura A.3.30. Fotografía del biodigestor y el *wetland*.

Las eficiencias de remoción de la DQO en los cuatro sistemas oscilaron entre 68,9 y 95,2 %; por su parte, las eficiencias de remoción de la DBO variaron entre 9,1 y 91,5 %. Las eficiencias de remoción de SS en los sistemas analizados fueron: 99,5; 97,7; 90,0; 99,5 % en los sistemas S1; S2; S3 y S4 respectivamente, la remoción de ST en los mismos sistemas se expresó con valores de 95,2; 89,4; 90,3 y 92,5 %.

ESTUDIO DE CASO 6: *Wetlands construidos como alternativa para tratamiento de aguas residuales para regiones rurales, periurbanas y comunidades aisladas: Aplicación de humedales construidos en áreas rurales*

Autores: Eduardo Bello Rodrigues y Tamara Simone van Kaick (Capítulo 7)

En: *Wetlands construídos como ecotecnología para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras [recurso eletrônico] / organização de Pablo Heleno Sezerino, Catiane Pelissari – 1.ed. - Curitiba: Brazil Publishing, 2021.*

Descripción de la zona. El humedal construido a ser presentado fue implementado en el año de 2010, en una escuela municipal, que atendía 200 estudiantes, localizada en la región rural de Campos Novos en el Estado de Santa Catarina (SC, Brasil). Los colaboradores involucrados en el proyecto fueron: la compañía Municipal de Saneamiento, la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) y la comunidad local, incluyendo los alumnos de la propia escuela. La aplicación fue viabilizada con recursos obtenidos por medio de donaciones y se priorizó la adquisición de materiales de fácil acceso en el lugar/región y que sean de bajo costo.

Descripción del sistema de tratamiento. Para atender la demanda de la escuela se diseñaron dos wetlands de flujo subsuperficial horizontal construidos en paralelo (Figura A.3.31), que recibieron el efluente proveniente del filtro anaerobio que se localiza después de un tanque séptico.



Figura A.3.31. Sistema wetland de flujo horizontal, excavación e impermeabilización de la unidad. Fuente: Rodrigues y van Kaick (2021).

Los dos *wetlands* no trabajan simultáneamente, pero sí de forma alternada y fueron vegetados con plantas del género *Typha*, popularmente conocidas como taboa (Figura A.3.32).



Figura A.3.32. Sistema wetland de flujo horizontal, unidad plantada en operación. Fuente: Rodrigues y van Kaick (2021).

La impermeabilización de los tanques en los cuales se instalaron los *wetlands* se realizó con una geomembrana de 0,80 mm de espesor. Cada tanque tenía un área superficial de 77 m², con 7 m de ancho por 11 m de largo. Cada 4 meses se realizaba se alternaba la operación de las unidades con el vertimiento del efluente en uno de los tanques de *wetland*. Ese procedimiento se realiza para que pueda ocurrir la desfragmentación de las zonas entumidas, lo que consiste en “aflojar” el sustrato del filtro físico cada 15 centímetros, en el sentido de la superficie hacia el fondo, principalmente en la región cercana a la entrada del vertimiento del efluente. Dicho procedimiento busca mejorar las condiciones hidráulicas del sistema y fue incrementado en la rutina operacional para evitar un escurrimiento superficial por encima del lecho filtrante, como resultado del proceso natural de colmatación del filtro.

La eficiencia media obtenida para el parámetro de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), entre la entrada y la salida a lo largo del primer año de funcionamiento del *wetland* fue de 72,1 %, y ya hace 10 años que se encuentra en actividad continua.

ESTUDIO DE CASO 7: *Consideraciones sobre la remoción periódica del lodo en comunidades de bajos ingresos y dificultades adicionales específicas*

Autor: David Robbins.

Este libro analiza la implementación de sistemas en el sitio, que incluye la evaluación del lugar, la selección de tecnología, el diseño y la instalación. Esta sección analiza una de las tareas de mantenimiento más importantes de los sistemas *in situ*, que es la eliminación periódica del lodo.

Introducción al saneamiento inclusivo en toda la comunidad

Los impactos del saneamiento deficiente en los países en desarrollo están bien documentados; su impacto puede llegar al 6 % del PIB, o inclusive superar dicho valor, dependiendo de la situación. En muchas áreas urbanas de ciudades en desarrollo, grandes porcentajes de la población no cuentan con servicios de saneamiento mejorados con contención segura de los lodos fecales y, con frecuencia, a nivel urbano aún se experimenta la falta de servicios de saneamiento gestionados de manera segura.

La cadena de servicios de saneamiento, comentada brevemente en el Capítulo 1, consiste en capturar los lodos fecales en una unidad de contención, como una letrina o una fosa séptica, vaciarlos y transportarlos (lo que se conoce como desenlodamiento) a una instalación de tratamiento, y reutilizarlos o eliminarlos como se ilustró en la Figura 1.2. Según los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el saneamiento gestionado de forma segura significa una manipulación segura e higiénica en cada etapa de la cadena del servicio de saneamiento. Desafortunadamente, en pueblos y ciudades de América Latina, gran parte de la cadena de servicios no funciona.

A nivel de ciudad, esto se logra promoviendo los beneficios de los servicios, mediante regulaciones locales que exijan una gestión adecuada de los sistemas de saneamiento local y de los lodos fecales, y con el apoyo de la administración local.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.2 establece que para el año 2030, los pueblos y ciudades deben lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres, las niñas y las personas en situaciones vulnerables.

Esto se puede lograr a través del saneamiento inclusivo para toda la población, que es un enfoque para analizar y planificar para el mejoramiento del saneamiento sostenible en un esfuerzo por brindar servicios de saneamiento para todos.

De acuerdo con el Banco Mundial (*The World Bank, 2023*), un proyecto de saneamiento inclusivo para toda la población es donde..

