

SELECCIÓN DE TERRENOS PARA LA UBICACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO



© AECID 2024

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

Av. Reyes Católicos, 4
28040 Madrid, España
Teléfono: +34 91 583 81 00
www.aecid.es

Catálogo General de Publicaciones Oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es>

Esta publicación ha sido posible gracias a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). El contenido de la misma no refleja necesariamente la postura de la AECID.

NIPO en línea: 109-24-014-X

Dirección y Coordinación:

Coordinación por parte de la AECID: Yasmina Ferrer Medina. Departamento del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento.

Esta publicación ha sido elaborada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) por encargo de la AECID. Autoría por parte del CEDEX: Ignacio del Río Marrero, Ángel Bermúdez Simón y Carlos López Monllor. Área de Tecnología del Agua del Centro de Estudios Hidrográficos.

Diseño original y maquetación:

CEDEX

Email:

dfcas@aecid.es

Fotografía de la portada: Construcción de la planta de tratamiento de Mantilla (La Habana, Cuba).

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	CONTEXTO DE LA SELECCIÓN DE LOS TERRENOS	4
2.1	SITUACIONES DONDE SE REALIZA LA ELECCIÓN DEL TERRENO	4
2.1.1	APORTACIÓN POR LOS RESPONSABLES LOCALES	4
2.1.2	SOLICITUD ANTES DE INICIAR DEL PROYECTO	4
2.1.3	SELECCIÓN DURANTE LOS ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD.	5
2.2	PARTES INTERESADAS	6
3	REPERCUSIONES DE LA ELECCIÓN DEL TERRENO	8
3.1	SUPERFICIE DISPONIBLE	8
3.1.1	REQUERIMIENTOS DE SUPERFICIE POR TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	9
3.1.2	SUPERFICIE REQUERIDA PARA INSTALACIONES AUXILIARES	13
3.1.3	SUPERFICIE REQUERIDA PARA INFILTRACIÓN DEL EFLUENTE	13
3.2	CONDICIONANTES DE LA UBICACIÓN	14
3.2.1	ALTITUD RELATIVA	14
3.2.2	DISTANCIA A LA POBLACIÓN Y A ACTIVIDADES SENSIBLES	15
3.2.3	ALINEACIÓN CON LOS VIENTOS DOMINANTES	19
3.2.4	PUNTO DE VERTIDO	20
3.2.5	EXPOSICIÓN A LA LUZ SOLAR	24
3.3	REPERCUSIONES SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR	24
3.3.1	TOPOGRAFÍA DEL TERRENO	24
3.3.2	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	27
3.3.3	MOVIMIENTO DE TIERRAS	30
3.3.4	NIVEL FREÁTICO Y SUBPRESIÓN	31
3.3.5	RIESGO DE INUNDACIÓN	35
3.3.6	RIESGO DE AFECCIÓN POR LA DINÁMICA FLUVIAL	37
3.3.7	RIESGO SÍSMICO	37
3.4	INSTALACIONES AUXILIARES	38
3.4.1	CONDUCCIÓN HASTA LA PLANTA	39
3.4.2	ACCESIBILIDAD DEL TERRENO	40
3.4.3	CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA Y AL ABASTECIMIENTO DE AGUA	41
3.4.4	INSTALACIONES DE VERTIDO	41
3.5	USOS ACTUALES DEL TERRENO Y SU ENTORNO	41
3.6	COSTOS ASOCIADOS AL TERRENO Y SERVIDUMBRES DE PASO	46
3.7	SEGURIDAD EN LA PUESTA A DISPOSICIÓN DEL TERRENO	46
4	PROCEDIMIENTOS PARA LA SELECCIÓN DEL TERRENO	48
4.1	IDENTIFICACIÓN PREVIA DE TERRENOS ADECUADOS	49

4.1.1	EMPLEO DE GIS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TERRENOS	50
4.1.2	EMPLEO DE LISTAS PATRÓN O <i>CHECK-LIST</i>	51
4.1.3	VERIFICACIÓN IN SITU	52
4.2	SELECCIÓN EN LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DE PROYECTO	52
4.3	SELECCIÓN EN LA FASE DE ESTUDIOS PREVIOS	53
5	<u>RESUMEN Y PRINCIPALES APORTACIONES</u>	58
6	<u>REFERENCIAS</u>	59
	<u>ANEXO I. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA EL PROCESO DE IDENTIFICACION Y SELECCIÓN DE TERRENOS</u>	62
	<u>ANEXO 2. LISTA PATRÓN EN LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO</u>	65
	<u>ANEXO 3. VALORACIÓN EN LA FASE DE ESTUDIOS PREVIOS</u>	68

CASOS EJEMPLO

BOX 1. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE REQUERIDA PARA LAGUNAJE EN BOLIVIA	11
BOX 2. DISTANCIA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO A LA POBLACIÓN EN EL SALVADOR	16
BOX 3. DISTANCIA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO A LA POBLACIÓN EN NICARAGUA	17
BOX 4. CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN EN TORNO A LA PTAR EN WARNES (BOLIVIA)	19
BOX 5. CONDICIONANTES DE VERTIDO EN EL LAGO ATITLÁN (GUATEMALA)	22
BOX 6. TERRENO EN UN PALEOCAUCE EN SAN JUAN BAUTISTA (PARAGUAY)	28
BOX 7. LAGUNAJE EN UN TERRENO KÁRSTICO EN ALLENTOWN (ESTADOS UNIDOS)	30
BOX 8. LEVANTAMIENTO DE LA GEOMEMBRANA DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO	32
BOX 9. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE GIS EN LA SELECCIÓN DE TERRENOS DE PTAR	50
BOX 10. SELECCIÓN DE TERRENOS PARA UBICAR LA PTAR EN BLUEFIELDS (NICARAGUA)	56

FIGURAS

FIGURA 1. RELACIONES ENTRE DECISIONES Y ESTUDIOS DE UN PROYECTO DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO	5
FIGURA 2. ÁREA NETA (M²/HAB.) PARA UNA PLANTA CON LAGUNAS ANAEROBIAS, FACULTATIVAS Y DE MADURACIÓN. FUENTE: WAGNER (2010).	11
FIGURA 3. ÁREA NETA (M²/HAB.) PARA UNA PLANTA CON LAGUNAS FACULTATIVAS Y DE MADURACIÓN. FUENTE: WAGNER (2010).	12
FIGURA 4. PLANTA DE TRATAMIENTO DE MENDIGORRÍA (NAVARRA, ESPAÑA)	15
FIGURA 5 LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS (SANTA CRUZ, BOLIVIA)	18
FIGURA 6. IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL ENTORNO DE LA PLANTA DE WARNES (BOLIVIA) EN 2003 Y 2022. FUENTE: GOOGLE EARTH	19
FIGURA 7. IMÁGENES DE LOS ESTUDIOS DE DIFUSIÓN DE OLORES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA CHINA, MADRID. FUENTE: DEL RÍO (2020).	20
FIGURA 8 VERTIDO DE LA PTAR DE WARNES (SANTA CRUZ, BOLIVIA)	21
FIGURA 9. ÁREA DE INFILTRACIÓN DE LA PTAR DE KONANI (BOLIVIA). EN CONSTRUCCIÓN (IZQUIERDA) Y SATURADA TRAS VARIOS AÑOS DE FUNCIONAMIENTO (DERECHA)	22
FIGURA 10. LAGO ATITLÁN, GUATEMALA	23
FIGURA 11 RECONOCIMIENTO DE LOS TERRENOS DISPONIBLES PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA PTAR EN SANTO TOMÁS, NICARAGUA. TERRENO DE ROCA VOLCÁNICA CON FUERTE PENDIENTE.	25
FIGURA 12 PTAR CON HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL DE ALBONDÓN (GRANADA, ESPAÑA). FUENTE: CEDEX AND CENTA (2010).	26
FIGURA 13 PTAR CON DOBLE ETAPA DE FILTROS PERCOLADORES EN EL SALVADOR.	26
FIGURA 14 OBRAS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR DE JUAN DÍAZ, PANAMÁ.	27
FIGURA 15 ESTUDIO GEOTÉCNICO EN UNO DE LOS TERRENOS EVALUADOS PARA LA PTAR DE BLUEFIELDS (NICARAGUA).	28

FIGURA 16 VISTA DEL PALEOCAUCE EN EL TERRENO DE LA PTAR DE SAN JUAN (PARAGUAY).	29
FIGURA 17 IMÁGENES AÉREAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR DE SAN JUAN (PARAGUAY). FUENTE: GOOGLE EARTH.	29
FIGURA 18 PRECIOS POR M³ DE EXCAVACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE TERRENO.	30
FIGURA 19 MOVIMIENTO DE TIERRAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS LAGUNAS DE SANTA FE (BOLIVIA).	31
FIGURA 20 OBRAS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR DE MARIPOSAS (BOLIVIA).	32
FIGURA 21. LEVANTAMIENTO DE LA GEOMEMBRANA Y OTROS PROBLEMAS COMUNES EN BALSAS. FUENTE: CEDEX (2010).	33
FIGURA 22. LEVANTAMIENTO DE LA GEOMEMBRANA POR EMBOLSAMIENTO DE GAS EN LA PTAR DE COBIJA, BOLIVIA. FUENTE: GOOGLE EARTH	34
FIGURA 23. ESQUEMA GENERAL DE LAS SALIDAS DE GASES A TRAVÉS DEL TALUD Y SISTEMA DE DRENAJE. ADAPTADO DE LA NORMA UNE 104 421:1995	34
FIGURA 24 CATA REALIZADA EN LOS TERRENOS DE LAS PTAR DE WARISATA (BOLIVIA), DONDE SE PUEDE APRECIAR EL NIVEL FREÁTICO SOMERO.	35
FIGURA 25. PLANTA DE TRATAMIENTO DE PEHUAJÓ, ARGENTINA	35
FIGURA 26 ESTUDIOS DE INUNDABILIDAD EN EL ENTORNO DE LA UBICACIÓN DE LA PTAR DE CAIMITO, PANAMÁ.	36
FIGURA 27 DIQUE DE PROTECCIÓN E INSTALACIONES DE DRENAJE EN LA PTAR DE MANAGUA (NICARAGUA).	36
FIGURA 28. DERRUMBE DE UN DIQUE DE LA LAGUNA DE LA PTAR DE LOS NEGROS (BOLIVIA) DEBIDO A LA SOCAVACIÓN GENERADA POR EL RÍO Y DIQUES DE PROTECCIÓN CONSTRUIDOS A POSTERIORI PARA EVITAR EL PROBLEMA.	37
FIGURA 29 OBRAS DE CONSTRUCCIÓN DEL EMISARIO A LA PTAR DE SAN CARLOS, BOLIVIA.	39
FIGURA 30 DETERIORO POR LAS LLUVIAS DEL CAMINO DE ACCESO A UNO DE LOS TERRENOS ESTUDIADOS PARA LA PTAR DE YUCUMO (BOLIVIA).	40
FIGURA 31 TERRENO DONDE SE CONSTRUYÓ LA PTAR DE LINDE-PARACAYA, BOLIVIA. UBICADO EN EL LÍMITE DE LA ZONA URBANA	42
FIGURA 32 HUMEDAL PROPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR DE SAN IGNACIO, PARAGUAY.	43
FIGURA 33. PRESENCIA DE LAGARTOS EN UN SISTEMA DE LAGUNAJE DE COSTA RICA	44
FIGURA 34. PRESENCIA DE CAPIBARAS EN LA LAGUNA DE TRINIDAD (BOLIVIA), A PESAR DE ENCONTRARSE DENTRO DE LA POBLACIÓN	44
FIGURA 35. REPARACIÓN EN LA MEMBRANA DE IMPERMEABILIZACIÓN DE UNA LAGUNA DE LAS ROTURAS GENERADAS POR LA ENTRADA DE GANADO. PTAR DE KONANI (BOLIVIA)	45
FIGURA 36. LAGUNA INVADIDA POR LA VEGETACIÓN EN LA PTAR DE SAN BERNARDINO (PARAGUAY)	45
FIGURA 37. RELLENO SANITARIO PROPUESTO PARA UBICAR LA PTAR DE SANT RITA (PARAGUAY)	47
FIGURA 38. PROCESO DE DECISIÓN PARA LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DE UNA PTAR. FUENTE: JAJAC ET AL. (2019).	49
FIGURA 39. APLICACIÓN GIS PARA UN ANÁLISIS MULTICRITERIO. FUENTE: MANSOURI ET AL. (2013).	50
FIGURA 40. PROYECTO DE BLUEFIELDS. FUENTE: VEOLIA AND TECNICASA (2013).	56

TABLAS

TABLA 1. REQUERIMIENTOS DE SUPERFICIE DE LOS DISTINTOS TIPOS DE TECNOLOGÍAS EN ESPAÑA	9
TABLA 2. ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE NECESARIA (M²/HAB.) PARA ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO EN LOS LLANOS, BOLIVIA	10
TABLA 3. DISTANCIAS MÍNIMAS A LINDEROS DE LA PROPIEDAD PARA SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SALVADOR. FUENTE: RTS 13.05.01:18 (2018).	16
TABLA 4. DISTANCIAS DE SEPARACIÓN CON UNA PTAR EN NICARAGUA. FUENTE: NTON 05 027-05 (2006).	17
TABLA 4. LÍMITES DE CONTAMINACIÓN DE LOS VERTIDOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN Y ESTABLECIDOS POR LA LEGISLACIÓN GENERAL PARA 2024	23
TABLA 5. ANÁLISIS MULTICRITERIO DEL TERRENO EN BLUEFIELDS. FUENTE: VEOLIA AND TECNICASA (2013).	57

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AECID:	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
BCCA	Base de costes de la construcción de la Junta de Andalucía
CEDEX:	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CENTA:	Centro de Nuevas Tecnologías del Agua
CTE:	Código Técnico de la Edificación de España
DBO₅:	Demanda biológica de oxígeno en cinco días
DQO:	Demanda química de oxígeno
FCAS:	Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento
GIS:	Sistemas de información geográfica por sus siglas en inglés (Geographical Information System)
h-e:	Habitante equivalente (60 g DBO ₅ /hab.)
hab.:	Habitantes
IGME:	Instituto Geológico y Minero de España
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
NMP:	Número más probable
NT:	Nitrógeno total
NTON:	Norma técnica obligatoria nicaragüense
PT:	Fósforo total
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales. Entendidas en este texto como aguas residuales provenientes de poblaciones
RTS:	Reglamento Técnico Salvadoreño
RAFA:	Reactor anaerobio de flujo ascendente
TRAGSA	Empresa de Transformación Agraria, S.A. (grupo empresarial público español)
UASB:	Reactor anaerobio de flujo ascendente, por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
UNE:	Asociación Española de Normalización

I INTRODUCCIÓN

Antecedentes y objeto

La meta 3 del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6, centrada en la reducción de la contaminación vertida, se ha demostrado como una de las más difíciles de alcanzar y, en Latinoamérica, muchos países están todavía lejos de lograr una cobertura elevada de aguas tratadas. Los factores que condicionan el escaso desarrollo son muchos y variados, pero también se debe destacar que, quizás, internacionalmente no se ha sabido medir la dificultad de alcanzar estas metas ni de evaluar el problema en toda su dimensión.

Alcanzar un escenario con grandes cifras en las coberturas de saneamiento y de tratamiento de las aguas no se trata de un simple problema de infraestructuras, sino que requiere en muchos sitios del desarrollo de todo un subsector profesional que apenas existe. El Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de la Cooperación Española, desde su creación en 2008, está tratando de impulsar el desarrollo de estos sectores y durante todos estos años, trabajando con múltiples colaboradores en la región, ha acumulado una gran cantidad de valiosas experiencias que pueden resultar útiles para los técnicos del sector.

En lo que respecta al diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento, desde la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) se están elaborando una serie de guías y recomendaciones sobre diferentes aspectos que tienen que ver con el desarrollo del tratamiento de las aguas residuales. Todas ellas están basadas en la experiencia y las lecciones aprendidas en proyectos en Latinoamérica y abordan temáticas concretas donde se ha detectado que resulta conveniente reforzar el conocimiento.

Cuando se proyecta el saneamiento y tratamiento de las aguas residuales en una población, es necesario adoptar muchas decisiones de carácter técnico; cada una de ellas afectará a las demás y entre todas determinan las soluciones y la estrategia a seguir en la configuración de los sistemas, por lo que deberían estar soportadas por estudios adecuados. Además de la selección de la tecnología tratamiento y estrechamente ligado a la misma, la selección del terreno o terrenos donde ubicar las plantas de tratamiento es una de las decisiones que más repercusiones va a tener sobre la sostenibilidad del servicio. El terreno es probablemente el factor más determinante en la selección del tipo de tratamiento y, consecuentemente, en los costos tanto de construcción como de operación y mantenimiento de la instalación. A pesar de su gran incidencia, la experiencia muestra que, con frecuencia, no se le concede a esta decisión la importancia que requiere y muchas veces se elige el terreno sin el conocimiento ni la reflexión adecuada.

Con objeto de contribuir a mejorar la sostenibilidad de los servicios futuros, desde el Departamento Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) se ha encargado al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) la elaboración de una guía que pueda servir de apoyo a los técnicos a plantear la selección del terreno de manera adecuada.

Este es el segundo trabajo editado en esta serie de recomendaciones, después de las recomendaciones para *Selección de tecnologías de tratamiento* (CEDEX, 2022), publicadas recientemente y se debe destacar que ambas guías son complementarias, pues mientras el estudio de alternativas de tratamiento busca la solución tecnológica que más se ajuste a las condiciones locales, la selección del terreno trata de encontrar las condiciones locales que más favorables sean a las soluciones tecnológicas idóneas.

Ambos estudios se deberían abordar en paralelo y de manera coordinada en la fase de estudios previos o de plan director de un proyecto de saneamiento y tratamiento.

La guía de selección de tratamientos además debe tomarse como referencia para completar la información de este monográfico. En aquella guía se exponían los conceptos básicos y las diferentes metodologías existentes para el análisis multicriterio, que son también de aplicación para la selección de terrenos. Se presentaron también allí los aspectos que han de tomarse en consideración para valorar la sostenibilidad del servicio y cómo esta sustentabilidad ha de ser el objetivo principal al que deben responder todas las tomas de decisión.