- Todos se benefician de resultados adecuados en la prestación de servicios de saneamiento que satisfagan las aspiraciones de los usuarios y protejan su salud.
- Los desechos humanos se gestionan de forma segura en toda la cadena de servicios sanitarios garantizando la protección del medio ambiente y

de la salud humana.

- Se adopta una diversidad de soluciones técnicas apropiadas, combinando soluciones tanto in situ como de vinculación a un sistema de alcantarillado, ya sea en sistemas centralizados o descentralizados, teniendo en cuenta la recuperación y reutilización de recursos.
- Las ciudades demuestran voluntad política, liderazgo técnico y administrativo e identifican nuevas y creativas opciones de financiamiento a largo plazo para el saneamiento.
- Se han establecido acuerdos y regulaciones institucionales, con incentivos bien alineados, para la operación y el mantenimiento de toda la cadena de servicios de saneamiento.
- Se asigna financiamiento para aspectos de la prestación de servicios no relacionados con la infraestructura, tales como el desarrollo de capacidades, la participación de los hogares y la comercialización de los servicios de saneamiento.
- Se incorporan en la planificación del saneamiento servicios urbanos complementarios, incluidos el suministro de agua, el drenaje, la gestión de aguas grises y la gestión de residuos sólidos.
- Se incluyen actividades dirigidas a grupos específicos sub-atendidos o desatendidos, tales como las mujeres, las minorías étnicas, las comunidades más pobres de las zonas urbanas y las personas con discapacidades.

Según Schrecongost et al. (2020), el marco de servicios de saneamiento inclusivo para toda la población identifica resultados y funciones centrales para los sistemas de prestación de servicios públicos. Los detalles específicos de cómo se definen los resultados y cómo se institucionalizan y ejecutan las funciones variarán según el país y la ciudad. Las autoridades sanitarias deben considerar una gama cambiante de diversas tecnologías y modelos de negocios para generar mejoras en el servicio con el tiempo, incluida la delegación de la prestación de servicios al sector privado cuando sea apropiado. Del mismo modo, se necesita una variedad de modelos y herramientas para una rendición de cuentas y una gestión de recursos significativas en diferentes contextos, incluidos, entre otros, los reguladores económicos. Independientemente del contexto, cualquier sistema de servicios que funcione bien depende de indicadores de desempeño institucionalizados y sólidos y de sistemas de seguimiento eficaces para fundamentar las decisiones.

Los resultados de la implementación de saneamiento inclusivo para toda la población incluyen:

1. Plan seguro de contención de lodos fecales. La contención segura se refiere a tanques o fosas que contienen lodos fecales en el sitio sin afectar negativamente a las aguas subterráneas y superficiales y para separarlos completamente de las personas. Los tanques sépticos

- correctamente diseñados e instalados son el método principal de contención segura, aunque ciertos diseños de inodoros de doble fosa también son apropiados en determinadas circunstancias. El plan de contención segura identifica la cantidad de hogares muy pobres que pueden requerir subsidios para mejorar sus sistemas de contención, el menú de opciones tecnológicas basadas en las condiciones del sitio que los hogares pueden adoptar y los mecanismos de inspección y permisos por parte del gobierno local.
2. Plan de recolección segura de lodos fecales. Esto describe un enfoque organizado para la recolección de lodos fecales que incluye equipos apropiados y seguros que permiten una eliminación higiénica de lodos y cambia el paradigma de una eliminación de lodos bajo demanda a una eliminación de lodos programada con el tiempo. Esta actividad incluirá una evaluación de rutas de viaje, tiempos y distancias para la entrega de lodos fecales y el potencial uso de estaciones de transferencia.
 3. Adecuación del sitio y selección de tecnología para el tratamiento y reutilización de lodos fecales que puedan considerar el contratamiento o la ubicación conjunta con instalaciones de residuos sólidos municipales, y posiblemente un enfoque descentralizado para el tratamiento de lodos fecales.
 4. Mapear los riesgos del sitio, incluidos suelos, áreas inundadas, proximidad a fuentes de agua, riesgos de inundaciones costeras y marejadas ciclónicas, entre otros, y vincular los sitios con un menú de opciones tecnológicas apropiadas dadas las limitaciones.
 5. Desarrollo de un plan de negocios que ilustra cómo el sector privado puede trabajar con el gobierno local para lograr un mejor saneamiento sin dejar de ser rentable. Ello incluirá una estimación de las inversiones requeridas y un modelo financiero integral con insumos de tarifas de servicio de eliminación de lodos (incluido el subsidio a las comunidades urbanas más pobres), el costo del ciclo del sistema y la estructura para la recuperación de los costos operativos.
 6. Plan de acceso a las unidades sanitarias públicas y comunitarias. La evaluación de la suficiencia de los baños públicos incluirá un “análisis de brechas de ubicación”, la necesidad de mejora y nuevas propuestas de bloques de baños públicos, basándose en indicadores como la afluencia existente, la disponibilidad de terrenos, el uso del suelo y la proximidad de los servicios. El resultado debe incluir la planificación de mejoras para unidades sanitarias públicas existentes seleccionadas y la ubicación propuesta de bloques de baños públicos con demandas no satisfechas. El proyecto también debería explorar tecnologías y sistemas emergentes como los que se estén desarrollando a través de programas de apoyo nacionales o globales, como por ejemplo Reinventthe Toilet, de la Fundación Bill y Melinda Gates.
 7. Fases del proyecto y plan de inversiones. Se debe llevar a cabo la implementación del proyecto por fases con respecto a la vulnerabilidad

económica y climática de los asentamientos. El orden de prioridad de las intervenciones se puede agrupar según los fondos disponibles y en función del consenso de las partes interesadas y proporcionará insumos para estructurar los escenarios relevantes del proyecto.

Una importante herramienta para desarrollar dichos resultados es el análisis geoespacial.

Análisis geoespacial para cuantificar las mejoras en el manejo de lodos fecales

El análisis geoespacial es una herramienta de análisis y recopilación de datos para programas de saneamiento inclusivo para toda la población. Programas de software como Arc GIS (o la versión gratuita, Q-GIS) permiten a los usuarios cuantificar parámetros comunes de saneamiento inclusivo para toda la población que en el pasado dependían de conjeturas fundamentadas. El análisis geoespacial se utiliza para a) cuantificar el número de hogares pobres observando el tipo de construcción de las casas, b) cuantificar el número de edificios que se ven afectados por diferentes condiciones del sitio, como lotes pequeños, áreas de difícil acceso o parcelas que están muy cerca de áreas de agua superficial o subterránea, c) identificar las mejores ubicaciones para baños comunitarios en función del tráfico peatonal, y d) identificar las mejores ubicaciones en la ciudad para ubicar los sistemas para tratamiento de lodos fecales.

El resultado de la evaluación produce información con ubicación geoespacial exacta, lo que ayuda a priorizar los planes de inversión, con un enfoque específico en las comunidades con un mayor nivel de vulnerabilidad a los riesgos climáticos y económicos. Se trata de un nuevo enfoque que se ha introducido en varios proyectos apoyados por la Fundación Bill y Melinda Gates.

La Metodología Geoespacial se basa en los siguientes siete pasos.

1. Organizar la base de datos geoespacial. Cuando sea posible, se utilizan datos existentes, por ejemplo, un plan maestro basado en SIG. Los datos de construcción y contención recopilados durante la Encuesta de Hogares están geoetiquetados.
2. Desarrollar un mapa de riesgo. Incluyendo vulnerabilidad económica, zonas de riesgo de inundaciones; problemas de anegamiento; proximidad a masas de agua, limitaciones de accesibilidad (zonas de difícil acceso); etc.
3. Plan de contención seguro para todos. Identifica la tecnología adecuada para la mejora de la contención frente a cada tipología de riesgo percibido.
4. Adecuada cobertura de unidades sanitarias públicas para los usuarios. Análisis de brechas de ubicación, requisitos de mejora y necesidad de

- nuevos bloques de baños públicos. Esta evaluación se basa en indicadores como la afluencia existente, el uso del suelo y la proximidad de los servicios.
5. Plan de colecta y transporte seguro para todos. Basado en el ancho de la carretera y el patrón de uso del suelo; ilustra el potencial de accesibilidad de los camiones mecánicos para acceder a asentamientos de difícil acceso; diseña rutas para camiones y sistemas de eliminación de lodos; Calcula el número de camiones necesarios.
 6. Cercanía de los asentamientos poblacionales a planta de tratamiento de lodos fecales. La distancia que deben recorrer los camiones para traer los lodos recolectados es razonable y, basándose en dicho entendimiento, se pueden proponer unidades de recolección/estaciones de transferencia adicionales según sea necesario.
 7. Verificación y validaciones sobre el terreno. Se realizan visitas de campo y consultas con grupos de partes interesadas clave para validar las intervenciones propuestas.

La Figura A.3.33 muestra las condiciones del lugar, relacionadas con el análisis de los sistemas de saneamiento en el sitio, siguiendo la forma de un Diagrama de Venn se presentan las relaciones que pueden existir entre diferentes grupos y sus intersecciones, e ilustran las similitudes entre dichos grupos. Las comunidades de bajos ingresos, las de difícil acceso, las localizadas en áreas inundadas y la proximidad a un cuerpo hídrico están marcadas. La superposición demuestra que algunos asentamientos de comunidades de bajos ingresos sufren múltiples riesgos.

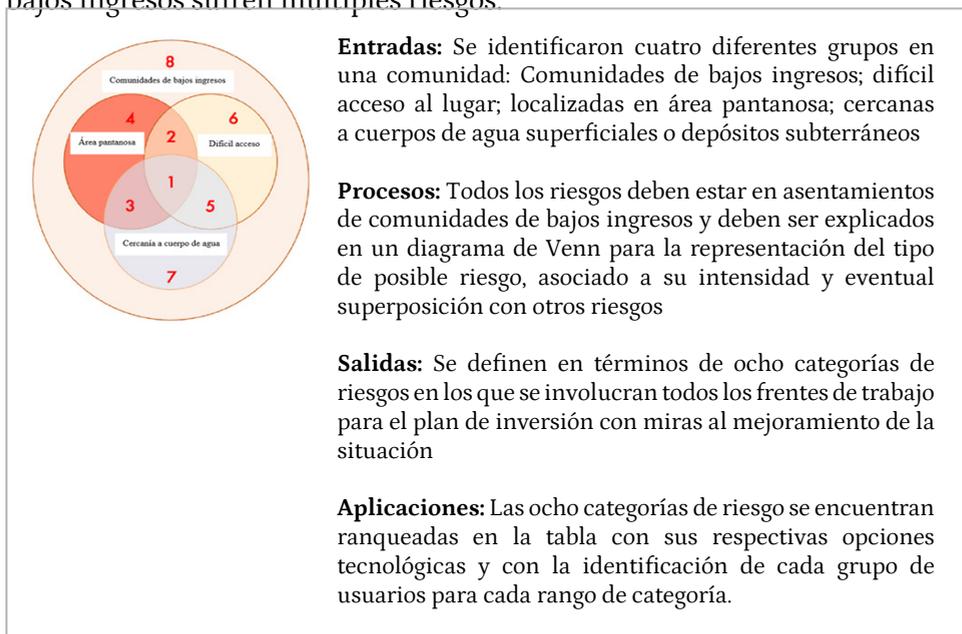


Figura A.3.33. . Marco de toma de decisiones para la selección de beneficiarios y mejoramiento de la contención.