Con esta serie de guías se pretende dotar a los técnicos de las administraciones y del sector privado de instrumentos y guías metodológicas para poder abordar más adecuadamente los proyectos, evitando errores típicos de la fase de análisis y selección de alternativas. Adicionalmente se pretende afianzar conceptos sobre la importancia que la fase de estudios previos tiene dentro del ciclo de proyecto para asegurar la sostenibilidad del servicio del tratamiento de aguas residuales.

Alcance y limitaciones en la aplicación de esta guía

Estas recomendaciones se centran en la selección de los terrenos para ubicar una planta de tratamiento, en caso en el que se haya optado por realizar un saneamiento colectivo de la población. Para ello se identifican los factores fundamentales que han de tomarse en cuenta en esta selección y se proponen diferentes metodologías de estudio y selección que se adaptan a múltiples escenarios y que puede ser seguida con claridad por cualquier actor implicado en la decisión.

La mayor utilidad de esta guía se encontrará probablemente en el segmento de las poblaciones medianas y pequeñas, dado que en este ámbito suele posibilitarse una disponibilidad real de alternativas. En las grandes poblaciones, sin embargo, debido a la magnitud de los terrenos necesarios y a la alta ocupación, con frecuencia las opciones de terrenos van a estar muy limitadas. Asimismo, en las pequeñas y medianas poblaciones, es donde el terreno va a ser un factor fundamental en la selección de la alternativa de tratamiento y, con ello, en la sostenibilidad de las instalaciones.

En esta guía no se pretende recoger y analizar todos los procedimientos de estudio posibles, sino aportar una serie de metodologías de apoyo en el análisis y, sobre todo, dejar patente la importancia que tiene abordar este ejercicio con el máximo rigor, identificando todos los aspectos importantes y mostrando cómo se pueden mejorar los estudios.

A quién van dirigidas estas recomendaciones

Estas recomendaciones se redactan como un manual técnico y no como un texto divulgativo. Su objetivo es servir de apoyo a los técnicos, tanto de las empresas consultoras como de las entidades promotoras o financiadoras, de los prestadores del servicio y de las administraciones o entidades supervisoras locales, en el proceso de selección de los terrenos donde han de ubicarse las plantas de tratamiento.

Será de lectura recomendada también para todos los profesionales implicados en cualquier fase del desarrollo de este tipo instalaciones, desde su concepción más general en un plan sectorial hasta su materialización en cada una de las poblaciones.

Contenido del documento

En estas recomendaciones se analizará el contexto de las situaciones en las que se pueda plantear la toma de decisiones sobre el terreno; se revisarán los factores técnicos, económicos, sociales y

ambientales más relevantes que deberían tomarse en consideración cuando se acomete la selección de los terrenos donde ubicar la planta de tratamiento, identificando sus aspectos fundamentales a un nivel de detalle suficiente para que el destinatario tenga unas bases de partida sólidas para realizar el análisis de los distintos terrenos posibles y la selección de la ubicación de la planta.

Se propondrán recomendaciones para lograr la selección más adecuada, dependiendo del momento en el ciclo de proyecto en el que se deba adoptar.

En esta Guía se detallarán todos los aspectos que deberían ser tomados en consideración a la hora de seleccionar los terrenos para ubicar la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), así como una serie de recomendaciones al respecto, posteriormente se propondrán diferentes metodologías para abordar con mayor rigor esta selección.

En cuanto a los contenidos, la Guía consta de cinco capítulos y tres Anexos. Los dos primeros capítulos introducen la guía y analizan el contexto donde se ha de tomar la decisión sobre la selección del terreno y su importancia. En el capítulo tercero se analizan en detalle las repercusiones que la elección del terreno puede tener sobre el proyecto en diferentes aspectos y en el cuarto se incluyen las recomendaciones para realizar una adecuada selección del terreno y se exponen diferentes procedimientos que se pueden servir de ayuda en este proceso. Finalmente, el capítulo 5 realiza una síntesis de los aspectos más relevantes de la guía.

En los anexos se sintetizan las diferentes fuentes de información a consultar para la selección de los terrenos y se aportan herramientas de apoyo a la decisión en la fase de identificación del proyecto y en la fase de estudios previos.

Elaboración de la guía

Los autores de este texto pertenecen al CEDEX y trabajan en el Área de tecnología del Agua del Centro de Estudios Hidrográficos. El CEDEX es un organismo oficial de la administración central española incluido en el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y con dependencia funcional de este ministerio y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Presta asistencia técnica especializada en el desarrollo de infraestructuras y en materia de medio ambiente, fundamentalmente a la administración española, aunque también a otros países, destacando el apoyo dado desde 2012 al desarrollo de los programas del FCAS. Durante este periodo sus técnicos han trabajado en diferentes proyectos de agua, saneamiento y tratamiento en once países diferentes de Latinoamérica.

La metodología que se recoge en esta guía es el resultado de muchos años de experiencia adquirida en el seguimiento de proyectos de tratamiento en diferentes países, tanto en España como en Latinoamérica, por los técnicos del CEDEX.

2 CONTEXTO DE LA SELECCIÓN DE LOS TERRENOS

Una vez que se adopta la decisión de construir una planta de tratamiento de aguas residuales en una población, comienza un largo proceso técnico y administrativo que termina con la construcción de la planta en un terreno concreto. La elección de esa ubicación debería ser la consecuencia de estudios específicos sobre la conformación de la red de saneamiento y sobre las repercusiones de su determinación, dado que tiene una gran influencia sobre la selección de la tecnología de tratamiento y sobre los costos de construcción y de operación de las instalaciones. Sin embargo, no siempre es así.

2.1 SITUACIONES DONDE SE REALIZA LA ELECCIÓN DEL TERRENO

Dependiendo del tipo de proyecto, de las circunstancias específicas de cada caso y de los procedimientos asumidos por los diferentes agentes que intervienen en el proyecto, la selección de los terrenos se realiza en diferentes momentos de la elaboración del proyecto y de maneras muy distintas.

2.1.1 Aportación por los responsables locales

En el proceso de selección de los terrenos suelen confluir diferentes intereses, especialmente cuando el promotor del proyecto es diferente de quien aporta el terreno. Aunque de cara a la optimización del servicio deberían tomarse en consideración los aspectos que se van a ver en esta guía, con frecuencia la selección es una decisión unilateral del prestador o de la municipalidad, que elige un predio atendiendo solo a sus propios intereses, que nada tienen que ver con el proyecto. Así, es muy frecuente que simplemente se escojan por la facilidad de adquisición o por ser de titularidad pública. En algunos casos, incluso, se proponen terrenos que presentan algún problema o tienen una utilidad muy limitada para otros usos, en el entendimiento de que el tratamiento de aguas residuales es una actividad “sucia” que solo merece los peores terrenos. En situaciones así el proyecto de saneamiento y tratamiento se verá muy perjudicado en cuanto a complejidad y costos tanto en la construcción como en la operación y mantenimiento.

Esta situación, dependiendo de las circunstancias, podría no ser reversible (si ya se ha adquirido el terreno para este fin, por ejemplo), por lo que resulta imprescindible que todas las partes responsables sean conscientes de la importancia de esta decisión desde la fase de identificación del proyecto y se realice la selección de manera adecuada.

En todo caso, si el promotor/financiador de la actuación comprueba que, entre las opciones propuestas, ninguna es adecuada, debería tratar de forzar la incorporación de nuevas alternativas. De hecho, es frecuente que debido a la ausencia de un mínimo análisis técnico, en el proceso se hayan descartado otras localizaciones posibles y mucho más favorables solo porque resultaba más compleja o laboriosa su adquisición.

2.1.2 Solicitud antes de iniciar del proyecto

En algunos casos, las instituciones financiadoras exigen, antes empezar con el proyecto, que los responsables de la población pongan a disposición un predio concreto, del que ya sean propietarios, convirtiéndose así en una variable fijada desde el inicio que va a condicionar todo su desarrollo. Estos procedimientos se han adoptado debido a que, con demasiada frecuencia, en el pasado, después de finalizar el proyecto, finalmente no se ha podido disponer del terreno previsto, derivando en sobrecostos y dilaciones o, incluso, la imposibilidad de culminar el proyecto.

Cuando se impone este requisito, muchas veces no se tiene la previsión de exigir que dichos terrenos tengan unas características mínimas o, si se hace, los requisitos establecidos resultan insuficientes para una selección adecuada. Por ejemplo, tan solo se impone una superficie mínima, pero sin evaluar antes cuáles son las necesidades reales e ignorando el resto de las características del terreno.

Viendo las repercusiones que la elección puede tener en la sostenibilidad de las instalaciones, incluso en estas fases tempranas de proyecto sería necesario que en su selección intervinieran especialistas con capacidad para identificar las ubicaciones más adecuadas y sería muy recomendable realizar un estudio de alternativas entre varias ubicaciones posibles.

La experiencia está demostrando que en muchos casos la selección realizada como condición previa y sin criterios establecidos, dista mucho de ser la más idónea y se basa en aspectos que nada tienen que ver con el proyecto. El resultado es que, aún después de exigir un terreno, en muchos casos también resulta muy difícil culminar el proyecto. Por todo ello, se ha dedicado el apartado 4.2 de esta guía a establecer recomendaciones para la selección en fase de identificación, de tal forma que la exigencia no se limite simplemente a solicitar un terreno sino el mejor terreno de los posibles.

2.1.3 Selección durante los estudios de prefactibilidad.

La elección del terreno donde se ubicará la planta o plantas de tratamiento de aguas residuales va a tener una gran influencia en el proyecto del saneamiento de una población. Por una parte, determinará la configuración general de la red y, por otra, condicionará la selección de las tecnologías de tratamiento que se puedan implantar y el diseño de la propia planta. En consecuencia, el terreno es en muchos casos la variable que más va a condicionar los costos de implantación, operación y mantenimiento de todo el sistema de saneamiento y tratamiento. En la Figura 1, se esquematizan las principales relaciones entre los elementos de un proyecto de saneamiento y tratamiento.

Debido a su repercusión, la selección del terreno debería ser uno de los estudios técnicos más importantes a realizar durante la planificación del saneamiento de una población. La configuración de la red debe condicionar la selección de terreno o terrenos para las plantas de tratamiento y la disponibilidad de terrenos va a condicionar la configuración de la red. Pero, a su vez, las alternativas de tratamiento que puedan plantear debería ser un factor clave tanto para la selección de los terrenos como para cualquier otra decisión del plan director.

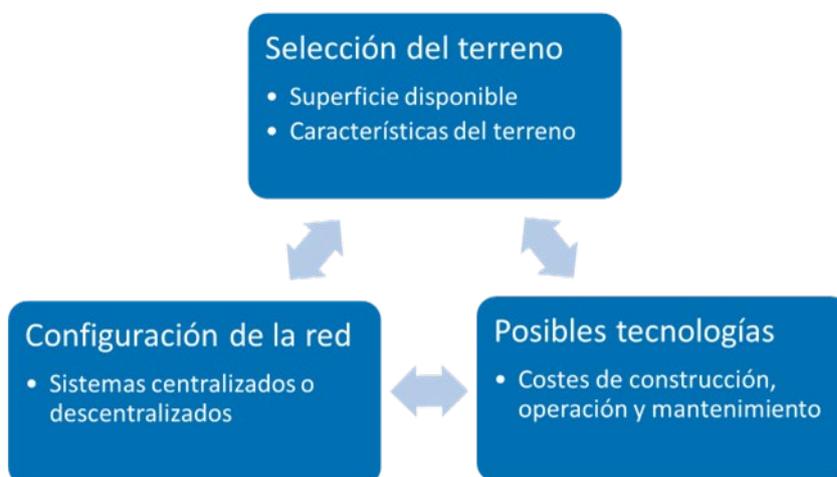


Figura 1. Relaciones entre decisiones y estudios de un proyecto de saneamiento y tratamiento

Para que pueda realizarse una adecuada elección, lo primero sería poder contar con alternativas suficientes, lo que no siempre es posible. La disponibilidad de terrenos para elegir dependerá de diferentes circunstancias y, entre ellas, del tipo de proyecto que se trate. Generalmente, si la red ya existe y el proyecto es solo para la PTAR las opciones estarán mucho más limitadas que si se va a construir toda la red de saneamiento. En este caso, además, se podrá optar por diferentes grados de centralización en la red de saneamiento, por lo que será necesario un único terreno o varios más pequeños, dependiendo de la solución general adoptada.

Sistema centralizado y descentralizado

En una población puede haber diferentes vertientes o subcuencas que hagan inevitable la utilización de bombeos para poder llevar las aguas residuales a una única planta de tratamiento y, en muchos casos, estas impulsiones se convierten en uno de los elementos que más van a condicionar la prestación del servicio, por su costo y necesidades de mantenimiento y reposición.

De manera alternativa, se podría optar por desarrollar sistemas descentralizados, con el objetivo de reducir el número de bombeos, construyendo diferentes PTAR en una misma población. En este marco se puede optar por modelos más descentralizados, con una planta para cada barrio o subcuenca, o por soluciones intermedias, reduciendo al mínimo posible el número de plantas.

Aunque la decisión sobre sistemas centralizados/descentralizados depende de más factores que el de la selección del terreno, la disponibilidad de terrenos adecuados debería tenerse también en cuenta, al menos, en lo relativo a la complejidad de su adquisición, las características adecuadas para la construcción y los costos de bombeo que implicaría una solución u otra. En definitiva, tanto en los sistemas centralizados como en los descentralizados, la selección de las ubicaciones debería realizarse cuidadosamente, entendiendo la sostenibilidad de las PTAR, a la de todo el servicio de saneamiento y durante todo el ciclo de vida.

Una vez se han realizado los estudios necesarios, se ha elegido un terreno y la tecnología de tratamiento más adecuada, no deberían admitirse modificaciones, como ha sucedido a veces, puesto que un cambio de terreno suele tener tal repercusión que probablemente invalidaría todo el proyecto desarrollado sobre la base de la elección inicial.

2.2 PARTES INTERESADAS

En los países donde sea más factible ejercer la expropiación forzosa por interés general para la adquisición de los terrenos y de las servidumbres de paso necesarias, el análisis de alternativas de terrenos podría ser básicamente un estudio técnico llevado a cabo por técnicos en la materia y con la participación de las autoridades que han de realizar la expropiación. Sin embargo, incluso en estos casos, no se deberían ignorar los intereses locales que pueden derivar en problemas importantes para la ejecución de las obras.

En general, en la selección del terreno intervienen o estarían interesados varios grupos o agentes diferentes: la entidad promotora y financiadora de la actuación, la administración local, los prestadores del futuro servicio, un grupo de expertos, los ciudadanos en general (como usuarios de las instalaciones que se van a construir), los propietarios de los terrenos (con sus propios intereses que pueden afectar a la facilidad en la adquisición de los terrenos y a su costo) y los vecinos de los terrenos (que se podrán ver afectados por las futuras instalaciones). Además, las autoridades ambientales serían también una parte interesada de manera indirecta, a través de las exigencias de cumplimiento de las normas de vertido y de, en su caso, la protección ambiental que puedan tener los terrenos.

En un proceso de selección que se desarrollara a lo largo de los estudios del proyecto, en la primera fase se realizaría una preselección de terrenos candidatos, en la que intervendría principalmente la administración local y los expertos, aunque una vez preseleccionados debería contarse también con los propietarios. El desarrollo del procedimiento para la toma de decisiones, según unos objetivos y criterios, será realizado por los expertos y, finalmente, en el establecimiento de las ponderaciones de los criterios para la evaluación debería tomarse en consideración a todas las partes interesadas.

Cuando un terreno se selecciona previamente al inicio del proyecto, muchas veces solo intervienen los responsables locales, lo que posteriormente puede generar muchos conflictos con las demás partes interesadas. Sería adecuado que las entidades financiadoras, si solicitan un terreno previo al proyecto para asegurar la viabilidad de la operación, aseguren la participación de un técnico especialista que guíe el proceso y asegure una adecuada selección. En caso contrario, las autoridades locales pueden tender a aportar el peor terreno disponible.

3 REPERCUSIONES DE LA ELECCIÓN DEL TERRENO

Existe toda una variedad de aspectos por los que el terreno donde se asiente una planta de tratamiento puede influir en su construcción y operación. Estos aspectos deberían ser analizados cuidadosamente en cada caso en el estudio de selección, identificando y valorando adecuadamente los más determinantes.

Los tipos de incidencia que se pueden generar debido a las características de los terrenos son variados, pudiéndose agrupar de la siguiente forma:

- Limitaciones para algún tipo de tratamiento, como puede ser la superficie disponible o la pendiente del terreno, cuando esta es muy pronunciada.
- Condicionantes sobre los costos de implantación, como el costo del terreno, las características geotécnicas y topográficas, el nivel freático, la lejanía a la población o las vías de acceso y la conexión a los servicios de electricidad y agua potable.
- Condicionantes sobre los costos de operación, como las diferencias de altitud entre la red de saneamiento y el terreno o, nuevamente, la pendiente del terreno y la superficie disponible si impiden los tratamientos extensivos de bajo costo.
- Factores que condicionan la magnitud de los impactos que pueda generar la instalación, como la cercanía a la población, la sensibilidad del cuerpo receptor o las figuras de protección ambiental del terreno y su entorno.

A continuación se revisan los factores que más habitualmente van a influir en la selección de los terrenos. Nótese que muchos de estos factores serán los que, una vez seleccionado el terreno, condicionarán también la selección de la tecnología de tratamiento, como se puede ver en guía de *Selección de tecnologías de tratamiento* de esta serie (CEDEX, 2022).

Cuando se realice el proceso de selección en cada caso, se deberá prestar especial atención a los aspectos que sean sustancialmente diferentes entre las distintas alternativas y tengan relevancia en la selección del terreno. Las variables que no determinen repercusiones diferenciadas no aportarán información al proceso de selección y podrán obviarse.

3.1 SUPERFICIE DISPONIBLE

La superficie es un factor crítico para la selección de las posibles tecnologías a implantar. Los tratamientos extensivos o naturales ocupan mucha más superficie que los intensivos, pero son más simples de operar y baratos de mantener. Si, además, las normas locales exigen la reducción de microorganismos patógenos, las necesidades de superficie se incrementan aún más en el caso de que se pretenda realizar por sistemas de bajo costo.

El terreno seleccionado debería tener una superficie suficiente para no limitar las posibles soluciones de tratamiento y poder albergar la PTAR del año horizonte; incluso, idealmente, debería ser suficiente para las ampliaciones futuras.