La aplicación del análisis geoespacial para la selección de tecnología permite considerar de manera simultánea los principales factores, (tales como los hidrológicos y de accesibilidad vial, que influyen en la elección de la tecnología para contención del problema, que en el caso particular aquí comentado son:

- Suelos pantanosos (debidos a altos niveles de agua subterránea o a inundaciones de agua superficial)
- Proximidad al agua (cercanía a un cuerpo de agua)
- Zonas de difícil acceso (áreas inaccesibles para camiones de gran tamaño).
- Utilizando el análisis geoespacial, el área de la ciudad se divide en siete categorías de riesgo para las diversas combinaciones de los factores anteriores (Figura A.3.32). Los tipos sugeridos de tecnologías que se requerirían para las diferentes categorías de riesgo se encuentran en la Tabla A.3.1.

Tabla A.3.1 Categorías de riesgo y estrategia de contención

Clasificación del riesgo / Categoría	Tipología de riesgo dentro de los asentamientos con bajo nivel de ingresos	Tecnologías sugeridas (escala comunitaria o individual)
1	Comunidad inundada + Dificil acceso + Proximidad del agua	Comunitaria: SDMAR Individual – Letrinas elevadas
2	Comunidad inundada + Dificil acceso	Comunitaria: SDMAR Individual – Letrinas elevadas
3	Comunidad inundada + Proximidad del agua	Comunitaria: SDMAR Individual – Tanque séptico o letrinas de infiltración elevadas
4	Dificil acceso + Proximidad del agua	Individual – Letrinas elevadas
5	Asentamientos comunitarios inundados remanentes	Comunitaria: SDMAR Individual – Tanque séptico o letrinas de infiltración elevadas
6	Asentamientos comunitarios remanentes con cercanía a agua	Individual – Letrinas elevadas
7	Asentamientos comunitarios remanentes de difícil acceso	Individual – Tanque séptico plástico o letrinas de infiltración elevadas
8	Asentamientos poblacionales sin riesgos	Tecnologías Convencionales

Fuente: (Los Autores).

El protocolo da prioridad a las comunidades de bajos ingresos. El análisis geoespacial permite determinar la ubicación y número de personas de bajos ingresos en las diferentes categorías de riesgo. Así, se puede determinar el número de sistemas in situ para tales comunidades.

Baños públicos

Mediante análisis geoespacial, se identificaron varias ubicaciones posibles de bloques de baños públicos en cada comunidad. El diseño y tamaño de los baños públicos dependerá del número esperado de usuarios por día. Se deben tomar previsiones para atender a mujeres y niños y facilitar el acceso para las personas discapacitadas.

Se deben considerar tanto las tecnologías tradicionales, tales como las fosas sépticas y los SDMAR, así como las tecnologías innovadoras, como los inodoros reinventados para múltiples usuarios (*Multi-user Reinvented Toilet: MURT*). También se debe considerar la provisión de espacio comercial para la generación de ingresos adicionales, ya que, para obtener mejores resultados, los baños públicos deben operar como un servicio por el que los usuarios deberán pagar.

Generación de lodos fecales

La cantidad actual de lodos fecales vertidos de los tanques y fosas de contención en cada localidad se estima: i) considerando el número actual de unidades de contención, ii) su volumen promedio, iii) el porcentaje de la población que ha desenlodado en el pasado, y iv) la frecuencia promedio de desenlodado.

El flujo futuro dependerá de: i) la tasa de crecimiento de la población, ii) la cantidad prevista de sistemas en el sitio, iii) una mayor conectividad a una red de agua, y iii) un aumento de las conexiones de alcantarillado.

Recogida de lodos fecales - Equipos para vaciado higiénico de fosas y tanques
Los barrios marginales urbanos y otras zonas de alta densidad de población presentan dificultades de acceso para los camiones aspiradores estándar. Para dar servicio a estas áreas, se pueden usar equipos alternativos, tales como bombas de refuerzo y bombas manuales, camiones cisterna para colecta de lodos fecales impulsados por motocicletas. Ejemplos de las alternativas aplicadas son:

Bomba PuPu

La bomba PuPu es la combinación de un pequeño compresor, un depósito con válvulas antirretorno automáticas y una válvula de succión/presión operada manualmente (Figura A.3.34). El pequeño volumen del depósito permite alcanzar un alto vacío en poco tiempo para realizar la aspiración de los lodos. Además de realizar la aspiración desde el pozo, la bomba PuPu también puede impulsarlo hacia un tanque localizado en un vehículo cercano o estacionado a distancia. En este caso, no se necesita un camión cisterna o

vehículo de vacío resistente y costoso, sino que se puede instalar una unidad de almacenamiento simple en un camión de transporte.



Figura A.3.34. . Imágenes de la bomba Pupu. Fuente: Practica Foundation (2023). <https://www.practica.org/our-innovations/pupu-pump/>

Gulper - Colecta manual de lodos fecales

Consiste en una bomba de lodos fecales accionada manualmente que se utiliza para vaciar las letrinas, parcial o totalmente llenas. En su mayoría, los operadores privados administran los servicios de recolección y llevan los residuos recolectados a plantas de tratamiento municipales o estaciones de transferencia. El Gulper es una bomba que se coloca encima de una losa de letrina (plataforma en concreto reforzado). El tubo Gulper desciende al interior de la contención a través del orificio de contención. Usando equipo de protección personal, el operador levanta y baja la manija del Gulper, dicho movimiento realiza la succión del lodo, que pasa a través de la boquilla hacia el contenedor de recolección (barril) con la ayuda de válvulas en la tubería del Gulper. Tales actividades se aprecian a continuación en la Figura A.3.35.



Figura A.3.35. . Extracción de lodos fecales por medio de la bomba Gulper.
Fuente: WaterAid.org (2023). https://washmatters.wateraid.org/sites/g/files/jkxoof256/files/technology-the-gulper-poster_0.pdf

Transporte motorizado para lugares de difícil acceso

Para extraer los lodos fecales de lugares con difícil acceso se recurre al transporte en vehículos motorizados pequeños y medianos, incluidos triciclos a motor y camionetas. Los lodos fecales pueden transportarse en contenedores individuales sellados o en un único tanque grande montado en la plataforma de carga del vehículo como se indica en la Figura A.3.36.



Figura A.3.6. Cisterna para transporte de lodos fecales en remolque traccionado por motocicleta. Fuente: Akvopedia (2007). https://akvopedia.org/wiki/File:Cartage_systems.png



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Pollution Control Federation (WPCF). (1992).

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition, Washington DC: APHA, AWWA and WPCF.

Baum, R., Luh, J., & Bartram, J. (2013). Sanitation: A Global Estimate of Sewerage Connections without Treatment and the Resulting Impact on MDG Progress. *Environmental Science & Technology*, 47(4), 1994–2000. <https://doi.org/10.1021/es304284f>

Beal, C. D., & Stewart, R. A. (2014). Identifying residential water end uses underpinning peak day and peak hour demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(7), 04014008-1-04014008-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000357)

Bowles, J. E. (1981). *Manual de laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. México D.F.: Mc Graw Hill.

Casey, P. (1996) *Alternative sewers: A good option for many communities*. Morgantown, West Virginia, USA: NSFC. National Small Flows Clearing house. Publications, SFPLNLO7. http://www.nesc.wvu.edu/pdf/WW/publications/pipline/PL_FA96.pdf.

CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2019). *Base de Datos y Publicaciones Estadísticas CEPALSTAT*. Recuperado de:

- <https://cepalstatprod.cepal.org/cepalstat/tabulador/ConsultaIntegrada.asp?idIndicador=3848&idioma=e>
- CIDWT. Consortium of Institutes for Decentralized Wastewater Treatment. (2009). Decentralized Wastewater Glossary, Second Edition. St. Louis, Washington – USA: CIDWT. <http://www.onsiteconsortium.org/glossary.html>.
- Colombia (2015a). Resolución 0631 de 2015. (2015, 17 de marzo). Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- Colombia (2015b). Decreto 1076 de 2015. (2015, 26 de mayo). Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- Colombia (2021). Resolución 1256 de 2021. (2021, 23 de noviembre). Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- SUPERSERVICIOS. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, & DNP. Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2019). Estudio sectorial de los servicios de acueducto y alcantarillado 2018. Recuperado de: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf
- County of San Diego. (2010). Design manual for onsite wastewater treatment systems. County Of San Diego: Department of Environmental Health, Land and Water Quality Division. https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/pds/ceqa/Soitec-Documents/Final-EIR-Files/references/rtcref/ch3.1.9/2014-12-19_DEH2010.pdf
- Das, B. M. (2014). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México D.F., México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Doczi, J. (2012). Archivo personal [Fotografía], United Kingdom.
- Egocheaga, L., & Moscoso, J. (2004). Una Estrategia para la Gestión de las Aguas Residuales Domésticas. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- FAO. (2019). On-farm practices for the safe use of wastewater in urban and peri-urban horticulture -a training handbook for Farmer Field Schools, Second edition. Rome: FAO. <https://www.fao.org/3/CA1891EN/ca1891en.pdf>
- Foster, V. (2001). Condominial water and sewerage systems: costs of implementation of the model. Lima, Perú: Water and Sanitation Program World Bank Office, Lima. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Foster-2001-Condominial.pdf>.
- Fulhage, J., Porter, J., & Sievers, D. (1993) Collecting and preserving waste

- and wastewater samples for analysis. Columbia, Missouri – USA: University of Missouri. <http://extension.missouri.edu/p/G1895>.
- Google Earth. (2019). Lorma Medical Center, MacArthur Highway, San Fernando, La Unión, Philippines. <https://earth.google.com/web/search/Lorma+Medical+Center,+MacArthur+Highway,+San+Fernando,+La+Uni%c3%b3n,+Filipinas/@16.63207888,120.31790987,5.04658222a,413.15725739d,35y,-Oh,Ot,Or/data=CigiJgokCUzPXxb9jAEUO1LhBSRzbAGYBDjrFK1TnAIZEE-wptJWDAOgMKATA>
- Hoover, M. T. (2013). Archivo personal [Imagen]. North Carolina, USA.
- Hoover, M., Konsler, T., & Godfrey, J. (2016). Septic Systems and Their Maintenance, Soil Facts. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University, College of Agriculture and Life Sciences, North Carolina Cooperative Extension Services. https://content.ces.ncsu.edu/show_ep3_pdf/1701510156/23229/
- Huaquisto, C. S., & Chambilla, F. I. G. (2019). Análisis del consumo de agua potable en el centro poblado de Salcedo, Puno. *Investigación & Desarrollo*, 19(1), 133 – 144. http://www.scielo.org.bo/pdf/riyd/v19n1/v19n1_a10.pdf.
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2002). Guía para monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y aguas subterráneas. Bogotá, Colombia: IDEAM https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007). Toma de muestras de aguas residuales. Bogotá, Colombia:
- IDEAM. http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-Oe123479d428
- IGES. Institute for Global Environmental Strategies. (2012). Towards Climate-Friendly Waste Management: The Potential of Integrated Municipal Solid Waste Management https://www.iges.or.jp/en/pub/list?search_api_fulltext=Muangklang&items_per_page=10
- Jones, D., Bauer, J., Wise, R., & Dunn, A. (2001). Small Community Cluster Wastewater Systems. West Lafayette, Indiana – USA: Purdue University Cooperative Extension Service. <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/id/id-265.pdf>
- Jones, D. (2004). The Disinfection Question – Answers for Onsite Systems. Morgantown, West Virginia-USA: National Environmental Services Center. https://actat.wvu.edu/files/d/d8b58bcf-dd07-4bc0-8b7b-d20e5a9403aa/pl_sp04.pdf.
- Juárez-Badillo, E., & Rico-Rodríguez, A. (1990 a). *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos - Volumen 1*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- Juárez Badillo, & Rico-Rodríguez, A. (1990 b). *Mecánica de Suelos: Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos - Volumen 2*. México D.F.,