Hay entidades financieras que exigen como condición previa disponer de un terreno de una superficie determinada (2 ha, por ejemplo), sin tener en cuenta la población servida ni el tipo de terreno. Lo aconsejable, si se actúa así, sería establecer una superficie mínima en función del número de habitantes, del tipo de tratamiento que se quiera implantar y de las condiciones climáticas.

En ocasiones puede haber disponibilidad de terreno, pero, debido a su alto precio, el costo podría limitar la superficie de la que se podría disponer. En este caso realmente el factor limitante sería el costo de implantación (CEDEX, 2022).

3.1.1 Requerimientos de superficie por tecnología de tratamiento

Dependiendo de la tipología del tratamiento que se pretenda implantar, los requerimientos de superficie pueden ser muy diferentes. Los tratamientos extensivos son aquellos que replican los procesos naturales para realizar el tratamiento de las aguas residuales. Este tipo de tratamientos es el más empleado en pequeñas poblaciones, por sus bajos costos y facilidad de operación y mantenimiento, pero requieren de una gran superficie relativamente llana para su construcción. Entre los tratamientos extensivos se encuentran las lagunas de estabilización (anaerobias, facultativas y de maduración), los humedales artificiales, de flujo superficial o subsuperficial y los filtros de arena.

Por otro lado, los tratamientos intensivos requieren mucha menor superficie, pero se desarrollan en instalaciones más complejas, necesarias bien para suministrar el oxígeno necesario para los procesos aerobios, bien para crear las condiciones anaerobias necesarias para llevar a cabo esos procesos. Algunos ejemplos de sistemas intensivos son los filtros percoladores, los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA) o los procesos de lodos activados. Sin embargo, estos sistemas tienen unos costos de operación y mantenimiento superiores a los extensivos y mayor complejidad de operación.

Existen diversas guías donde se analiza la cuestión de los requerimientos de superficie de los distintos tipos de tratamientos. Algunas de ellas han sido desarrolladas también por el CEDEX en colaboración con otras instituciones, como son; el *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones* (CEDEX & CENTA, 2010) de aplicación en España; las *Recomendaciones para la selección de tratamientos de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador* (CEDEX and CENTA, 2016) y la *Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales* de Bolivia (CENTA & CEDEX, 2021). Asimismo, este tema se aborda también en la guía de *Selección de tecnologías de tratamiento* (CEDEX, 2022), de esta misma serie de recomendaciones.

En el manual de pequeñas poblaciones de España se puede encontrar una clasificación de los requerimientos de superficie por tecnología para las condiciones climatológicas promedio en este país. En la Tabla I se puede ver esta clasificación, que plantea su división en cinco grupos, desde tecnologías con requerimientos muy bajos ($<1 \text{ m}^2/\text{h-e}$) como la aireación prolongada, hasta tecnologías con requerimientos muy altos ($>7 \text{ m}^2/\text{h-e}$) como los sistemas de lagunaje. Para su realización se ha tomado de referencia una planta de 1 000 habitantes equivalentes e incluye tanto la superficie necesaria para los procesos como la necesaria para las infraestructuras auxiliares.

Tabla I. Requerimientos de superficie de los distintos tipos de tecnologías en España

Requerimiento de superficie	Tecnología
Muy bajo ($< 1 \text{ m}^2/\text{h-e}$)	Aireación prolongada Filtros percoladores Contactor biológico rotativo Reactor de biopelícula sobre lecho móvil Reactor secuencial
Bajo ($1-3 \text{ m}^2/\text{h-e}$)	Filtro intermitente de arena
Medio ($3-5 \text{ m}^2/\text{h-e}$)	Filtro intermitente de arena Filtro de turba modificado Humedal de flujo subsuperficial vertical
Alto ($5-7 \text{ m}^2/\text{h-e}$)	Infiltración-Percolación
Muy alto ($>7 \text{ m}^2/\text{h-e}$)	Lagunaje Humedal de flujo subsuperficial horizontal

En la *Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales* de Bolivia también se realizó una estimación de la superficie necesaria para algunas líneas de tratamiento en diferentes pisos ecológicos y para distintos tamaños de población. Para obtener las curvas de superficie se realizó un dimensionamiento básico de los procesos, para diferentes tamaños de población y bajo unas hipótesis normales de funcionamiento. Teniendo en cuenta los sistemas más habituales en Bolivia y para la zona de Los Llanos, con un clima tropical, se obtuvo la estimación de las superficies que se reflejan en la Tabla 2. Estos resultados difieren sustancialmente de los anteriores de España debido a las diferentes temperaturas y a que en esta zona de Bolivia la carga contaminante por habitante se encuentra entre los 30 y los 50 g DBO₅/hab./d, mientras que la carga del habitante equivalente (h-e) en Europa es de 60 g DBO₅/hab./d.

Tabla 2. Estimación de la superficie necesaria (m²/hab.) para algunas líneas de tratamiento en Los Llanos, Bolivia

	Habitantes					
	1 000	2 000	5 000	10 000	25 000	50 000
Lagunaje	1,86	1,76	1,55	1,51	1,62	1,69
Humedal horizontal	1,6	1,84	1,82			
Humedal vertical	1,04	1,07	1,01			
Filtro percolador	0,67	0,55	0,43	0,47	0,33	0,35
Aeración extendida	0,73	0,61	0,48	0,47	0,29	0,30

Aunque todas estas estimaciones están referidas a unas condiciones concretas y no puede extrapolarse a otras regiones, evidencian una serie de tendencias generales en cuanto a los requerimientos de superficie. Se puede ver claramente cómo las tecnologías extensivas ocupan una superficie mucho mayor que las intensivas, por encima de las cinco veces superior, independientemente del clima y de la tipología de población.

Además, en los procesos intensivos como los filtros percoladores y lodos activados, se aprecia claramente un efecto de escala en la superficie necesaria respecto al tamaño de la población, es decir, los requerimientos de superficie por habitante son menores para las poblaciones grandes. Esto es debido a que, según aumenta el tamaño de las cubas y reactores de proceso, la superficie relativa ocupada por elementos auxiliares, como espacios libres, almacenes o viales, se hace menor. En el caso de los sistemas extensivos, sin embargo, debido a la gran superficie ocupada de los elementos de proceso respecto a las instalaciones auxiliares, este efecto de escala no es tan pronunciado.

En general, las curvas de superficie per cápita suelen reflejar algún salto en determinados rangos de población, lo que viene generado por el incremento del número de líneas de tratamiento que es necesario adoptar según va aumentando el tamaño de la instalación. Este desdoblamiento de líneas conlleva un aumento de la superficie total, pero, en cualquier caso, las diferencias son pequeñas y, si no se ha decidido todavía el número de líneas, se puede optar por un valor intermedio.

En los casos en los que se debe seleccionar el terreno en las primeras etapas del ciclo de proyecto y no se cuenta con la información detallada para estimar adecuadamente la superficie se puede hacer

una primera aproximación a partir de datos de población actual y crecimiento previsible, temperatura ambiente media del mes más frío y dotaciones. Existen también publicaciones donde se incluyen curvas que pueden ayudar en este análisis, como por ejemplo la que se muestra en el Box I.

Box I. Estimación de superficie requerida para lagunaje en Bolivia

Las *Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia* (Wagner, 2010) realiza una estimación de la superficie mínima requerida por habitante en función de las cargas y caudales unitarios, así como de la temperatura del mes más frío.

La Figura 2 muestra este cálculo para un sistema de lagunaje formado por laguna anaerobia, facultativa y de maduración. Como puede observarse, el área neta necesaria estaría entre 1-3 m²/hab. en función de la carga contaminante y el caudal.

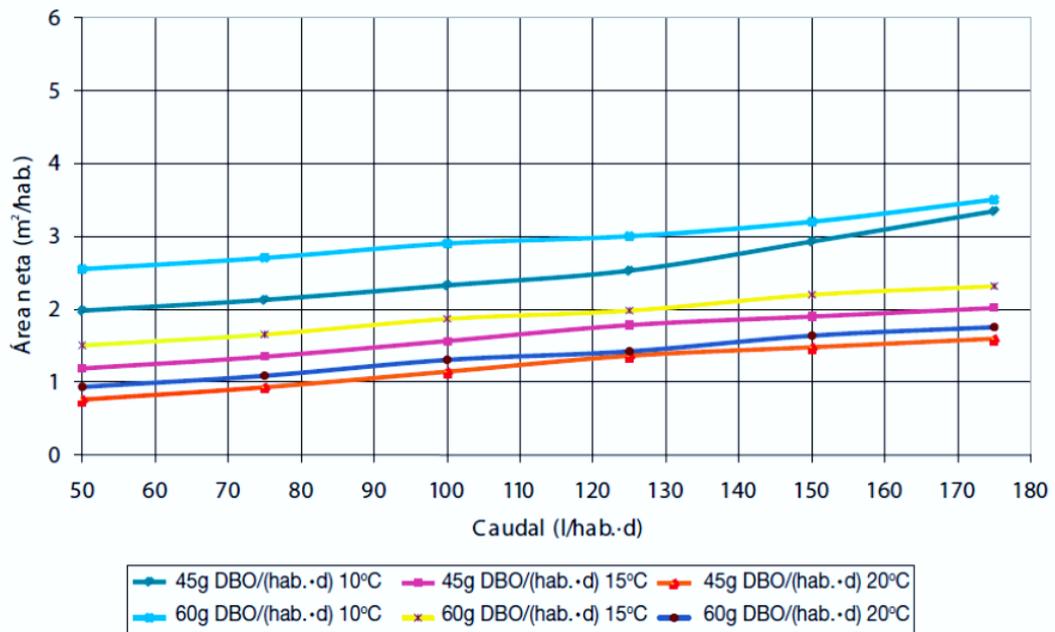


Figura 2. Área neta (m²/hab.) para una planta con lagunas anaerobias, facultativas y de maduración. Fuente: Wagner (2010).

En el caso de no incluir lagunas anaerobias en cabecera, es decir una línea compuesta solamente por lagunas facultativas primarias seguidas de lagunas de maduración, estas superficies se incrementarían sustancialmente, y la superficie requerida podría llegar hasta los 5 m²/hab., como puede verse en la siguiente figura.

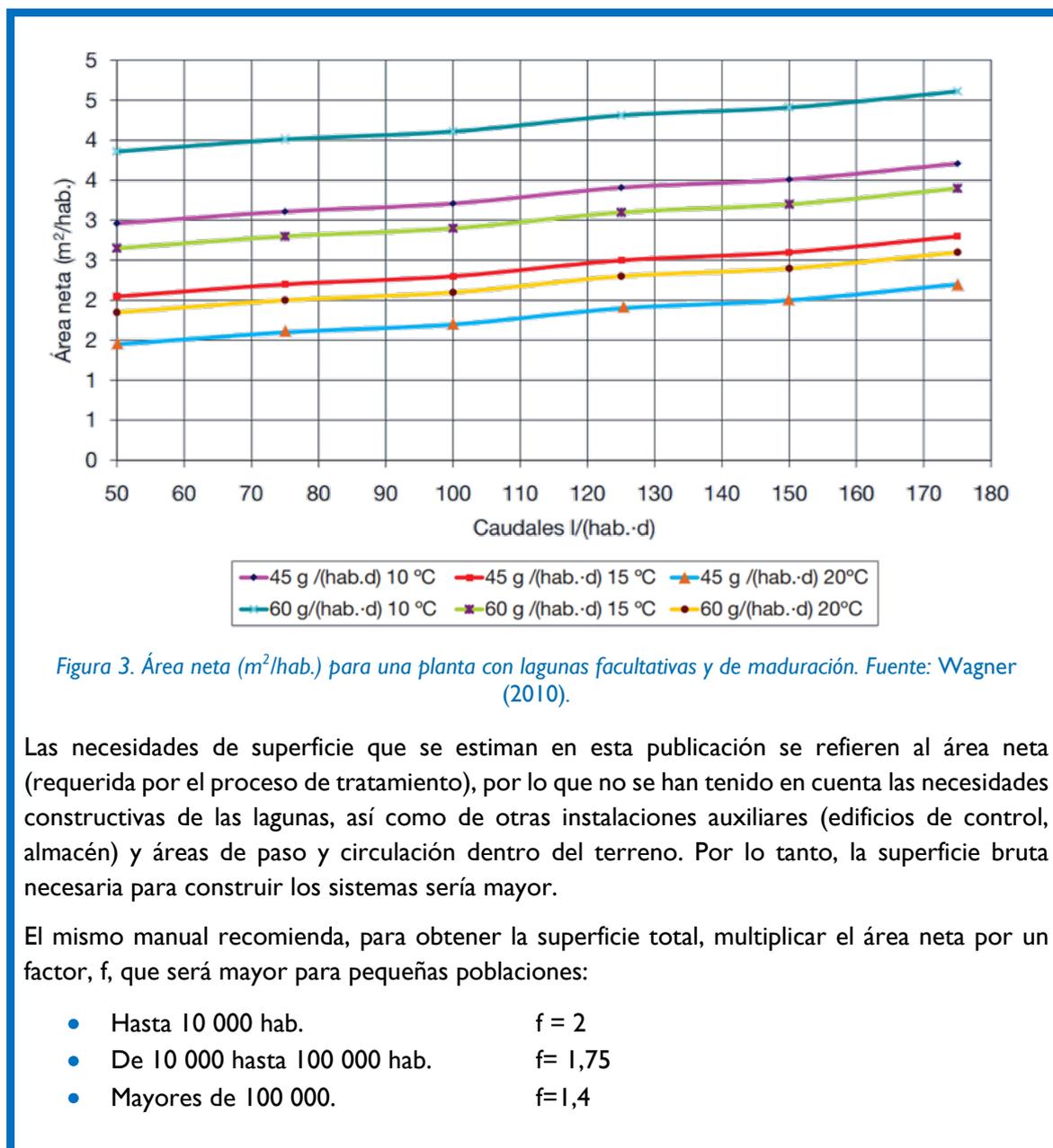


Figura 3. Área neta (m²/hab.) para una planta con lagunas facultativas y de maduración. Fuente: Wagner (2010).

Las necesidades de superficie que se estiman en esta publicación se refieren al área neta (requerida por el proceso de tratamiento), por lo que no se han tenido en cuenta las necesidades constructivas de las lagunas, así como de otras instalaciones auxiliares (edificios de control, almacén) y áreas de paso y circulación dentro del terreno. Por lo tanto, la superficie bruta necesaria para construir los sistemas sería mayor.

El mismo manual recomienda, para obtener la superficie total, multiplicar el área neta por un factor, f, que será mayor para pequeñas poblaciones:

- Hasta 10 000 hab. f = 2
- De 10 000 hasta 100 000 hab. f = 1,75
- Mayores de 100 000. f = 1,4

Teniendo en cuenta todo lo anterior, como orden de magnitud en esta etapa se pueden manejar cifras por encima de los 3 m²/hab. si se quiere contar con sistemas extensivos, que son los más baratos y sencillos de operar y mantener. Si por las características de la población, su grado de desarrollo, la escasez de terrenos llanos u otros condicionantes se considerara más adecuado optar por sistemas intensivos, los requerimientos de superficie serían menores, siendo suficiente considerar del orden de 1 m²/hab. e incluso algo menos en las poblaciones mayores.

En la estimación de la superficie que demandan los procesos de tratamiento no se debe olvidar la superficie requerida para el tratamiento de lodos que, en ocasiones y especialmente si se emplean lechos de secado o secado solar, puede suponer también un requerimiento importante. Un caso singular se da cuando se pretende realizar un compostaje de los lodos, en cuyo caso las necesidades de superficie para almacenaje del lodo y residuos vegetales y para preparación del compost pueden ser tan elevadas como las de la PTAR propiamente dicha.

3.1.2 Superficie requerida para instalaciones auxiliares

Una planta de tratamiento, además de los tratamientos del agua residual y del lodo necesita una serie de instalaciones auxiliares para su correcto funcionamiento, como pueden ser los viales internos de la planta, el edificio de control o el almacén. Estas instalaciones también deben tener unas dimensiones mínimas a las que hay que prestar atención y que pueden aumentar la superficie requerida.

Los viales deben tener una anchura suficiente para permitir el acceso de camiones a todos los elementos de la planta y, además se deben prever espacios para permitir su maniobrabilidad. Por pequeña que sea la instalación no deberían tener una anchura menor de 4 metros, mientras que en instalaciones más grandes lo ideal sería que la anchura fuese, al menos, de 5 metros. Deben tener espacio suficiente para que no tengan que abandonar la planta marcha atrás y para realizar las labores de conservación y mantenimiento necesarias. Si se considera que los vehículos se pueden cruzar dentro de la planta, sería necesaria una anchura mínima de 7 metros (3,5 metros por carril). Además, se considera adecuado que existan aceras entre los carriles y los procesos, que deberían tener una anchura mínima de 1 metro como norma general. Del mismo modo, debe contarse con zonas de aparcamiento adecuadas, dependiendo del número máximo de trabajadores y visitas que sea razonable estimar.

También sería necesario un edificio de control con espacio suficiente para labores técnicas y administrativas, almacenar las muestras, zonas de reuniones, etc., que en grandes instalaciones incluiría también un laboratorio de calidad. Además, en todos los casos, se necesitaría un almacén para guardar herramientas y los recambios de los equipos, al menos los que se consideren críticos. Por ejemplo, en el caso de que sean necesarios bombeos, suele disponerse de una bomba de reserva para instalar rápidamente en caso de avería de la que esté en funcionamiento. En instalaciones grandes se puede contar incluso con un pequeño taller para realizar reparaciones sencillas.

Finalmente, el propio encaje de los distintos elementos que conforman la planta de tratamiento en el terreno hace que queden espacios libres que no tienen ningún uso que debería ajardinarse, siempre que no condicionen el acceso a las distintas instalaciones ni el funcionamiento de la planta.

El porcentaje relativo de superficie que ocuparían estas instalaciones auxiliares es mayor en instalaciones pequeñas y en tratamientos intensivos. Como primera estimación, la superficie que ocuparían estos procesos auxiliares en tratamientos intensivos, varía entre el 75% del total para instalaciones de 1 000 habitantes y el 50% para instalaciones de 50 000 habitantes.

3.1.3 Superficie requerida para infiltración del efluente

En el caso de que no exista un cauce receptor cercano y se plantee la infiltración del vertido en el terreno, habría que añadir la superficie necesaria para ello que, para poder realizarla de manera adecuada, puede ser muy extensa.

La superficie requerida va a depender de la capacidad de infiltración del terreno y ha de diseñarse un sistema de infiltración adecuado, que consistirá en la instalación de balsas y tuberías de distribución o aspersores para asegurar un reparto uniforme en el área de infiltración y el empleo de terrenos alternativos según se vayan saturando.

La carga hidráulica que puede ser aplicada en sistemas de infiltración rápida es muy variable, entre 6 y 100 m/año, dependiendo tanto de las características del suelo y de las del agua a infiltrar como de la climatología del entorno de las instalaciones.

La superficie necesaria depende del caudal de infiltración, el número de días en que estará operativo y un factor de aplicación que depende del tipo de terreno. Este último aspecto es el más difícil de

determinar, ya que depende de la permeabilidad de los estratos en los que se pretenda infiltrar. Como una primera aproximación, se puede tomar como valor del factor de infiltración entre 4-10% de la conductividad hidráulica del terreno (IGME, 2003). Si hay un estrato impermeable a poca profundidad, puede ser más económico eliminarlo que aumentar la superficie de infiltración.

Se debe tener en cuenta que el ciclo operativo de la infiltración debe alternar periodos de aplicación del agua residual y de periodos de secado. Estos ciclos se establecen para permitir la aireación del suelo entre periodos de aplicación, maximizando así la infiltración, y para proporcionar el tiempo necesario para la descomposición de la materia orgánica acumulada y el desarrollo de transformaciones biológicas como la eliminación del nitrógeno mediante nitrificación (IGME, 2003).

3.2 CONDICIONANTES DE LA UBICACIÓN

El terreno seleccionado debe cumplir una serie de condiciones, tanto en relación con su ubicación respecto a la población a la que va a dar servicio como respecto al punto de vertido. Algunas de estas condiciones están relacionadas con la altitud, la distancia a la población y al vertido, los condicionantes de trazado del emisario y otros aspectos relacionados con el cumplimiento de normativas urbanísticas o locales.

3.2.1 Altitud relativa

En lo que se refiere a la altitud del terreno, la situación ideal sería que se situara a una cota intermedia entre la población y el punto de vertido, con una diferencia de cotas adecuada para que las aguas puedan discurrir entre estos tres puntos y dentro de las instalaciones de la PTAR por gravedad. Si no se pueden encontrar terrenos que cumplan con esta condición será necesario incluir bombes para conducir las aguas.

En el caso de que sea necesario impulsar las aguas para llegar a la PTAR, el bombeo suele realizarse en el propio núcleo de población, por lo que su conexión a la red eléctrica es sencilla. Sin embargo, las conducciones de impulsión de gran longitud pueden generar problemas importantes debido a que el agua residual tendrá un tiempo de retención elevado en condiciones sépticas, lo que favorece la generación de sulfuro de hidrógeno y otros compuestos que son tóxicos, corrosivos y malolientes. Por tanto, un factor a considerar sería no solo la diferencia de cotas entre la población y el terreno, sino también la longitud de las impulsiones necesarias para llegar hasta la planta. En el caso de existir dos alternativas ubicadas a una distancia similar y a las que haya que bombear las aguas con consumos energéticos similares, será más ventajosa aquella donde se pueda realizar una impulsión corta y que después el agua discurra por gravedad que aquella donde el agua tenga que llegar directamente impulsada hasta la PTAR.

En otros casos, va a ser necesario realizar la elevación a la llegada o en el interior de la PTAR, lo que requiere de una conexión eléctrica, que puede suponer un sobrecoste importante en pequeñas poblaciones si los terrenos están alejados de la población.

En general, para que las aguas puedan llegar por gravedad, el colector debe tener una pendiente media mínima. Aunque no existe un valor estandarizado, en la Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano (CEDEX, 2009) se recomiendan valores entre el 0,2 y el 0,5% dependiendo del diámetro de la tubería y el tipo de apoyo. En cualquier caso, deberá realizarse un estudio hidráulico en el que se compruebe que es posible la llegada del agua residual a la planta y que cumpla unos requisitos de velocidad mínima para asegurar la autolimpieza de los colectores.

Por otro lado, para minimizar el volumen del movimiento de tierras, el trazado en alzado debería adaptarse a la topografía del terreno existente, por lo que, a pesar de que exista una diferencia de

cota aparentemente adecuada entre el inicio y final del emisario, no en todos los casos se van a poder evitar los bombeos, por lo que para asegurar esta condición siempre se deberá realizar primero una aproximación al trazado del posible emisario.

3.2.2 Distancia a la población y a actividades sensibles

Una planta de tratamiento ubicada demasiado cerca de la población o de actividades sensibles puede generar malestar social debido a los malos olores o al impacto visual que produce la planta. Un caso donde este factor puede resultar especialmente importante será en zonas turísticas o densamente pobladas. Por los mismos motivos, debe evitarse el emplazamiento de la planta en zonas cercanas a lugares de esparcimiento y ocio, centros comerciales, aeropuertos, hospitales, centros educativos o instalaciones deportivas, aunque estén alejados del núcleo de población.

Por otro lado, un emplazamiento demasiado alejado de la población conlleva mayores costos para la conducir el agua a la planta y, en ocasiones, por la necesidad de construir caminos de acceso, aspecto que se desarrollará en un apartado posterior. En este sentido, Shahmoradi & Isalou (2013) proponen como distancia óptima entre la planta y la población un rango entre los 550 y los 5 000 m, aunque se basan en el estudio de un caso concreto. En áreas más densamente pobladas y con varios núcleos de población, donde sea difícil encontrar terrenos que cumplan con estas distancias, proponen un rango entre 150 y 1 500 m.



Figura 4. Planta de tratamiento de Mendigorri (Navarra, España)

Por otro lado, la legislación medioambiental o la regulación del uso del suelo puede imponer unas distancias mínimas entre las instalaciones y las poblaciones. Este es el caso de España, donde existe una regulación básica que se aplicaría en ausencia de regulación específica por las comunidades autónomas, el Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas, donde se establece, como norma general, que las actividades que puedan considerarse como insalubres o nocivas deben estar ubicadas a una distancia superior a 2 000 m del núcleo de población agrupado (BOE, 1961). En Latinoamérica hay diversas normas que regulan la distancia de las instalaciones de tratamiento, aunque en algunas ocasiones no resultan demasiado exigentes.

Box 2. Distancia de las plantas de tratamiento a la población en El Salvador

El Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.05.01:18, que regula la descarga de aguas residuales y el manejo de lodos, dedica el apartado 5.1. a la Ubicación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, donde se establecen unos requisitos mínimos y entre ellos “la distancia de retiro”.

Se define **distancia mínima de retiro** como la distancia medida en línea recta, desde el lindero del terreno del sistema de tratamiento de aguas residuales hasta las viviendas, zonas recreativas, espacios de uso público, zonas de protección u otro sitio de interés.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben respetar una distancia mínima de retiro acorde a la tabla siguiente.

Tabla 3. Distancias mínimas a linderos de la propiedad para sistemas de tratamiento de aguas residuales en El Salvador. Fuente: RTS 13.05.01:18 (2018).

Tipo de sistema de tratamiento	Distancia de retiro mínima (m)
Lagunaje convencional, sistemas de tratamiento anaerobios con unidades abiertas y sin captura de gases.	50
Tratamiento aerobio que incluyan unidades de pretratamiento manuales, unidades de tratamiento descubiertas como sedimentadores, lagunas aireadas, lagunas facultativas, filtros percoladores y similares.	30
Reactores biológicos anaeróbicos cerrados, con captura de gases y unidades de tratamiento de lodos bien manejados, que generen impactos sonoros, olfativos y visuales de leves a moderados.	30
Lodos activados en sus diferentes modalidades (convencional, aireación extendida, reactores de lecho móvil), con unidades de pretratamiento manuales y cárcamo de bombeo	25
Lodos activados en sus diferentes modalidades (convencional, aireación extendida, reactores de lecho móvil), con unidades de pretratamiento mecanizados, con medidas de mitigación y sistema de operación y supervisión que generen leves impactos sonoros, olfativos y visuales	20
Unidades mecanizadas de flotación forzada, floculación, tanques de homogenización que generen leves impactos sonoros, olfativos y visuales	10

De forma excepcional, durante el proceso de evaluación ambiental, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) podrá autorizar una distancia menor a la establecida en la tabla, con base al tamaño del proyecto, tipo de tecnología, ubicación y condiciones del entorno.

Además, se exige que todos los sistemas de tratamiento cuenten con una **zona de amortiguamiento** mínima, consistente en una franja de **5 m** dentro del inmueble, entre el contorno de los linderos de éste y el área de desarrollo para la implantación del tratamiento y sus ampliaciones futuras.

Box 3. Distancia de las plantas de tratamiento a la población en Nicaragua

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para regular los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales y su Reúso (NTON 05 027-05, 2006), dedica su capítulo 6 a los criterios para la ubicación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, donde establece las distancias mínimas a cumplir.

Tabla 4. Distancias de separación con una PTAR en Nicaragua. Fuente: NTON 05 027-05 (2006).

Unidades de tratamiento	Pozos individuales de agua para consumo doméstico	Lindero de propiedad	Viviendas o zonas pobladas	Nivel freático
Tanque séptico	>20 m	>5 m	>5 m	>1,5 m
Tanque Imhoff	>15 m	>10 m	>100 m	>1,5 m
Pozo de absorción	>30 m	>3 m	>3 m	>3,0 m
Lagunas facultativas y aerobias	>200 m	>20 m	>300 m	>3,0 m
Lagunas anaerobias	>200 m	>20 m	>1 000 m	>3,0 m
Lodos activados	>100 m	>10 m	>50 m	>1,5 m
Reactor UASB	>100 m	>10 m	>50 m	>1,5 m
Filtro Anaerobio	>100 m	>10 m	>100 m	>1,5 m
Zanjas de Oxidación	>100 m	>10 m	>50 m	>1,5 m
Biofiltros (humedales)	>100 m	>5 m	>25 m	>3,0 m
Laguna con macrófitos	>200 m	>20 m	>100 m	>1,5 m
Laguna aerobia de Maduración	>200 m	>20 m	>200 m	>3,0 m
Infiltración al suelo en general	>200 m	>3 m		>3,0 m

Además, se establecen con carácter general las siguientes distancias mínimas para las PTAR:

- Con campos de pozos de abastecimiento de agua potable debe ser en un radio de 1 000 metros medidos desde el pozo más cercano.
- Con esteros (estuarios) debe ser de 100 m de la línea máxima de crecida.

Finalmente se indica que la distancia con un aeropuerto, aeródromo o una terminal aérea, debe ser establecida por el Ministerio de Transporte e Infraestructura, por lo que si una instalación se puede ubicar relativamente cerca de una instalación aérea, debería solicitarse autorización. Como referencia, las normas que regulan algunos sectores industriales en Nicaragua establecen una distancia mínima de 3 000 m entre las plantas de tratamiento y estas instalaciones.

El impacto que puede generarse sobre la población de cada una de las alternativas de terreno en estudio podría medirse mediante la evaluación del costo de inversión y mantenimiento que sería necesario realizar en cada caso para evitar ese impacto. Por ejemplo, la ubicación en terrenos muy cercanos a la población podría requerir cubrir y desodorizar el pretratamiento o incluso cubrir las lagunas anaerobias, mientras que esto no sería necesario en los más alejados.



Figura 5 Lagunas anaerobias cubiertas (Santa Cruz, Bolivia)

Expansión de la población

Además de considerar todo lo anterior y la clasificación actual de los terrenos en los que se pretende ubicar la PTAR, se debe tener en cuenta el posible desarrollo de la zona urbana a largo plazo, al menos en el horizonte de proyecto. Se deberían identificar las zonas donde con mayor probabilidad se va a producir el crecimiento de la población y tenerlo en cuenta para que la PTAR no condicione esa futura expansión. Cuando no se toma en cuenta la importancia de esta variable, la población puede crecer hacia la planta de tratamiento, reduciendo la distancia e, incluso, llegando a absorberla completamente dentro de la malla urbana.

Box 4. Crecimiento de la población en torno a la PTAR en Warnes (Bolivia)

El Distrito III del municipio de Warnes, municipio ubicado en el área metropolitana de Santa Cruz (Bolivia), es una zona de rápida expansión donde en la actualidad residen más de 80 000 personas y en el momento de redacción de esta guía se estaba estudiando la ampliación de la red de saneamiento y la construcción de una nueva PTAR.

En la imagen aérea de Google Earth fechada en marzo de 2003, se puede observar que en la zona existía solamente la planta de tratamiento y 700 metros al sur de esta comenzaba un entramado de calles que servirían de base para la futura expansión. El número de viviendas en el entorno en ese momento era despreciable. En la serie de imágenes históricas de esta aplicación se puede seguir claramente la expansión del entramado urbano y cómo la población ha ido rodeando la PTAR. En la última imagen disponible en la fecha de redacción de esta guía, de noviembre de 2022, la urbanización de las calles ya se ha completado y se han llegado a construir viviendas tan cercanas a la planta que sólo están separadas del terreno por un camino.



Figura 6. Imágenes de satélite en el entorno de la planta de Warnes (Bolivia) en 2003 y 2022.
Fuente: Google Earth

En zonas de mucho crecimiento, como sucede en las áreas metropolitanas, resultará prácticamente inevitable que la planta se ubique en una zona de expansión de la población, ya sea porque el municipio se encuentre saturado de población o porque los terrenos adecuados para la implantación de la PTAR sean también los preferidos por la población para su asentamiento (terrenos llanos y cercanos a un cauce receptor).

En cualquier caso, si el estudio estima que la población no se va a expandir hacia alguno de los terrenos preseleccionados, sería un aspecto muy positivo a la hora de valorarlo.

3.2.3 Alineación con los vientos dominantes

En relación con la distancia a la población, puede tener cierta relevancia la dirección predominante del viento, siendo preferibles las ubicaciones donde los vientos alejen los malos olores de la población y desaconsejándose aquellas donde suceda lo contrario.

La emanación de olores en una PTAR se puede provocar por diferentes circunstancias, algunas de las cuales son propias de la operación de las instalaciones, pero otras vendrán generadas desde el sistema de saneamiento. Entre las tecnologías de tratamiento, los procesos en condiciones anaeróbicas van a

generar más sustancias olorosas (tratamientos anaerobios y de lodos) que los procesos aeróbicos. En la red de saneamiento, las altas temperaturas, los tiempos de retención elevado y, sobre todo, las condiciones de trabajo en las condiciones en ausencia de aire (impulsiones y sifones) serán potenciadoras de la septicidad del agua y, por tanto, de la generación de sustancias olorosas y corrosivas. Estas sustancias se liberarán al llegar a la planta en el pretratamiento y primeras fases del tratamiento. Cuando sea previsible alguna de estas circunstancias, la selección del terreno deberá tomar en consideración especialmente los factores que pueden incrementar el impacto sobre la población.

La magnitud del impacto que puede generar una PTAR va a depender en general del tamaño de la PTAR, y de la población cercana que puede verse afectada. En instalaciones importantes de tratamiento se puede realizar un modelado para determinar la posible afección que se puede esperar debido a los olores.



Figura 7. Imágenes de los estudios de difusión de olores en la planta de tratamiento de La China, Madrid. Fuente: Del Río (2020).

3.2.4 Punto de vertido

A la hora de seleccionar el terreno debe tenerse en cuenta la existencia de un medio receptor cercano donde pueda descargar el efluente tratado de manera adecuada. También debe valorarse la distancia de la planta al punto de vertido, ya que mayores distancias conllevan mayores costos, si bien en muchas ocasiones son más importantes las propias características del punto de vertido.

No siempre es necesario que el cauce receptor sea una corriente permanente de agua, sino que basta con que tenga pendiente y capacidad hidráulica suficiente para conducir las aguas tratadas hasta una corriente de agua, siempre que sea técnica y legalmente posible su vertido a ese barranco. Sin embargo, en diferentes países este tipo de solución no se permite, por lo que la elección del terreno estará muy condicionada.

En la normativa de algunos países se imponen caudales mínimos del medio receptor en relación con el caudal vertido con objeto de asegurar que se produce una buena dilución en el medio. Así, por ejemplo, el Reglamento en materia de contaminación hídrica de Bolivia (MDSMA, 1995), impone que el caudal de descarga de aguas residuales deberá ser, como promedio diario, menor al 20% del caudal mínimo diario del río, con un período de retorno de 5 años. Excepcionalmente y previo estudio justificado, podrán ser autorizadas descargas que superen el 20%, pero en ningún caso se permitirán descargas puntuales superiores a un tercio del caudal circulante.

También se debe tener en cuenta que en muchos países existen diferencias en las exigencias del vertido dependiendo del medio receptor. Un caso extremo donde las características del medio receptor condicionan completamente el tratamiento es cuando la legislación impone límites de inmisión (sobre

las características del medio) en lugar de límites de emisión (sobre el vertido), como sucede por ejemplo en Bolivia, de tal forma que las características exigidas al vertido dependerán de la capacidad de dilución.



Figura 8 Vertido de la PTAR de Warnes (Santa Cruz, Bolivia)

Pero sin llegar a esta situación, en muchos países de Latinoamérica se imponen límites de vertido diferentes dependiendo del medio receptor. Un caso típico sería las limitaciones que de forma específica se imponen a los nutrientes (nitrógeno y fósforo) cuando los vertidos pueden afectar a los cuerpos de agua lénticos, con poca renovación, para evitar la eutrofización de las aguas. En esta situación, si se pueda optar por terrenos donde los vertidos no afecten a lagos o embalses, el tratamiento necesario podrá ser menor que si se afecta a este tipo de masas de agua.

En los casos donde no existe un cuerpo receptor cercano, a veces se propone como solución la infiltración en el terreno de la descarga. La infiltración, sin embargo, no está permitida en todos los países y requiere de unos terrenos que presenten buenas características de infiltración y de las aguas subterráneas se encuentren a una profundidad suficiente. Además, su diseño adecuado requiere de estudios exhaustivos y prolongados para poder determinar la capacidad real de infiltración en condiciones operativas y de una gran superficie para poder alternar y mantener los terrenos donde se realiza la infiltración. La superficie requerida como terrenos de infiltración, de tal forma que se permita su alternancia para una operación adecuada y su sostenibilidad en el tiempo puede llegar tan grande como el resto de la PTAR o incluso mucho mayor si se trata de sistemas de tratamiento intensivos. Con frecuencia todo esto no se realiza de manera adecuada y la experiencia ha demostrado que con frecuencia estas soluciones no dan buen resultado, generando en poco tiempo en la colmatación de los terrenos de infiltración (siempre muy escasos y generalmente sin funcionamiento alterno), que se convierten en lagunas con vertidos superficiales a partir de las mismas, fuera de cauce y sin control. Por ello, en principio, las opciones que no cuenten con un cauce receptor cercano para recibir los vertidos serían mucho menos recomendables.