- México: Editorial Limusa.
- Juárez Badillo, E., & Rico-Rodríguez, A. (1990 c). *Mecánica de Suelos: Flujo de Aguas en Suelo - Volumen 3*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- Kayombo, S., Mbwette, T. S. A., Katima, J. H. Y., Ladegaard, N., & Jørgensen, S. E. (2005) *Waste stabilization ponds and constructed wetlands design manual*. Copenhagen, Denmark: Danish University of Pharmaceutical Sciences, Section of Environmental Chemistry. http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Water&Sanitation/PondsAndWetlands_Design_Manual.pdf
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1987). *Mecánica de suelos*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- Lindbo, D., Miles, R., Presley, D. A., & Ransom, N. E. (2008). Soil profile descriptions. In: Logsdon, S., Clay, D., Moore, D., & Tsegaye, T. (Eds.). *Soil Science: Step-by-Step Field Analysis* (pp. 11-34). Madison, Wisconsin-USA: Soil Science Society of America, Inc. Ed. Logsdon.
- Lindbo D. (2009). Chapter 4: Soil and Site Concepts for Installers. In: Consortium of Institutes for Decentralized Wastewater Treatment (CIDWT). *Installation of Wastewater Treatment Systems* (pp. 43–62). Ames, Iowa-USA: Iowa State University, Midwest Plan Service.
- Lindbo, D. (2011). Archivo personal [Fotografía], North Carolina State University, USA.
- Lindbo, D. (2013). Archivo personal [Fotografía], North Carolina State University, USA.
- LooWatt, Flush with happiness. (2013). Loowatt Home Toilet. Impact Brixton, Electric Lane, London. <https://www.loowatt.com/#/>
- Macagba, R. (2012). Archivo personal [Fotografía], La Union Province, Philippines
- Mara, D., Lane, J., Scott, B., & Trouba, D. (2010). Sanitation and health. *PLoS Medicine*, 7(11), e1000363. <https://doi:10.1371/journal.pmed.1000363>.
- Mayer, P. W., DeOreo, W. B., Opitz, E. M., Kiefer, J. C., Davis, W. Y., Dziegielewski, B., & Nelson, J. O. (1999) *Residential end uses of water*. Denver, Colorado-USA: AWWA Research Foundation and American Water Works Association. <https://irp.cdn-website.com/bd62ee4a/files/uploaded/WRF%20%281999%29%20Residential%20End%20Uses%20of%20Water.pdf>
- Mikhael, G. (2023). Archivo personal [Fotografía], London-UK.
- Molloy Precast Products, Ltd. (2013). *Percolation and Tertiary Treatment*. <http://molloyprecast.com/percolation/tertiary.html>
- National Small Flows Clearinghouse. (1997) *Basic wastewater characteristics: Pipeline newsletter*. http://www.nesc.wvu.edu/pdf/WW/publications/pipeline/PL_FA97.pdf.
- OMS. Organización Mundial de la Salud. & UNICEF. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2022). *Progresos en materia de agua para*

- consumo, saneamiento e higiene en los hogares 2000-2020: cinco años después de la adopción de los ODS. Ginebra, Suiza: OMS & UNICEF.
- Onsite Sewage Treatment Program Staff - University of Minnesota. (2011). Manual for Septic System Professionals in Minnesota. St. Paul, Minnesota-USA: Water Resources Center University of Minnesota https://drive.google.com/file/d/1iYwQwG9JR5cJ_FweGgFsZM4K9JI6W22p/view
- OPS. Organización Panamericana de la Salud., CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. & UNATSABAR. Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural. (2003). Especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos. Lima, Perú: OPS, CEPIS, UNATSABAR. http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/sanea/etTanque_septico.pdf
- OPS. Organización Panamericana de la Salud., CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. & UNATSABAR. Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural. (2005). Guía para la operación y mantenimiento de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. Lima, Perú: OPS, CEPIS, UNATSABAR. http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/O55_O&M_tanques_septicos_Imhoff_lag/O&M_tanques_septicos_Imhoff_lagunas_estabilización.pdf
- OPS. Organización Panamericana de la Salud., CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. & UNATSABAR. Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural. (2005) Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. Lima, Perú: OPS, CEPIS, UNATSABAR. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_system_tank.pdf http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/O53_Diseño_tanques_septicos_Imhoff_lag/Diseño_tanques_septicos_Imhoff_lagunas_estabilización.pdf
- Orenco Systems Inc. (2010). Pumping Systems. Sutherlin, Oregon, United States. <https://www.orenco.com/applications/residential/choose-a-system#47073-pumping-systems>
- Osmond, D. L., Hoover, M. T., Hammet, W. S., & Young, J. (1997). Improving septic systems, HomeASyst North Carolina Environmental Stewardship for Homeowners - #4. North Carolina, USA: North Carolina State University, College of Agriculture and Life Sciences, North Carolina Cooperative Extension Services. <https://content.ces.ncsu.edu/improving-septic-systems-1>
- Palacios-Cruz, C. J. (2019). Diseño de cámaras de caída en sistemas de alcantarillado basados en materiales plásticos. (Tesis de Maestría). Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería,

- Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá D.C. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/43956/u830480.pdf?sequence=1>
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1998). *Ingeniería de Cimentaciones*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- PROSAB. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. (1999). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES. <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosabcamposfinal.pdf>
- PROSAB. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. (2001). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES. http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Pos_tratamento_de_efluentes_de_reatores_anaerobios.rar
- Reuter, S., Demant, D., Heredia, G., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., Ulrich, L., & Zurbrügg, C. (2022). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento para la Región del Gran Caribe*. Bremen, Alemania: Bremen Overseas Research and Development Association (BORDA).
- Rieck, C., von Muench, E., & Hoffman, H. (2013) *Technology review of urine-diverting dry toilets (UDDTs): Overview of design, operation, management and costs*. Eschborn, Deutschland: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Rodrigues, E. B., & van Kaick, T. S. (2021). *Wetlands construídos como alternativa para tratamento de esgoto para regiões rurais, periurbanas e comunidades isoladas*. En: Sezerino, P. H., & Pelissari, C. (Orgs.). *Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras* (pp. 137-153). Curitiba, Paraná-Brasil: Brazil Publishing.
- RTI International. (2011). *Research Triangle Institute web page*. <https://www.rti.org/focus-area/urban-sanitation/>
- Santos, R. A., & Athayde, J. G. B. (2019). *Utilização de filtro intermitente de areia como pós-tratamento de esgoto doméstico – estudo da taxa de aplicação superficial*. *Revista Principia*, 47, 95-103. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n47p95-103>.
- Sasse, L. (1998). *DEWATS: Decentralized Wastewater Treatment in Developing Countries*. Bremen, Germany: Bremen Overseas Research and Development Association. <https://www.ted-biogas.org/assets/download/Sasse1998.pdf>
- Schrecongost, A., Pedi, D., Rosenboom, J. W., & Shrestha, R. (2020). *Citywide Inclusive Sanitation: A Public Service Approach for Reaching the Urban Sanitation SDGs*. *Frontiers in Environmental Science*, 8(19), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00019>
- Spuhler, D. (2010). *Rotating Biological Contactors*. *Sustainable Sanitation and Water Management*. <http://www.sswm.info/category/>

- implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments/r
- SIDA. Swedish International Development Cooperation Agency. (1998). Ecological sanitation. Stockholm, Sweden: SIDA. http://www.ecosanres.org/pdf_files/Ecological_Sanitation.pdf
- The World Bank. (2022). Understanding poverty/Topics. <https://www.worldbank.org/en/topic/sanitation>
- The World Bank. (2023). Citywide Inclusive Sanitation (CWIS) Initiative. The World Bank Group, International Bank for Reconstruction and Development, International Development Association. <https://www.worldbank.org/en/topic/sanitation/brief/citywide-inclusive-sanitation>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, Ph., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2014). Compendium of Sanitation Systems and Technologies. 2nd Revised Edition. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag).
- Thermaco, Inc. (2023). Trustedgrease management. https://trapzilla.com/?_gl=1*1dbc4qn*_gcl_au*MzQ3MjI1OTYwLjE3MDE3NjUyMjI
- Thomson, A. (2013). Archivo personal [Fotografía], Durham, North Carolina, USA
- UN-HABITAT. United Nations Human Settlements Programme. (2008). Constructed wetlands manual. Nepal, Kathmandu: UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Constructed%20Wetlands%20Manual.pdf>
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (1999a). Wastewater technology fact sheet – Mound systems. Washington, DC- USA: US EPA. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/mound.pdf>
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (1999b). Wastewater technology fact sheet – intermittent sand filters. Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2005_07_14_isf.pdf
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (1999c). Wastewater technology fact sheet – Sequencing batch reactors. Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_10_31_mtb_sbr_new.pdf
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (1999d). Wastewater technology fact sheet – Ultraviolet disinfection. Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_uv.pdf
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (1999e). Wastewater technology fact sheet – Chlorine disinfection. Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_chlo.pdf

- US EPA. United States Environmental Protection Agency(2000a)
Wastewater technology fact sheet – Septic system tank.
Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_system_tank.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000b).
Wastewater technology fact sheet – Septic tank systems for large
flow applications. Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_septic_tank_large_flow_app.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000c).
Decentralized systems technology fact sheet – Septic tank leaching
chamber. Washington, DC- USA: US EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/septic_tank_leaching_chamber.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000d).
Wastewater technology fact sheet – Free water surface wetlands.
Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_free_water_surface_wetlands.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000e).
Wastewater technology fact sheet – Wetlands: Subsurface flow.
Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_wetlands-subsurface_flow.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000f).
Wastewater technology fact sheet – Trickling filters.
Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_trickling_filter.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000g).
Wastewater technology fact sheet – Package plants. Washington,
DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/infrastructure/septic/upload/package_plant.pdf.
- US EPA -United States Environmental Protection Agency-. (2002a).
The US EPA Onsite Wastewater Treatment Manual
(EPA625R-00008). Washington, DC- USA: US EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/2004_07_07_septics_septic_2002_osdm_all.pdf
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2002b)
Wastewater technology fact sheet, sewers, pressure.
Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_10_15_mtb_presewer.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2002c)
Wastewater technology fact sheet – Anaerobic lagoons. Washington,
DC- USA: US EPA. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/alagoons.pdf>.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency.
(2002d) Wastewater technology fact sheet – Facultative lagoons.