Figura 9. Área de infiltración de la PTAR de Konani (Bolivia). En construcción (izquierda) y saturada tras varios años de funcionamiento (derecha)

En el caso de poder optar por diferentes cuerpos receptores, que imponen exigencias distintas al vertido, este aspecto será un factor determinante en la selección del terreno, puesto que condicionará completamente el tipo de tratamiento a implantar y, con ello, los costos de construcción y de operación.

Pero, incluso aunque la normativa no imponga requisitos diferentes al vertido, de de evaluarse los posibles efectos de la descarga, pues las aguas residuales, aun estando tratadas emiten cargas contaminantes que pueden generar problemas. Además, siempre se van a presentar situaciones en las que el funcionamiento no será adecuado por problemas sobrevenidos o por errores en la operación y mantenimiento. Por todo ello, debería considerarse como un factor la sensibilidad del medio receptor aguas abajo del vertido, que vendrá condicionada por la capacidad de dilución y las condiciones del medio (interés ecológico y usos aguas abajo).

Por ejemplo, si alguna de las posibles descargas pudiera afectar a una zona de captación de aguas de abastecimiento, se consideraría una ubicación con mayor riesgo para el vertido. Asimismo, si es posible, se debe evitar el vertido a lagos, lagunas naturales y otros entornos semejantes que sean, por su naturaleza ambientes eutróficos o potencialmente eutróficos. Una PTAR que cumpla la norma de eliminación de nutrientes puede verter con una concentración de nitratos de 15 mg/L, pero esto podría seguir siendo una presión importante. Para entender el orden de magnitud, si se tratara de una población de 50 000 habitantes y con una dotación de 150 L/hab./día (con un 80% de coeficiente de retorno) estaría vertiendo al medio receptor 90 kg de nitrógeno al día.

En algunas ocasiones se produce un rechazo de la población local a la ubicación del punto de descarga en determinados cursos por entender que puede afectar a sus intereses. También es común que este rechazo se produzca en las poblaciones ubicadas en cursos que puedan ser afectados por el vertido. Estas circunstancias, si se producen, se deben valorar dentro de la afección social del proyecto.

Box 5. Condicionantes de vertido en el Lago Atitlán (Guatemala)

El lago de Atitlán, uno de los lagos más grandes de Guatemala, se ubica en zona volcánica a más de 1.500 metros de altura y presenta un gran interés turístico y diversidad biológica.

El lago no tiene salida natural y en su cuenca viven más de 250 000 personas que, con tratamiento o sin él, vierten sus aguas residuales al lago de forma directa o indirecta, lo que está generando importantes problemas de eutrofización, ya que los contaminantes no pueden diluirse. Pero,

además, el problema se agrava porque alrededor de 100 000 personas consumen el agua de la cuenca sin potabilización.



Figura 10. Lago Atitlán, Guatemala

Para tratar de paliar esta situación, en 2007 se publicó el “Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago de Atitlán 2007-2011” y en 2010 el Acuerdo Gubernativo n° 51-2010 por el que se aprueba el Reglamento de vertidos para cuerpos receptores de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (MARN, 2010). Este reglamento establece límites de vertido mucho más estrictos que la norma general de Guatemala (Gobierno de Guatemala, 2006).

Así, en la norma específica se establecen una serie de límites de emisión en función del tipo de cuerpo receptor que son más exigentes que los límites establecidos en la norma general, diferenciando entre:

- (1) Ríos, riachuelos, quebradas y zanjones
- (2) Lagos
- (3) Descarga en el subsuelo
- (4) Sistemas de alcantarillado público.

En la Tabla 5 se muestran los límites de emisión para los parámetros más relevantes en la cuenca.

Tabla 5. Límites de contaminación de los vertidos en la cuenca del lago de Atitlán y establecidos por la legislación general para 2024

Tipo de emisor	Unidades	Límites en la cuenca del Atitlán				Norma general
		1	2	3	4	
DBO ₅	mg/L	50	30	50	100	100
DQO	mg/L	100	60	100	200	200
SS	mg/L	60	40	60	125	100
NT	mg/L	1	1	5	10	20
PT	mg/L	1	1	10	2	10
Coliformes	NMP	400	400	10 000	10 000	10 000

Por otro lado, para la elaboración del segundo Plan Maestro se realizaron diversos estudios técnicos y científicos como el de la Universidad de California de “Manejo integrado de aguas residuales dentro y fuera de la cuenca del Lago Atitlán” (Oakley, 2021), en el que, para solucionar los problemas de contaminación por vertido de las aguas residuales propone 3 alternativas:

- Tratamiento de aguas residuales con remoción de patógenos y nutrientes dentro de la cuenca con descarga de efluentes al agua superficial.
- Tratamiento de aguas residuales con remoción de patógenos dentro de la cuenca con reúso en agricultura sin descargas al lago (se descartó por ser técnicamente inviable).
- Colección y trasvase de las aguas residuales crudas fuera de la cuenca, a través de tuberías de presión baja, con generación de energía eléctrica, tratamiento en lagunas de estabilización y reúso en agricultura.

Se realizó un estudio económico de ambas opciones, llegándose a la conclusión de que el tratamiento intensivo en la cuenca con eliminación de patógenos y nutrientes era un proceso con un costo superior a la recolección y trasvase de las aguas fuera de la cuenca. Además, en aquel momento no existían en Guatemala técnicos con experiencia en la construcción y operación de PTAR con eliminación de nutrientes y de patógenos. Por todo ello, se propuso la colección y trasvase de las aguas residuales fuera de la cuenca, donde se les podía aplicar un tratamiento menos riguroso en una PTAR con un sistema bien conocido como son las lagunas de estabilización. Sin embargo, este estudio adolecía del planteamiento de alternativas intermedias, donde las aguas de algunas poblaciones se pudieran tratar dentro de la cuenca y derivar fuera solo aquellas donde la intervención resultara más sencilla.

3.2.5 Exposición a la luz solar

En los sistemas extensivos, que simulan los procesos naturales, es necesaria la presencia de luz del Sol para su correcto funcionamiento. Aunque este factor no suele ser diferenciador, en el caso de pequeñas instalaciones con sistemas extensivos, se ha observado que el tratamiento funciona mejor si la planta está ubicada en las zonas de solana o en zonas llanas donde no se producen sombras, por lo que puede ser un factor evitar las zonas de umbría (Carreño Morales et al., 2013).

En el caso de las plantas ubicadas sobre laderas en latitudes medias, para maximizar el tiempo de exposición a los rayos solares y que el ángulo de incidencia de estos sea lo más perpendicular posible, se deben ubicar orientadas hacia el sur, si la planta se encuentra en el hemisferio norte, y hacia el norte, si la planta se encuentra en el hemisferio sur. En el caso de zonas cercanas al ecuador, este parámetro es menos relevante (Grossi Gallegos & Righini, 2012).

3.3 REPERCUSIONES SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR

Tanto las características del terreno como los riesgos a los que se pueda ver sometido pueden condicionar sobremanera el costo de construcción y de operación, siendo esta incidencia diferente según el tipo de tecnología (CEDEX, 2022). En este sentido, es necesario conocer la topografía del terreno y sus características geotécnicas, la capacidad portante, la profundidad del nivel freático y los riesgos debidos a posibles inundaciones o alteraciones de la planta por terremotos y dinámica fluvial.

3.3.1 Topografía del terreno

En general, se prefieren terrenos con ligeras pendientes que permitan que el agua discorra por gravedad entre los sucesivos elementos de tratamiento sin necesidad de incluir bombeos y en las que

el flujo de agua sea gradual, sin velocidades excesivas. La pendiente ideal recomendada sería, aproximadamente, del 2%.

Pendientes cercanas al 0% pueden presentar problemas por la necesidad de elevar las primeras etapas de tratamiento con el consiguiente bombeo en cabecera y por evacuación de las aguas de lluvia, por lo que en estos casos es especialmente importante realizar un estudio detallado donde se compruebe que no se forman grandes charcos ni existen zonas en las que se acumula el agua de lluvia.

Una pendiente excesiva puede condicionar la tecnología a implantar por los costos de construcción que puede suponer para algunas alternativas. Las tecnologías extensivas suelen necesitar de grandes superficies casi llanas en las que construir las lagunas. Un desnivel excesivo puede hacer inviable la construcción de estos sistemas.



Figura 11 Reconocimiento de los terrenos disponibles para la implantación de una PTAR en Santo Tomás, Nicaragua. Terreno de roca volcánica con fuerte pendiente.

Dentro de los tratamientos extensivos, los humedales subsuperficiales se adaptan mejor a las pendientes elevadas que el lagunaje, especialmente si la PTAR es de pequeño tamaño, dado que, por la propia necesidad de configurarlos de manera modular, con unas dimensiones máximas, se pueden ir adaptando al entorno.



Figura 12 PTAR con Humedales de Flujo Vertical de Albondón (Granada, España). Fuente: CEDEX and CENTA (2010).

Hay soluciones que sin embargo se adaptan bien a las fuertes pendientes, como pueden ser los filtros percoladores, ya que se podría alimentarlos sin la necesidad de emplear bombeos.



Figura 13 PTAR con doble etapa de filtros percoladores en El Salvador.

Por otro lado, una pendiente excesiva puede provocar problemas de erosión en los terrenos de la planta y de contaminación aguas abajo, pues el agua puede arrastrar hasta fuera de la parcela restos de la operación de la planta que se encuentren en el terreno como los residuos de la limpieza del pretratamiento si no se retiran correctamente, restos del secado de lodos que hayan caído fuera de los lechos al vaciarlos, etc.

3.3.2 Características geotécnicas

Las características geotécnicas del terreno van a condicionar enormemente los costos y dificultad de construcción e, incluso, la alternativa tecnológica que es posible implantar. Por ejemplo, en terrenos rocosos de origen volcánico los costos de movimiento de tierras van a ser muy elevados por lo que en la selección de las tecnologías de tratamiento y en los planteamientos constructivos se procurará seleccionar alternativas que minimicen esta partida. Si por el contrario los terrenos tienen una capacidad portante muy baja, condicionará también el costo requerido para la cimentación de los elementos de la planta, pues puede necesitar de acondicionamiento del terreno y/o cimentaciones profundas con pilotes.



Figura 14 Obras de construcción de la PTAR de Juan Díaz, Panamá.

Los estudios geotécnicos del terreno puede ser un proceso laborioso y con un costo significativo, por lo que no es factible realizar estudios de una gran cantidad de terrenos, por lo que se deben realizar en la fase de preinversión, una vez se han limitado los terrenos candidatos a unos pocos.



Figura 15 Estudio geotécnico en uno de los terrenos evaluados para la PTAR de Bluefields (Nicaragua).

En el caso de que la institución financiadora exija la asignación de un terreno concreto desde la fase de identificación de proyecto para proceder a la financiación de la planta, se debería imponer como condición que el terreno tenga un estudio geotécnico hecho. De este modo se podrá hacer una aproximación más adecuada de los costos del proyecto y de las posibles soluciones de tratamiento.

Box 6. Terreno en un paleocauce en San Juan Bautista (Paraguay)

San Juan Bautista es una ciudad de Paraguay que, en el momento de realización del proyecto de saneamiento, tenía una población en torno a los 15 000 habitantes. Para la construcción de la Planta se había realizado una selección preliminar de un terreno pero, después de la redacción del proyecto original, por diferentes circunstancias decidió cambiarse a otro que no contaba los estudios geotécnicos pertinentes.

El nuevo terreno presentaba varios problemas que empeoraban sus circunstancias respecto a la solución inicial: estaba muy próximo a la población, presentaba dos zonas de diferente altitud con un gran desnivel en su zona intermedia y en la zona más amplia que era baja, una parte importante correspondía a un paleocauce siendo una zona pantanosa.



Figura 16 Vista del paleoauce en el terreno de la PTAR de San Juan (Paraguay).

Todo ello dificultaba enormemente la construcción lo que provocó un importante retraso en la ejecución de las obras y que se tuviera que revisar el proyecto en profundidad y replantear todos los elementos de proceso, disposición y diseño, así como proceder a un drenaje del terreno para facilitar las obras.



Figura 17 Imágenes aéreas de la construcción de la PTAR de San Juan (Paraguay). Fuente: Google Earth.

En resumen, el estudio geotécnico se debe realizar en todos los casos y debe evitarse el cambio de terreno una vez realizados los estudios de selección de tecnología, pues el nuevo terreno puede no ser adecuado para la solución propuesta.

Asimismo, es importante estudiar la permeabilidad de los terrenos, ya que esta condicionará las posibles filtraciones. Si esta permeabilidad es elevada y existe un acuífero bajo el terreno, se debe prestar especial atención a asegurar la impermeabilidad de las instalaciones, de modo que se minimice el riesgo de contaminación del acuífero.

Esto es especialmente importante para sistemas extensivos en terrenos kársticos, donde se pueden formar sumideros por los que escape una gran cantidad de agua que contamine los acuíferos, además,

de forma muy rápida y diferenciada, ya que en este tipo de terrenos el agua se desplaza por las fisuras y es posible que partes del acuífero estén muy contaminadas y otras no lo estén.

Box 7. Lagunaje en un terreno kárstico en Allentown (Estados Unidos)

En la localidad de Allentown (EEUU) se construyó una laguna para el tratamiento de aguas residuales industriales (Memon et al., 2002) y para asegurar la impermeabilización de la laguna se construyó un revestimiento de arcilla. Sin embargo, el revestimiento se deterioró tras unos episodios de lluvias torrenciales y se formó un sumidero que conectaba con el acuífero situado bajo la laguna, acuífero que era empleado en abastecimiento.

Tras la detección del problema se realizaron análisis en los puntos de extracción de agua para consumo humano para comprobar los niveles de contaminación, pero no se identificaron contaminantes. Años después, sin embargo, se construyeron nuevos pozos para abastecimiento y se detectó la presencia de contaminantes por lo que se tuvo que interrumpir el bombeo desde estos nuevos pozos.

Por todo ello se realizó un estudio hidrogeológico del acuífero en el que se descubrió que la introducción del agua por este sumidero hizo que el flujo de agua cambiase su trayectoria normal de desplazamiento.

3.3.3 Movimiento de tierras

La capacidad portante, el tipo de terreno y la pendiente condicionarán enormemente el costo de la partida de movimiento de tierras, que puede ser en ciertos casos una de las más importantes en el proyecto de construcción de una PTAR.

Los costos por metro cúbico de excavación en terrenos blandos son mucho menores que en rocas duras, que pueden ser hasta 20 veces mayores o incluso más.

A modo de ejemplo, en las figuras siguientes se muestran los costos de excavación en distintos tipos de terrenos según la Base de costes de la construcción de la Junta de Andalucía (BCCA) (Junta de Andalucía, 2023), actualizados en Julio de 2023, y la última versión de las tarifas de la empresa pública española TRAGSA (TRAGSA, 2023).

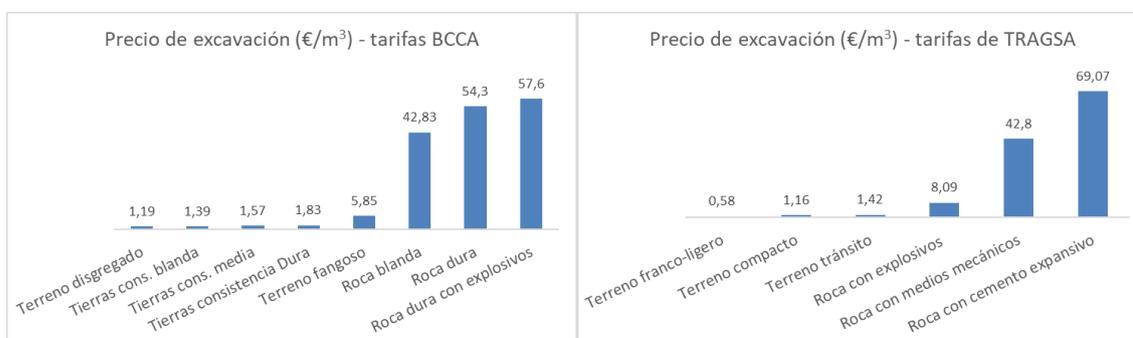


Figura 18 Precios por m³ de excavación en función del tipo de terreno.

Como puede observarse, la diferencia de costos unitarios se produce cuando en algunas alternativas se tiene que excavar en roca y en otras en suelo. En caso de que se tuviera que excavar en roca, como se ha dicho, se debería prestar especial atención a minimizar el volumen de movimiento de tierras.

El costo del movimiento de tierras es la partida que se convierte en limitante para implantar sistemas extensivos en terrenos de fuerte pendiente, pero incluso para soluciones intensivas un tipo de terreno rocoso puede condicionar el costo de ejecución de tal manera que obligue a construir los elementos de proceso elevados, requiriendo del bombeo del agua, lo que repercutirá en los costos de operación.



Figura 19 Movimiento de tierras en la construcción de las lagunas de Santa Fe (Bolivia).

3.3.4 Nivel freático y subpresión

Deben evitarse terrenos en los que el nivel freático se encuentre a una cota que pueda interferir con la cimentación de algún elemento de la planta. La construcción será mucho más compleja y costosa y pueden generarse problemas en los elementos construidos.

Cuando el nivel freático es somero, es importante conocer las posibles variaciones del mismo y, en especial, el nivel las épocas del año en que este se encuentre más alto. En estos casos, además es especialmente importante asegurar una buena impermeabilización de los elementos que se encuentren por debajo del nivel freático, tanto de las estructuras como de las cámaras de inspección y de las tuberías, para que no se produzcan entradas de agua.

En el caso de que se vaya a construir bajo el nivel freático, se debe tener en cuenta el efecto de la subpresión, comprobando, con la instalación sin agua, que el peso de la cimentación y los muros es mayor al del volumen de agua desplazado, teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad que en edificación suele ser de 1,05 cuando actúa como fuerza desestabilizadora (CTE, 2019). Lo habitual en estos casos es la construcción de una losa de cimentación, que suele tener un espesor mínimo, por razones constructivas, de 30 cm. Sin tener en cuenta el peso de los muros y los coeficientes de seguridad, una losa de 50 cm de espesor, construida con un hormigón de densidad 2,4 t/m³, podría

resistir la subpresión hasta una diferencia de cotas de 1,2 m entre el nivel freático y la parte inferior del suelo de la losa. Esto puede aumentarse un poco teniendo en cuenta el peso total de la instalación, pero en ocasiones no será posible que la estructura cumpla por sí misma la condición de estabilidad a la flotación. En estos casos es necesario recurrir a otras soluciones para resistir el empuje de la subpresión, como puede ser recurrir a anclajes o realizar un bombeo para rebajar la cota del nivel freático durante la construcción. En caso de que se opte por el bombeo, se debe tener en cuenta esta circunstancia si se vacía la instalación, por ejemplo, por razones de mantenimiento.



Figura 20 Obras de construcción de la PTAR de Mariposas (Bolivia).

En el caso de las lagunas, debido a la gran extensión que es necesario excavar, probablemente se verá forzada a ubicarla a una cota cuya solera quede por encima del nivel freático para evitar problemas durante la construcción, lo que puede suponer la necesidad de elevar el agua en la entrada de la PTAR a una cota superior. Además, no se permitiría una impermeabilización con arcilla y debería realizarse con geomembrana, para asegurar que no interacciona con las aguas subterráneas. Asimismo, sería necesario prever la instalación de drenes que permitan el escape de los gases retenidos en el suelo cuando sube el nivel freático ya que en caso contrario se puede producir la elevación de la geomembrana, reduciendo la capacidad efectiva de las lagunas.

Box 8. Levantamiento de la geomembrana de las lagunas de tratamiento

Un problema habitual en los lagunajes es que se produzca un levantamiento de la geomembrana incluso aunque la laguna esté llena de agua. Las causas de ello pueden ser variadas, siendo la más importantes el ascenso del nivel freático, que desplaza el aire de los huecos de los suelos al ser estos ocupados por agua, o la generación de gases en el subsuelo por la descomposición de materia orgánica. En la Figura 21, extraída del *Manual de diseño, construcción, operación y*

mantenimiento de balsas (CEDEX, 2010) se recogen problemas típicos de las balsas cuando no disponen de sistemas de drenaje.

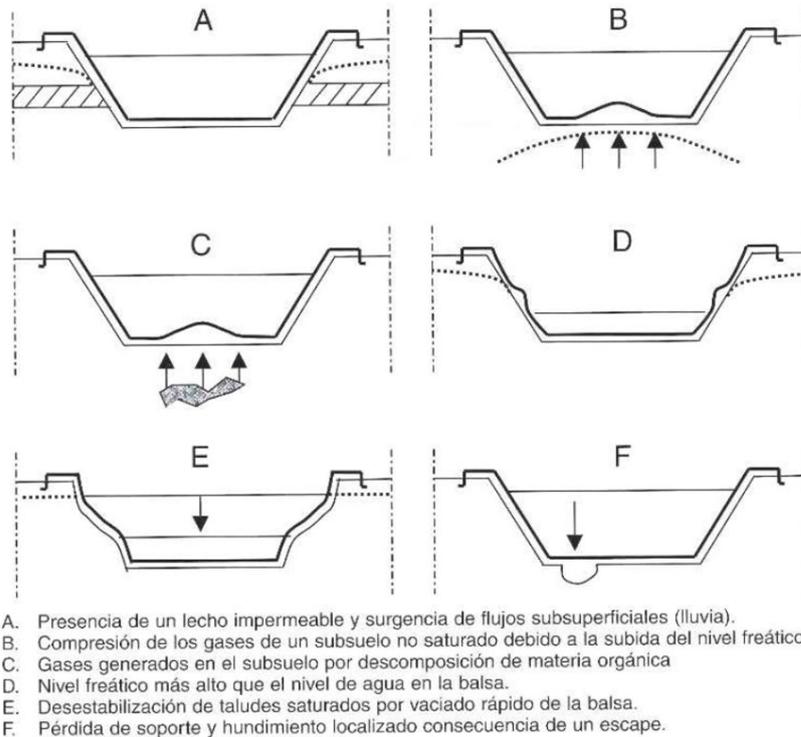


Figura 21. Levantamiento de la geomembrana y otros problemas comunes en balsas. Fuente: CEDEX (2010).

En el caso de PTAR, el problema de la formación de gases bajo la geomembrana por descomposición de materia orgánica puede ser muy importante, pues se tratan aguas con altas concentraciones de materia orgánica y se puede producir una filtración de estas hacia el terreno por debajo de la balsa. El gas resultante tendrá un alto contenido en metano, por lo que es explosivo y puede ser peligrosa la reparación de estos levantamientos, que a menudo se confunden con la acumulación de aire por oscilaciones del nivel freático.

En la imagen se puede ver un caso real de levantamiento de la geomembrana en Cobija (Bolivia), en la que se observan varias burbujas. Aunque solo se puede ver la parte superior, con frecuencia el levantamiento puede afectar a una extensión importante de la membrana, pudiendo llegar a comprometer la capacidad de la laguna, ya que funcionará con tiempos de retención menores a los requeridos.



Figura 22. Levantamiento de la geomembrana por embolsamiento de gas en la PTAR de Cobija, Bolivia. Fuente: Google Earth

Este problema debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño de la laguna, donde se pueden instalar sistemas de drenaje que permitan la salida de gases evitando el levantamiento de las membranas y otros problemas (UNE 104421:1995, 1995).

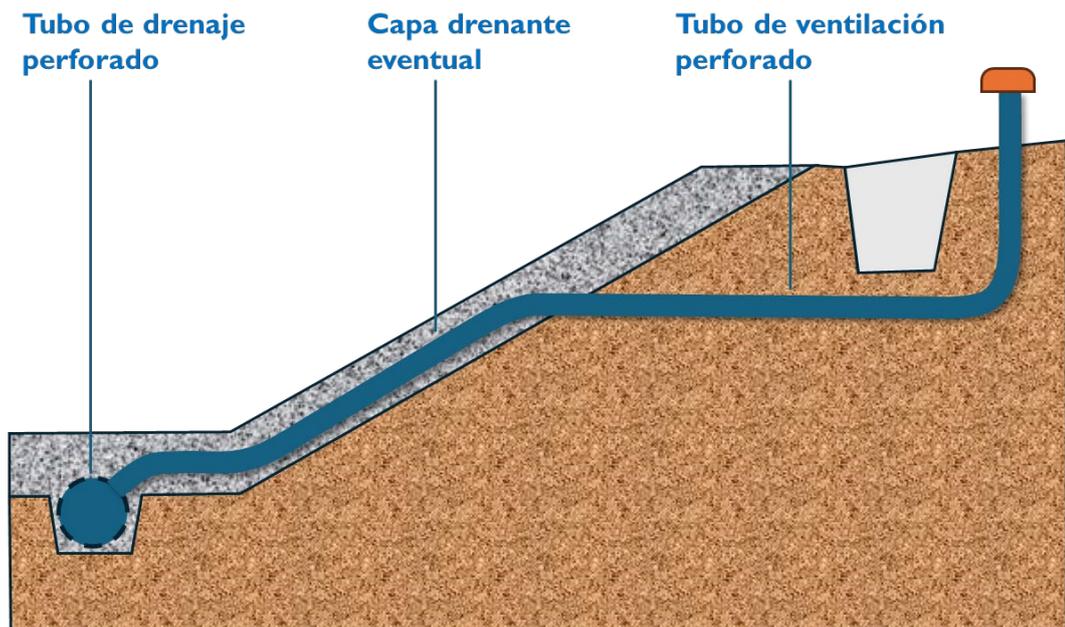


Figura 23. Esquema general de las salidas de gases a través del talud y sistema de drenaje. Adaptado de la Norma UNE 104 421:1995

Para conocer si en los diferentes terrenos que se vayan a comparar se puede encontrar el nivel freático a pequeña profundidad, es conveniente consultar a los vecinos del entorno. Asimismo, realizar una cata es una tarea relativamente sencilla y barata, por lo que se debería realizar en todos los casos.



Figura 24 Cata realizada en los terrenos de las PTAR de Warisata (Bolivia), donde se puede apreciar el nivel freático somero.

3.3.5 Riesgo de inundación

Los terrenos inundables o inestables por la acción del agua no son adecuados para la construcción de una planta de tratamiento ya que se pueden producir daños en las instalaciones, introducción y mezclas de aguas procedentes de la inundación con las aguas de la propia planta y, en general, un mal funcionamiento.



Figura 25. Planta de tratamiento de Pehuajó, Argentina

En el caso de que no se cuente con mapas de riesgo de inundación y hay constancia de que se pueden producir problemas, debe realizarse un estudio hidráulico de inundabilidad de los terrenos en los que se pretende ubicar la planta, así como estimar el costo de realizar obras de protección y defensa. Un cálculo erróneo de la cota de inundación en el terreno puede condicionar e, incluso, hacer imposible la operación de los sistemas de tratamiento.

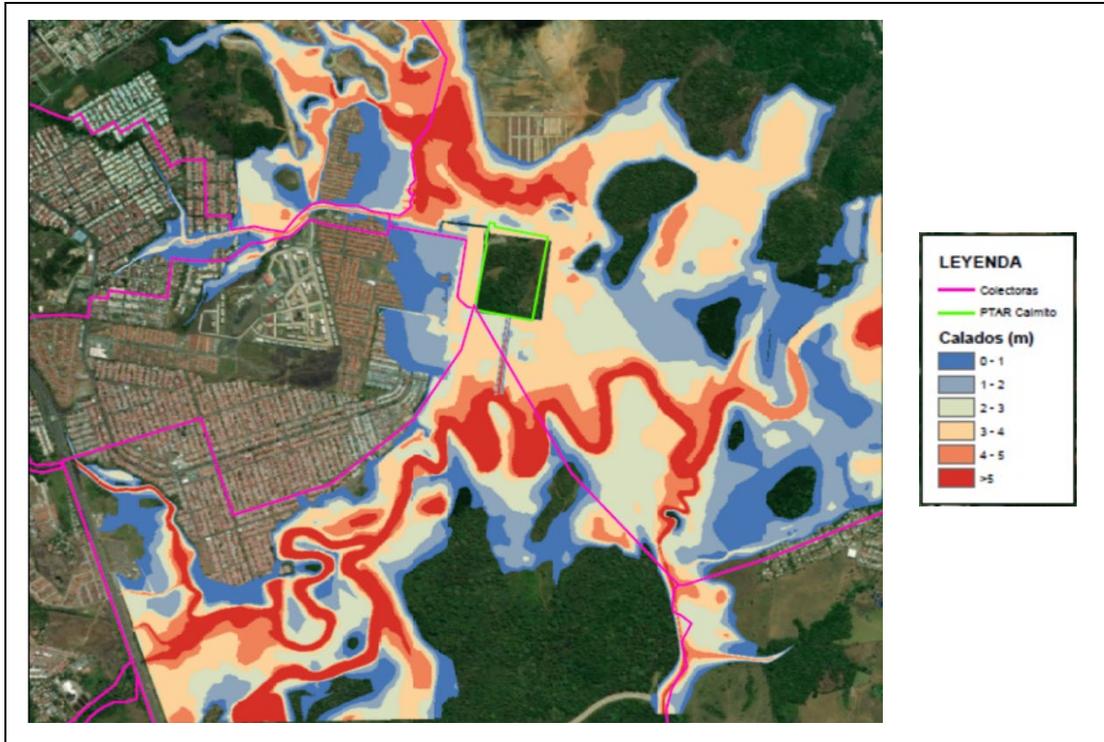


Figura 26 Estudios de inundabilidad en el entorno de la ubicación de la PTAR de Caimito, Panamá.



Figura 27 Dique de protección e instalaciones de drenaje en la PTAR de Managua (Nicaragua).

3.3.6 Riesgo de afección por la dinámica fluvial

Cuando se plantean terrenos en las llanuras aluviales, cercanas a cursos fluviales de ríos importantes se ha de tomar en consideración como un riesgo la dinámica fluvial que puede terminar afectando a la integridad de la instalación si se produce un cambio en el cauce tras una crecida.



Figura 28. Derrumbe de un dique de la laguna de la PTAR de los Negros (Bolivia) debido a la socavación generada por el río y diques de protección construidos a posteriori para evitar el problema.

En consecuencia, se debe ser prudente cuando se seleccionan los terrenos a estudiar, manteniendo en la medida de lo posible la distancia a los cauces que pueden cambiar su recorrido. Si no es posible, deberán preverse las infraestructuras de protección necesarias.

3.3.7 Riesgo sísmico

También es importante analizar el riesgo de que la planta pueda sufrir daños durante un terremoto, tales como la rotura de tuberías o de las estructuras de la planta. En este sentido, la literatura especializada, para analizar la vulnerabilidad de la planta frente a un sismo, distingue entre vulnerabilidad estructural, no estructural y operacional (Kerpelis et al., 2022).

Ejemplos de parámetros de vulnerabilidad estructural son el hundimiento, la rotura de los elementos de la Planta o su daño, la vulnerabilidad no estructural está relacionada con la infiltración de lodos o la posibilidad de que se produzcan incendios tras un terremoto por fallos en los equipos electromecánicos. Finalmente, como ejemplos de vulnerabilidad operacional están los daños en los edificios de administración que impidan el monitoreo de las plantas o la no disposición de planes de emergencia (Kerpelis et al., 2023).

Cuando se trata de la elección de un terreno para la construcción de la planta, lo habitual es que todas las alternativas estén separadas unos pocos kilómetros, por lo que podría pensarse que son igual de susceptibles a los terremotos. Sin embargo, el tipo de terreno sobre el que se asientan tiene una gran influencia en el comportamiento de los elementos de la planta ante un terremoto. En este sentido, la normativa española (NCSR-02, 2009), distingue entre 4 tipos de terrenos a la hora de calcular la aceleración sísmica de cálculo:

- **Tipo I:** Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso.
- **Tipo II:** Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros.
- **Tipo III:** Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme.
- **Tipo IV:** Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando.

Siendo los terrenos del Tipo I los que tienen un menor coeficiente de amplificación, y por lo tanto, es esperable que los efectos de un terremoto sean menores, y los del Tipo IV los terrenos en que los efectos de un terremoto sean más intensos.

En la realidad, el terreno se compondrá de distintas capas con terrenos de varios tipos, por lo que se hace una media ponderada de los distintos terrenos que se encontrarían en una columna de 30 m de profundidad en el entorno del proyecto.

Licuefacción

Relacionado con el riesgo sísmico y la presencia del nivel freático se encuentra el fenómeno de la licuefacción de suelos, un fenómeno de pérdida de resistencia del terreno durante un terremoto. Está asociado con el ascenso de la presión intersticial en suelos saturados blandos mal graduados, especialmente arenas medias o finas y puede producir grandes deformaciones plásticas en los suelos (Lanzano et al., 2014).

Este fenómeno ha producido grandes daños en las plantas de tratamiento de aguas residuales, tales como la destrucción de tanques o problemas operacionales muy importantes por la destrucción de las tuberías, tanto en la planta como en el resto de la red (Kerpelis et al., 2022).

En el caso de que la planta se vaya a construir en zona sísmica, deberá estudiarse en qué terrenos existe riesgo de licuefacción. González de Vallejo (2004), a partir de parámetros normalmente recogidos en estudios geotécnicos, plantea un procedimiento sencillo para determinar si existe riesgo de licuefacción, que sería cuando un suelo cumple las siguientes condiciones:

- Grado de saturación del 100 %.
- Diámetro medio entre 0,05 y 1 mm.
- Coeficiente de uniformidad <15.
- Bajo grado de compactación.

Además de lo anterior, en la mayoría de las ocasiones donde se han observado fenómenos de licuefacción el nivel freático estaba a menos de 3 metros de profundidad.

Si se pretende construir en un terreno con riesgo de licuefacción, en las instalaciones principales se deberá optar por cimentaciones profundas o tratar el suelo con técnicas de mejora del terreno como la compactación dinámica, las columnas de grava o las inyecciones de cemento. Esto generará un sobre costo que deberá tenerse en cuenta en la selección del terreno.

3.4 INSTALACIONES AUXILIARES

Las instalaciones auxiliares que requiera una planta de tratamiento pueden suponer un incremento importante del costo de construcción e, incluso de operación y mantenimiento. De manera relativa estos costos pueden ser más importante aún en las pequeñas instalaciones que en las grandes, donde probablemente exista además una limitación de disponibilidad presupuestaria. Como ejemplo se puede señalar que los estudios realizados para la Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Bolivia estimaron que, como término medio, estas obras complementarias superaban el 20% del costo de la PTAR (CEDEX, 2021), siendo este porcentaje más importante cuanto más pequeña era la instalación. El costo diferencial que conllevan las actuaciones auxiliares en cada uno de los terrenos puede convertirse así en un factor muy importante del proceso de selección.

3.4.1 Conducción hasta la planta

Antes se han visto las ventajas de alejar prudentemente el terreno de la PTAR de la población y de las zonas sensibles. Sin embargo, cuanto más se aleje, necesariamente conllevará un mayor costo en la ejecución del emisario necesario para conducir las aguas residuales desde la población hasta la planta de tratamiento. Además, dependiendo de la orografía de la zona, esta conducción de las aguas puede conllevar un costo importante de ejecución (que en algunos casos llega a ser equivalente al de la PTAR) y/o de operación.

Cuando se compare la incidencia de este factor en la posible decisión sobre el terreno, no se deberá considerar la distancia en línea recta, como sucedía con el impacto posible por olores, sino siguiendo un recorrido que sea el más adecuado para la construcción del emisario. El transporte del agua residual hasta la planta bien sea por gravedad o mediante impulsión debería procurarse que resultara lo más barato y sencillo posible. En este sentido, debe evitarse que el emisario discurra por terrenos demasiado accidentados, en los que sea necesario construir obras singulares, y minimizar los costos de excavaciones. Cualquier circunstancia que dificulte la construcción del emisario puede suponer un sobrecosto importante de las instalaciones y dificultar la ejecución en el plazo previsto.



Figura 29 Obras de construcción del emisario a la PTAR de San Carlos, Bolivia.

Para cada uno de los terrenos estudiados se debería tratar de estimar, de manera aproximada, el costo de esta intervención. En general, salvo que los terrenos sean muy llanos y semejantes para todas las alternativas, se debería evitar hacer estimaciones basadas en precios tipo por km, iguales para todas ellas. En general todas las situaciones un poco singulares van a introducir sobrecostos importantes, como son: terrenos muy agrestes de difícil acceso o donde necesariamente hayan de discurrir por barrancos y/o cauces; terrenos muy ondulados o con múltiples vaguadas que obliguen a realizar zanjas profundas.