- Washington, DC- USA: US EPA. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_10_15_mtb_faclagon.pdf.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. (2002e) Wastewater technology fact sheet – Aerated, partial mix lagoons. Washington, DC- USA: US EPA. <http://www.epa.gov/owm/septic/pubs/apartlag.pdf>.
- Vymazal, J., & Kröpfelová, K. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total Environment*, 407(13), 3911-3922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.032>.
- Von Sperling, M. (2012). Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Principios del tratamiento biológico de aguas residuales, Volumen 1. San Juan de Pasto, Nariño-Colombia: Editorial Universidad de Nariño.
- Von Sperling, M. (2014). Lodos activados. Principios del tratamiento biológico de aguas residuales, Volumen 4. San Juan de Pasto, Nariño-Colombia: Editorial Universidad de Nariño.
- Wanasen, S-A. (2003). Upgrading conventional septic tanks by integrating in-tank baffles. (Thesis for the degree of Master of Engineering). National Centre of Competence in Research North-South. Pathum Thani, Thailand. http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SRI%20ANANT%20W%202003%20Upgrading%20Conventional%20Septic%20Tanks%20by%20Integrating%20In%20Tank%20Baffles.pdf.
- Winblad, U., & Simpson-Hebert, M. (2004) Ecological sanitation – revised and enlarged edition. Stockholm, Sweden: Stockholm Environment Institute.
- WHO. World Health Organization. (2006a). WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: Wastewater use in agriculture. Paris, France: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546832>
- WHO. World Health Organization. (2006b). WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 3: Wastewater and excreta use in aquaculture. Paris, France: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546840>
- WHO. World Health Organization. (2006c). WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture. Paris, France: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546859>

SOBRE LOS AUTORES

Iván Andrés Sánchez Ortiz

Ingeniero Civil de la Universidad de Nariño (UDENAR, 1998), Pasto-Nariño-Colombia; Especialista en Docencia Universitaria (UDENAR, 2000); Especialista en Alta Gerencia (UDENAR, 2002); M. Sc. en Ingeniería Civil, área de concentración en Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos/ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP, 2007), Ilha Solteira/São Paulo-Brasil. Ph. D. en Ingeniería Civil, área de concentración en Saneamiento e Ingeniería Ambiental/ Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2018). Desde 1998 es docente en la Universidad de Nariño, actualmente está adscrito al Departamento de Recursos Hidrobiológicos con la categoría de Profesor Asociado.

David M. Robbins

Profesional en Estudios Ambientales de la Universidad de Rutgers, New Brunswick, Nueva Jersey, USA. (1981). Es un especialista en agua y saneamiento que trabaja en campo desde 1987. Ha desarrollado e implementado proyectos sobre Citywide Inclusive Sanitation: CWIS en Asia, África y naciones insulares del Pacífico. Autor de publicaciones divulgadas por la editorial de la International Water Association (IWA). En 2014 fue pionero en el uso de evaluaciones técnicas rápidas para informar los programas de eliminación de lodos de Indonesia, y pionero de las tecnologías que utilizan turba de coco para tratar los efluentes de fosas sépticas.

Grant C. Ligon

Profesional en Estudios Ambientales de la Universidad de North Carolina, Chapel Hill, USA (2011); M. Sc. en Salud Pública y MBA de la Universidad de California, Berkeley, California, USA (2022). Es un gerente corporativo de Environmental, Social and Governance en tecnología con más de una década de experiencia en análisis de datos de impacto ambiental e informes de emisiones de gases de efecto invernadero, energía, residuos sólidos, agua y aguas residuales. Destina su experiencia y estudios hacia temas relacionados con el medio ambiente y la sostenibilidad para apoyar la reducción de impactos ambientales, trabaja con empresas y con entidades gubernamentales.

èditorial

Universidad de **Nariño**

Fecha de publicación: Noviembre 2024
San Juan de Pasto Nariño-Colombia

En este texto se abordan paso a paso los aspectos necesarios para la selección de la(s) tecnología(s) que sean compatibles con una realidad específica y que permitan realizar de manera eficiente y lo más económica posible un Sistema Descentralizado para el Manejo de las Aguas Residuales (SDMAR); se enfatiza en el término manejo, pues se pretende incentivar el pensamiento que permita trascender el tratamiento de los efluentes y considerar el eventual reúso del líquido tratado y de subproductos del tratamiento. Aunque se comentan aspectos relevantes sobre opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales, el libro no es un manual de diseño de sistemas de tratamiento de efluentes, pues existen diversas referencias mundiales que abordan los parámetros y criterios de diseño para cada tecnología y tipo de agua residual.

El libro enfatiza en la no existencia de un modelo o solución universal y se describen las informaciones necesarias para que una institución, comunidad o región puedan elegir una adecuada opción para la gestión de las aguas residuales. Para seleccionar el tipo de sistema de manejo de los efluentes es fundamental: caracterizar las fuentes de las aguas residuales, evaluar lugares para implementar el SDMAR e identificar las tecnologías compatibles con las características del lugar junto al tipo de efluente a tratar y con base en ello seleccionar la(s) tecnología(s). Cada una de tales etapas son comentadas con un énfasis especial en las realidades de países en vías de desarrollo, en la implementación de tecnologías sencillas, en el potencial aprovechamiento del terreno disponible y del suelo como parte del sistema de tratamiento.

Así mismo, en el libro se enfoca la temática desde una perspectiva práctica con suficiente argumentación técnica, sin el uso de un número excesivo de referencias y con inclusión de importante material gráfico, para ello se conjugó la formación académica con la experiencia científica y de consultoría de sus autores a nivel de análisis, diseño, construcción y operación de SDMAR en países como Filipinas, China, Vietnam, Camboya, Tailandia, Indonesia, Colombia, Perú, Brasil, Ecuador, Méjico, Guatemala, El Salvador y Honduras. Las experiencias antes comentadas y la ejecución de proyectos financiados por entidades tales como el Banco Mundial, USAID, el Banco Asiático de Desarrollo, la Fundación Bill & Melinda Gates, CAPES y CNPQ, brindan herramientas que orientarán a los lectores en los criterios preliminares para seleccionar y diseñar un SDMAR adaptado a las condiciones específicas de su localidad.