3.4.2 Accesibilidad del terreno

Para la correcta operación de la planta es necesario que los operarios encargados de su mantenimiento puedan llegar hasta ella cuando sea necesario. Además, se necesitan accesos para tráfico rodado que permitan la entrada de vehículos pesados. Durante la fase de obras, porque es necesaria la entrada de maquinaria de construcción y, en particular, camiones con cemento para el hormigonado de la planta, grúas, etc. Durante la fase de operación y mantenimiento, dependerá del tipo de planta, pero deben entrar camiones para la retirada de lodos y, en su caso, camiones para la descarga de lodos de sistemas unitarios.

Como los terrenos se suelen ubicar en zonas aisladas, es posible que estos accesos no estén construidos, por lo que será necesario incluir, en la etapa de selección de terrenos, una estimación de los costos de construir o acondicionar los accesos.

Un problema habitual en zonas con altas precipitaciones o cuando los viales discurren por zonas inundables, es el de la inutilización de los accesos durante determinadas épocas del año. En estos casos, se deberá tener especial cautela a la hora de estimar el costo de los accesos. Se analizará si es posible el acceso durante todo el año hasta el punto de conexión del nuevo vial con la red existente y, además, si es posible la circulación durante todo el año en el nuevo vial.

En casos de zonas con altas precipitaciones los viales de acceso deberán ser pavimentados, ya que en caso contrario el acceso puede quedar interrumpido durante la temporada de lluvias y será necesario repararlo con frecuencia implicando un costo significativo de mantenimiento.



Figura 30 Deterioro por las lluvias del camino de acceso a uno de los terrenos estudiados para la PTAR de Yucumo (Bolivia).

3.4.3 Conexión a la red eléctrica y al abastecimiento de agua

Salvo en el caso de procesos de tratamiento extensivos que puedan funcionar por gravedad, en general la operación de la planta de tratamiento requiere de un suministro de energía eléctrica, por lo que la facilidad de conexión a la red y su costo será un elemento que debe tenerse en cuenta.

La ubicación de los terrenos alejada de núcleos urbanos normalmente conlleva que se deba tender un nuevo tramo de línea hasta la planta, lo que encarecerá el costo de las obras. Podría ser necesario incluso que la red tuviera que atravesar fincas de propiedad particular, lo que puede requerir de un proceso administrativo específico que retrase la puesta en servicio de la planta.

Si no es posible la conexión a la red eléctrica o esta puede encarecer mucho el proyecto, será necesario instalar grupos electrógenos o adoptar tratamientos que no requieran energía eléctrica, lo que puede incrementar sustancialmente las necesidades de superficie de la planta y los costos.

Por otra parte, idealmente una planta, sobre todo a partir de un tamaño, debería contar con una conexión con la red de abastecimiento de agua potable o dotarse de un suministro específico, por lo que también se deberá tener en cuenta los costos de esta conexión en la etapa de selección del terreno.

3.4.4 Instalaciones de vertido

Dependiendo de las circunstancias locales, generar un vertido adecuado puede requerir de actuaciones que en algunos casos pueden tener un costo significativo y que habrá que tomar en consideración en la comparativa de las diferentes ubicaciones.

Si en alguna de las alternativas es necesario construir un canal o un emisario de gran longitud para llevar el efluente tratado hasta un punto de descarga adecuado o hasta la zona de reúso o es necesario construir alguna estructura singular para salvar, por ejemplo, algún desnivel, se pueden producir diferencias muy importantes en el costo de las distintas opciones.

Un caso especialmente costoso y complejo sería cuando, por ausencia de un cauce receptor, se ha decidido implantar un sistema de infiltración. Como ya se ha comentado, la infiltración en terreno será menos recomendable en general que la descarga a un cuerpo receptor, pero si alguna de las opciones estudiadas contempla esta forma de vertido, el sistema debe dimensionarse adecuadamente, sin escatimar en la superficie necesaria y en las necesidades de operación y mantenimiento. Se deberá realizar un estudio específico para su diseño (lo cual ya tiene un costo diferenciado); adquirir los terrenos con superficie suficiente para asegurar el servicio de la PTAR en el año horizonte de proyecto; preparar los terrenos e implantar el sistema de distribución, así como, en su caso, prever su mantenimiento en los periodos de secado. Sobre esta temática se recomienda la lectura de la publicación *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Fundamentos y casos prácticos*, del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) que analiza en detalle todos los estudios y requerimientos necesarios (IGME, 2003).

3.5 USOS ACTUALES DEL TERRENO Y SU ENTORNO

Para seleccionar el terreno ha de tenerse en cuenta la regulación urbanística aplicable y las posibles figuras de protección ambiental, que podrían imponer limitaciones a los usos del suelo.

Las limitaciones por usos urbanos van a estar muy relacionadas con la aceptación social. Como norma general se trataría de evitar el emplazamiento en suelos urbanos y urbanizables, aunque no estén consolidados, pues son las zonas en las que se van a producir los futuros desarrollos urbanísticos, que con el tiempo entrarán en conflicto con la actividad del tratamiento de aguas residuales. En general,

como se ha dicho, debería evitarse cualquier zona en la que se prevea una futura expansión de la población, aunque en la actualidad no esté clasificada como suelo urbano o urbanizable. Si bien en algunos casos va a ser muy difícil encontrar terrenos suficientemente alejados de cualquier vivienda o de zonas de desarrollo urbano o puede resultar muy costoso alejarse suficientemente.



Figura 31 Terreno donde se construyó la PTAR de Linde-Paracaya, Bolivia. Ubicado en el límite de la zona urbana

Además, en el caso de que el terreno se encuentre localizado en un espacio con algún tipo de protección medioambiental, las instalaciones deberán tener en cuenta la minimización del impacto en el entorno, reduciendo el impacto paisajístico y cualquier molestia sobre la fauna del entorno. También en estos casos es habitual que se impongan unos límites de emisión más estrictos a la salida de la planta, lo que encarecería los costos de construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones e, incluso, podría hacer necesario la inclusión de etapas adicionales en el tratamiento (tratamiento de afino).

Tampoco resulta adecuado que la planta se ubique sobre cuerpos de agua o en zonas inundables si no se realizan obras de defensa, o en suelos constituidos por rellenos antrópicos. Puede admitirse la ubicación en terrenos inundables, siempre que se realicen obras de defensa que garanticen la seguridad de la planta.



Figura 32 Humedal propuesto para la construcción de la PTAR de San Ignacio, Paraguay.

En resumen, la localización idónea para la planta sería un terreno baldío o de matorral, que no sea objeto de explotación económica, y que cumpla con el resto de los requisitos que se exponen en esta Guía. De acuerdo con esto se propone la siguiente clasificación en función de la idoneidad de los usos del suelo:

Idóneo	<ul style="list-style-type: none"> • Terreno baldío • Matorrales
Aceptable	<ul style="list-style-type: none"> • Tierra de cultivo
Posible pero no deseable	<ul style="list-style-type: none"> • Terrenos inundables realizando obras de defensa • Suelo urbano • Zonas con alguna figura de protección ambiental no muy exigente
No aceptable	<ul style="list-style-type: none"> • Cuerpos de agua y dominio público hidráulico o costero, donde se haya definido • Humedales • Rellenos antrópicos • Zonas con figuras de protección estrictas

Por otra parte, también se ha de tomar en consideración si el trazado del emisario hasta la PTAR puede discurrir por terrenos protegidos o que estén en uso, lo que dificultará su construcción o incluso determinará modificaciones en el trazado que pueden suponer mayores longitudes, costos de construcción y de operación.

Fauna y flora local

La generación de las láminas de agua que supone una PTAR, especialmente las de grandes dimensiones y las de tratamientos extensivos, puede suponer un foco de atracción para la fauna local. De hecho, hay normativas como la nicaragüense que establecen por esta razón distancias mínimas a instalaciones que pueden ser sensibles a ello como los aeropuertos.

Además, los sistemas extensivos, si no se mantienen adecuadamente pueden terminar siendo invadidos por la vegetación, ya que por su propio funcionamiento son lugares con gran disponibilidad de agua y nutrientes. La entrada de fauna silvestre o de ganado pueden suponer un riesgo para los operadores en las labores de mantenimiento y para la conservación de las instalaciones. Incluso la entrada de especies protegidas podría imponer restricciones a la operación de la planta. Aquellos terrenos más cercanos a zonas naturales y mejor conservadas podrán tener un mayor riesgo de invasión por especies silvestres.



Figura 33. Presencia de lagartos en un sistema de lagunaje de Costa Rica

Aunque los terrenos se vallan, se puede acabar produciendo la entrada de fauna silvestre, que será la habitual en la zona de emplazamiento, por lo que si alguno de los emplazamientos tiene mayor riesgo que otros de que se introduzcan especies, debería tenerse en cuenta también en la selección. Sin embargo, en muchas zonas esto no va a ser un factor diferencial real puesto que esta atracción se produce en todo el entorno independientemente de su ubicación.



Figura 34. Presencia de capibaras en la Laguna de Trinidad (Bolivia), a pesar de encontrarse dentro de la población



Figura 35. Reparación en la membrana de impermeabilización de una laguna de las roturas generadas por la entrada de ganado. PTAR de Konani (Bolivia)

Por otra parte, en localizaciones cercanas a zonas naturales con densa vegetación y pluviosidad importante resulta muy difícil y costoso en mantenimiento mantener las instalaciones libres de la invasión de la flora local. En el caso de las lagunas esto puede darse en los taludes y provocar grietas, problemas de impermeabilización y ser un lugar de refugio de pequeños animales, como roedores, algunos de ellos de gran tamaño. Los roedores pueden atacar las geomembranas y comprometer la impermeabilización de la planta.



Figura 36. Laguna invadida por la vegetación en la PTAR de San Bernardino (Paraguay)

3.6 COSTOS ASOCIADOS AL TERRENO Y SERVIDUMBRES DE PASO

Entre los costos ligados a la selección del terreno se encontrará el propio valor de los terrenos para implantar la PTAR y, en su caso, la superficie necesaria para infiltración en terreno.

Habitualmente los terrenos candidatos se encontrarán en suelo no urbanizable y sin ningún tipo de protección medioambiental, por lo que el costo por m² será similar entre las distintas alternativas del proyecto. Si esto no fuera así y alguno de los terrenos preseleccionados no cumple esas condiciones, encarecerá enormemente los costos de adquisición de esa alternativa.

Por otra parte, en aquellas ocasiones donde la disponibilidad de suelo es limitada o donde los terrenos estudiados presenten circunstancias diferentes que les hagan resultar más idóneos para otros usos demandados por la población (ubicación, características del terreno, clasificación urbanística, cercanía de otros servicios y dotaciones básicas, etc.), el costo de oportunidad de las distintas alternativas podría ser un factor importante en la selección. Este factor podría considerarse dentro de la evaluación económica o social de las alternativas.

Por otro lado, aunque los costos por m² sean similares en las distintas ubicaciones, no todas las tecnologías de tratamiento necesitan la misma superficie. En este sentido, el costo del terreno puede ser un factor determinante para elegir una tecnología u otra. Si el costo unitario es muy elevado, puede ser un factor para optar por tecnologías intensivas que requieren menos superficie. Si bien, como se ha dicho, siempre habrá que balancear estos costos con los de operación y mantenimiento.

Por otra parte, se deberá identificar en cada caso si es necesario atravesar con el emisario predios privados y, por tanto, el costo imputable a las correspondientes servidumbres de paso.

3.7 SEGURIDAD EN LA PUESTA A DISPOSICIÓN DEL TERRENO

En el proceso de selección de terrenos se debe tener la seguridad de que se pueden adquirir o ya se han adquirido los terrenos elegidos. Lo ideal es que ya sean propiedad de la municipalidad, de la entidad que preste los servicios de saneamiento, o de otro agente implicado que tenga interés en la realización del proyecto. Cuando esto no ocurre se debe recurrir a la adquisición del terreno, llegando a un acuerdo con el propietario o recurriendo a los procedimientos de expropiación forzosa. La expropiación suele ser el último recurso, ya que suele ser un proceso largo y complejo que puede retrasar la construcción de la planta.

Los problemas para hacer efectiva la adquisición del terreno seleccionado son tan comunes y causan tantos trastornos que ha llevado a diferentes instituciones y entidades financiadoras a imponer la condición previa de la disponibilidad del terreno antes del inicio del proyecto, lo que conlleva otros problemas. Cuando puedan existir diferencias en este aspecto entre los terrenos estudiados, sería un factor importante por considerar.

En ocasiones, el terreno puede ser de propiedad municipal pero encontrarse destinado a otros usos. Este caso, dependiendo del uso que tenga el terreno, puede llegar a ser una situación completamente indeseable, puesto que se introduce variables ajenas al proyecto que pueden causar dilaciones y sobrecostos importantes. Por una parte, será necesario habilitar un nuevo terreno que pueda albergar la actividad que se realizaba en el destinado a la PTAR, condicionándose así el proyecto de saneamiento por una actividad ajena. Por otra, el uso anterior puede haber perjudicado las condiciones del terreno para la implantación de una PTAR por lo que puede ser necesario realizar actuaciones extraordinarias de acondicionamiento y/o demoliciones de instalaciones existentes. Todo ello encarece el proyecto e introduciendo nuevos riesgos para lograr un avance adecuado.



Figura 37. Relleno sanitario propuesto para ubicar la PTAR de Sant Rita (Paraguay)

Por otra parte, se recuerda nuevamente que se ha de tener en cuenta también la gestión de las servidumbres de paso que sean necesarios para el emisario hasta la PTAR y, en su caso, para la conducción de vertido. En muchas ocasiones puede resultar más rentable atravesar terrenos particulares y no seguir caminos, para evitar costos excesivos.

4 PROCEDIMIENTOS PARA LA SELECCIÓN DEL TERRENO

El terreno seleccionado entre las opciones disponibles debería ser aquel que, por sus características, facilitara en mayor medida a la sostenibilidad del servicio de saneamiento y tratamiento. La guía de *Selección de alternativas de tratamiento* (CEDEX, 2022) incluye en su apartado 5.2.1 un análisis sobre la consideración de la sostenibilidad como el objetivo, cuya lectura se recomienda. En la mayoría de los casos una mayor sostenibilidad implica que permita construir unas instalaciones con los menores costos de ejecución y, sobre todo, de operación y mantenimiento y que permita un funcionamiento más sencillo a lo largo de todo su ciclo de vida.

Teniendo en cuenta la diversidad de factores señalados en el capítulo anterior, tomar la decisión sobre la ubicación de la PTAR puede ser un proceso complejo en el que intervienen, además, varios actores, por lo que resulta útil apoyarse en herramientas que permitan organizar adecuadamente al estudio, aportando seguridad y transparencia en el proceso. Se pueden proponer diferentes metodologías o procedimientos de ayuda en la selección de los terrenos, como son:

- Sistemas de screening o cribado. Cuando no existen a priori condicionantes o terrenos preseleccionados, se pueden emplear sistemas de decisión multicriterio ligados a análisis geoespacial por sistemas de información geográfica. Estos sistemas son ideales para hacer una identificación de los terrenos que potencialmente pueden presentar mejores características y posteriormente se puede pasar a un estudio de valoración entre los preseleccionados.
- Sistemas de check-list o lista patrón. Principalmente se aplican cuando la información disponible es muy limitada para poder realizar un primer análisis entre posibles alternativas disponibles.
- Sistemas de decisión multicriterio. Generalmente se emplean cuando se puede conocer en detalle las características de varios terrenos y realizar un estudio de alternativas adecuado. Este tipo de estudios se basarían en la construcción de un modelo de decisión, que se apoya en el análisis de factores que se ponderan y valoran de cara a la sostenibilidad de la actuación.

Todos estos instrumentos son conceptualmente muy similares, parten de un análisis de los factores determinantes, evaluándolos para llegar a la selección final. La utilidad de cada una de estas herramientas dependerá del contexto en que se plantee esta decisión, de la capacidad de conocer la información determinante y de las opciones de partida. En general, en cada caso, el proceso de estudio y selección deberá adaptarse a las circunstancias locales y en la bibliografía especializada se pueden encontrar diferentes aproximaciones al estudio de selección, muchos de ellos desarrollados para casos específicos, como el que se sintetiza en la Figura 38.

Idealmente, un proceso optimizado debería ir realizándose en varias fases según se avance en el conocimiento de la situación local. En la identificación del proyecto se trataría de conocer la disponibilidad de terrenos, si existen o no muchas alternativas y de qué características son; en las primeras fases de los estudios se realizaría una primera preselección de los terrenos aparentemente más idóneos y, posteriormente, según avancen los estudios de prefactibilidad, se pasaría a una segunda fase, abordando el estudio detallado de las características de los terrenos y de su integración con la red de saneamiento. En la preselección de los terrenos intervendrían fundamentalmente las autoridades y agentes locales, así como expertos en la materia y en el estudio final podrían intervenir otros actores como los usuarios y vecinos afectados.

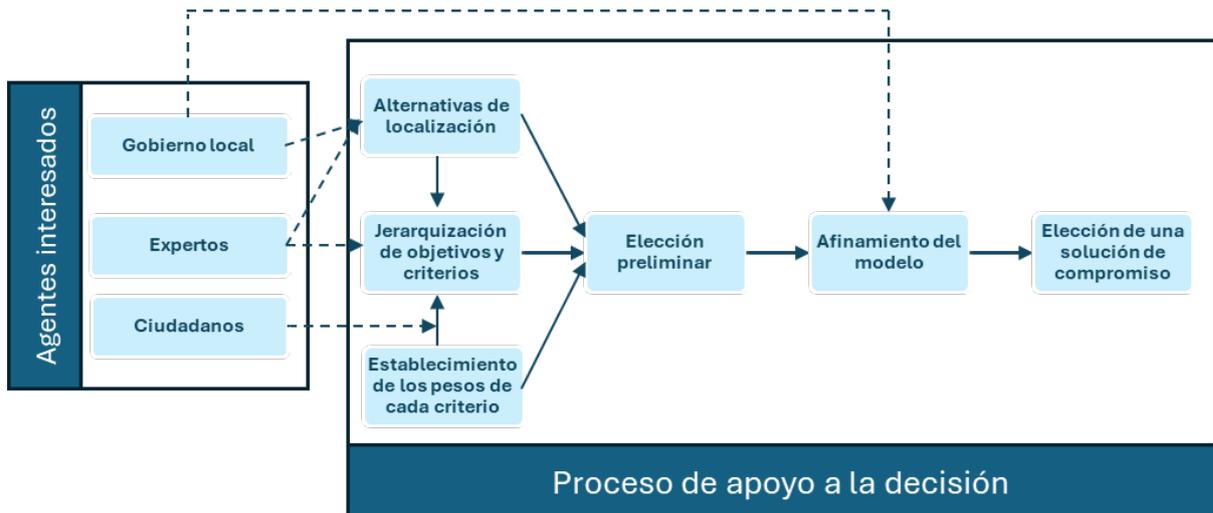


Figura 38. Proceso de decisión para la elección del emplazamiento de una PTAR. Fuente: Jajac et al. (2019).

Sin embargo, como se ha dicho, no es frecuente encontrar una situación tan abierta, donde se pueda optar por muchas localizaciones diferentes, sino que habitualmente solo se dispondrá de unos pocos terrenos, generalmente de propiedad municipal. Incluso, en una parte importante de los proyectos, la selección del terreno ha de realizarse desde las fases iniciales, cuando no se puede contar con toda la información técnica necesaria para realizar un estudio adecuado. Por todo ello, en estas recomendaciones se proponen diferentes métodos de apoyo en función del contexto donde se deba tomar la decisión.

En cualquier caso, se recomienda al lector que, como complemento a esta guía, tome en consideración los capítulos 4 al 6 de la guía de *Selección de tecnologías de tratamiento* (CEDEX, 2022), donde se incluye una explicación de los sistemas de apoyo a la decisión.

4.1 IDENTIFICACIÓN PREVIA DE TERRENOS ADECUADOS

Dependiendo de las circunstancias locales, la disponibilidad de localizaciones adecuadas puede resultar más o menos sencilla. En las poblaciones pequeñas y medianas es donde suele haber mayor disponibilidad de terrenos baldíos y/o de bajo costo, con superficie suficiente, por lo que es donde las técnicas de preselección suelen tener mayor aplicabilidad. Si bien, la capacidad real de realizar una expropiación forzosa, más allá de que esté prevista en las leyes nacionales, condiciona completamente las posibilidades de poder seleccionar el terreno óptimo. En grandes poblaciones, por el contrario, suele ser difícil encontrar alternativas útiles y lo habitual es disponer solo de unas pocas opciones preseleccionadas por los responsables locales.

Con objeto de acotar el estudio a un número limitado de opciones y de que éstas sean realmente las más adecuadas para el proyecto, se debería realizar una primera preselección atendiendo a los factores más determinantes. Este primer cribado muchas veces no recibe la atención necesaria, pero se debe tener en cuenta que una preselección de terrenos inadecuada puede derivar posteriormente en mayores costos de construcción, operación y mantenimiento y un peor funcionamiento de la planta. Además, toda la información que se genere en la preselección podrá ser también de utilidad en etapas posteriores del proyecto.

Por todo ello, la preselección debe hacerse de forma cuidadosa y empleando los recursos adecuados. Para asegurar que se toman en cuenta los factores más importantes se pueden emplear diferentes metodologías de apoyo, que se expondrán a continuación.

4.1.1 Empleo de GIS para la identificación de terrenos

Los sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) son una herramienta de apoyo muy útil y potente para la identificación de los terrenos más adecuados, pues permiten analizar zonas muy amplias del territorio entorno a las poblaciones para identificar las ubicaciones que pudieran ser más apropiadas. El GIS permite preparar coberturas con los factores más importantes y realizar un análisis espacial multicriterio, de manera que a cada terreno se le asigne una serie de valores de forma automática (por ejemplo, pendiente media, distancia a núcleos, usos del suelo o riesgo de inundación), de manera que se puedan analizar los factores de decisión a gran escala y de forma semiautomatizada. A partir de este análisis se pueden detectar los predios se cruzan todas las variables de manera más adecuada. Incluso permiten, asignando puntuaciones a los factores, obtener valoraciones finales de los terrenos.

Dentro de la bibliografía especializada se pueden encontrar numerosos ejercicios realizados con el apoyo de los sistemas de información geográfica como los que se muestran en el box siguiente.

Box 9. Ejemplos de aplicación de GIS en la selección de terrenos de PTAR

Mansouri et al. (2013), realizan una aproximación para determinar la ubicación de una planta de tratamiento para la población de Falavarjan, en Irán. Con la ayuda del GIS analizan un área de estudio de más de 300 km², clasificando el terreno teniendo en cuenta aspectos como la distancia a la ciudad, la vegetación, el uso del suelo, criterios geológicos o distancia a los viales. Desarrollan un proceso analítico jerárquico para establecer los pesos de los diferentes factores y obtienen un mapa en el que se le ha asignado un valor numérico a cada zona del terreno. A partir de ese valor se clasifica y se muestra por colores en la Figura 39. El color blanco se corresponde con zonas excluidas del análisis, por tener un criterio que las haga ser inadecuadas como estar muy cerca de asentamientos urbanos, el rojo con zonas no adecuadas, el naranja con zonas poco adecuadas, el amarillo con zonas relativamente adecuadas y el verde con las zonas más adecuadas.

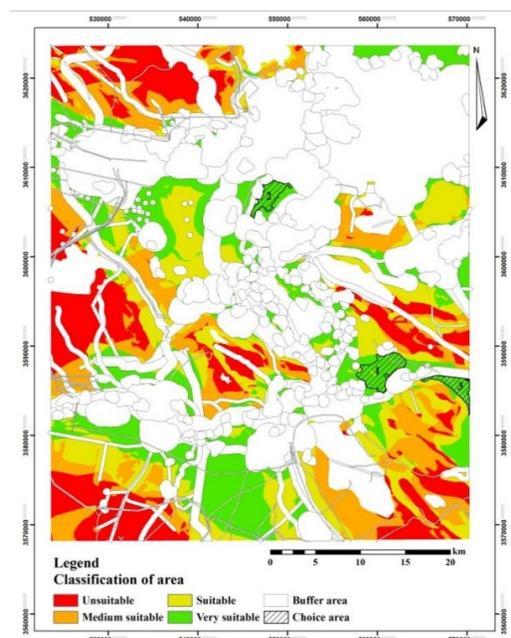


Figura 39. Aplicación GIS para un análisis multicriterio. Fuente: Mansouri et al. (2013).

A partir de esta clasificación se seleccionan tres terrenos calificados como muy adecuados y sobre ellos se realiza un estudio pormenorizado para seleccionar el idóneo (Mansouri et al., 2013).

Otro ejemplo de la aplicación de los GIS a la selección de terrenos se presenta en Deepa and Krishnaveni (2012), donde se estudia la conveniencia de construir plantas descentralizadas en una zona de rápida expansión. El propósito del estudio fue encontrar terrenos con elevado potencial para construir plantas descentralizadas. Partiendo de mapas de elevación del terreno, de uso del suelo, pendientes del terreno y densidad de población se identifican finalmente varias áreas en las que la instalación de estos sistemas de tratamiento resultará más adecuada (Deepa and Krishnaveni, 2012).

Como se puede ver en los ejemplos, el uso de estos sistemas aporta una herramienta muy potente para la identificación y preselección de terrenos, sobre todo en las etapas previas. A partir de los mapas de uso del suelo es inmediato descartar un terreno cuando está en zona urbana o si se dispone de mapas de inundabilidad con la altura de la lámina de agua, igualmente se podrían descartar las zonas donde por las alturas que alcanza el agua sería muy complicado realizar obras. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que esta metodología presenta unos requerimientos, como sería la necesidad de contar con un asesoramiento o contrato especializado que permita realizar el estudio y disponer de un mínimo de información en coberturas geográficas. Por ejemplo, es indispensable contar con mapas de usos del suelo, porque es una variable muy relevante en el análisis. En otros casos se debe generar nueva información a partir de las coberturas disponibles, como sería el de la distancia a la población de cada uno de los terrenos, las pendientes, etc.

En cualquier caso, al margen de lo anterior, se debe destacar que actualmente es posible acceder a mucha información cartográfica e imágenes aéreas, incluso a su evolución histórica, y en ocasiones se puede extraer información simplemente con la observación de la información disponible para la zona. Por ejemplo, si en la imagen se observa que el terreno tiene un color más oscuro que los de alrededor, podría estar indicando que se trata de una zona inundable, en la que hay afloraciones naturales de agua o con un nivel freático alto. Circunstancias todas ellas que desaconsejan la construcción en ese terreno.

Este tipo de estudios basado en la información cartográfica presenta la limitación de que parte de los factores más importantes no van a poder estudiarse de forma extensa para todo el territorio porque supondría un proceso muy costoso de elaboración. Este sería el caso, por ejemplo, de las características geotécnicas. Por tanto, estos sistemas pueden emplearse para realizar un primer screening, seleccionando una serie de terrenos, que convendría afinar posteriormente con la aplicación de otros factores de más detalle.

4.1.2 Empleo de listas patrón o *check-list*

Aunque el empleo de sistemas de información geográfica es aconsejable para una primera búsqueda de opciones, no siempre va a ser posible poder optar por cualquier terreno, sino que podrá elegirse entre una serie limitada de posibilidades. En estos casos y cuando no se pueda emplear GIS se podrá seguir un procedimiento de evaluación a partir de la utilización de listas patrón. Este sistema es similar al anterior pero supervisando manualmente y para cada uno de los terrenos designados la idoneidad de las características para albergar la PTAR.

Aunque haya pocas alternativas de terreno, es recomendable utilizar listas patrón para asegurar que se toman en consideración los factores más relevantes para la selección del terreno. La metodología consistiría en ir señalando si un determinado terreno cumple con cada condición de una lista de referencia y, en su caso, en qué grado cumple. La gran ventaja de la utilización de estas listas es que aseguraría que los responsables locales toman en cuenta lo que es importante para el proyecto y no solo para sus propios intereses.

En el anexo 2 se incluye una lista patrón genérica. Aunque esta *check-list* pueda ser tomada como base, sería conveniente en cada caso concreto revisarla por si es necesario introducir modificaciones debido a las condicionantes locales de cada proyecto. El contenido y el análisis de los resultados de las listas patrón debe ser consensuado y discutido por técnicos con experiencia en la construcción de plantas de tratamiento y con conocimiento de la zona en la que se pretende construir la planta.

Como resultado de la preselección de terrenos en esta fase se debería llegar a un número limitado de opciones, en torno a tres, sobre los que poder realizar estudios más de detalle en etapas posteriores de proyecto.

4.1.3 Verificación in situ

Tanto si la propuesta inicial de terrenos candidatos se ha realizado empleando GIS o por la revisión con listas patrón, resulta imprescindible realizar una visita de campo a cada uno de los terrenos preseleccionados con objeto de verificar que la realidad física coincide con la información disponible e, incluso, para descubrir nueva información que pueda ser de interés. Por ejemplo, en el caso de que no se tenga información sobre el nivel freático y se aprecien afloraciones in situ o se pueda conocer el estado de los viales de acceso, etc.

4.2 SELECCIÓN EN LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DE PROYECTO

Como se ha comentado, la selección de los terrenos de emplazamiento de la PTAR debería estar presente desde las primeras etapas del ciclo de proyecto. En la fase de identificación sería conveniente realizar ya un primer análisis somero de la cuestión, identificando la disponibilidad de terrenos adecuados en el entorno, la posibilidad de ejecutar el proyecto en los terrenos que ya son propiedad de los agentes y/o la posibilidad de adquirir nuevos terrenos y su precio o la distancia de los terrenos a la población y a los servicios esenciales. Pero hay un caso especial que se debe distinguir por su repercusión: cuando se exige disponer de un terreno específico para la PTAR ya desde la fase de identificación como condición previa para poner en marcha el proyecto de saneamiento.

En estas situaciones la utilización de la lista patrón debería imponerse como un requisito obligatorio. Además, se debería exigir que se estudiaran al menos tres terrenos para seleccionar el mejor entre ellos y que todas las alternativas cumplan con una serie de valores mínimos para determinados factores limitantes. Un aspecto que se debería condicionar siempre sería el de la superficie disponible, que se determinaría en cada caso en función de las temperaturas locales y los caudales y cargas contaminantes esperadas en el futuro y para el tipo de tratamiento que se pretenda implantar. Deberá disponerse, al menos, de superficie suficiente para realizar un tratamiento intensivo y, en el caso de poblaciones medianas o pequeñas o que se requiera la desinfección del efluente, es recomendable contar con superficie suficiente para realizar un tratamiento extensivo. Junto con la superficie, se podrían limitar también otras características, como las pendientes máximas o la cercanía a la población, tal como se realiza, por ejemplo, en la normativa nicaragüense. Incluso, aunque no se limitasen de manera estricta, la lista patrón que se remita a la municipalidad para el análisis de alternativas podría recoger en cada parámetro cual sería el rango de valores preferente.

Para realizar estas evaluaciones sería muy recomendable, cuando no obligado, que los responsables del proyecto contaran con el apoyo de especialistas que les ayuden a buscar opciones, posibilitando así que se puedan tomar en consideración aspectos técnicos que pueden ser importantes. Probablemente, las entidades financiadoras que imponen la condición previa de la disponibilidad de un terreno podrían prestar una mínima asistencia técnica a las municipalidades para realizar la selección más adecuada. Además, es fundamental trabajar previamente con la comunidad, con sus responsables y con los futuros prestadores del servicio para que puedan comprender la trascendencia de la elección del terreno y para que sean conscientes de que, una vez tomada la decisión, deberán asumir para siempre sus repercusiones sobre la prestación del servicio y su costo.

Es imprescindible también durante este ejercicio exigir una visita a distintos terrenos, con objeto de verificar su idoneidad técnica y para detectar posibles inconveniencias. Incluso la entidad financiadora debería exigir que el terreno seleccionado cuente con estudio topográfico y geotécnico. En caso contrario sería conveniente solicitar tres posibles terrenos para el emplazamiento y no uno solo.

Estas listas de criterios, asignándoles una valoración a los diferentes factores, se pueden emplear también como sistema de apoyo para la selección del terreno. Al realizar esta evaluación se debe tener en cuenta que muchos factores arrojan información sobre los mismos aspectos, por lo que se requiere un ejercicio de ordenación y estructuración de los mismos, con objeto de evitar sesgos en la valoración posterior. En el apartado siguiente se muestra un ejemplo de estructuración de factores en un árbol de decisión que puede ser tomado como referencia también en este caso. Asimismo, en el Anexo 3 se muestra un ejemplo tipo de plantilla para evaluación de alternativas con lista patrón. En este caso se valoraría cada factor para cada alternativa y, a partir de su agrupación y valoración global, se podría identificar el terreno más adecuado.

En cualquier caso, estas listas patrón no deben entenderse como un conjunto cerrado, ni como una lista que aplicar a las distintas alternativas para escoger directamente aquella que tenga mejor puntuación, ya que no todos los elementos de la lista son igualmente relevantes en todos los casos, ni los elementos relevantes son los mismos en cada proyecto. Por ejemplo, en una zona con escasez de terrenos, puede ser especialmente relevante el costo de adquisición, mientras que en otra donde el terreno sea muy barato esto puede tener escasa incidencia.

A partir de este ejercicio, el promotor o financiador del proyecto podrá constatar que el terreno que se ha reservado para la PTAR es adecuado y cumple una serie de criterios mínimos.

4.3 SELECCIÓN EN LA FASE DE ESTUDIOS PREVIOS

Una vez que el problema de la selección del terreno se ha reducido a un número limitado de alternativas, se debe pasar en la fase de estudios previos a seleccionar el terreno en el que se va a ubicar la planta.

En este momento se recomienda realizar los estudios técnicos necesarios de detalle para cada una de las alternativas, como serían estudios geotécnicos o topográficos completos del terreno, en los que se pueda obtener de forma precisa información fundamental como la capacidad portante.

También es interesante realizar una nueva visita de reconocimiento a los terrenos preseleccionados y al entorno de los mismos, en donde se realice un análisis detallado por parte de los expertos, pues se pueden detectar nuevos problemas que podrían condicionar la solución adoptada.

En esta fase ya se contaría con toda la información necesaria para realizar un análisis de alternativas, incluyendo datos precisos de costos. Con esta información se debe realizar un análisis multicriterio

similar a los que se recogen en la guía “Recomendaciones para proyectos de saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Selección de tecnologías de tratamiento”.

Un punto de partida para realizar este análisis multicriterio serían las listas patrón que se han realizado en la fase de estudios previos, pero rellenándolas con valores precisos de costos, distancias o capacidad portante.

Los factores que pueden tener una incidencia significativa en un caso concreto pueden ser muy numerosos y diversos, por lo que resulta imprescindible agruparlos con objeto de realizar un estudio de alternativas ordenado y evitar el sesgo en la valoración. A continuación se propone una estructuración en árbol de los factores más comunes, orientada a una valoración cuyo objetivo sería la sostenibilidad de las actuaciones:

A. Sostenibilidad técnica

- I. Superficie disponible para las instalaciones y futura ampliación, en cuanto que sería el factor que más condiciona la solución técnica de tratamiento. Sobre todo, considerado como factor limitante para las soluciones extensivas sencillas y de bajo costo de operación.
- II. Bombeos necesarios, en cuanto que son elementos que condicionan las necesidades de operación y mantenimiento del sistema y, en definitiva, el riesgo técnico de realizar de manera adecuada el servicio.

B. Sostenibilidad económica

- I. Costos de inversión
 1. Costos de adquisición de los terrenos y servidumbres de paso. En muchos casos estos costes son asumidos por la población beneficiaria.
 - a. Costos de terreno
 - b. Costos de servidumbres de paso del emisario y de conducción o canal de vertido
 2. Costos de instalaciones auxiliares necesarias. En general estos costos y los siguientes son asumidos por la misma entidad que financia la planta de tratamiento.
 - a. Costo del emisario hasta la planta. Dependerá de la distancia y las características del terreno en el trazado.
 - b. Costos del bombeo hasta la planta, en caso necesario
 - c. Costos de bombeos en el interior de la planta (generado por las características del terreno y si existen diferencias entre las alternativas)
 - d. Costo emisario o canal de salida
 - e. Costo bombeo de salida, en caso necesario.
 - f. Costos de conexión a la red eléctrica
 - g. Costos de conexión a la red de abastecimiento de aguas
 - h. Costo de los accesos
 3. Costos necesarios de protección del terreno.
 - a. Protección frente a inundaciones
 4. Costos necesarios de acondicionamiento del terreno.
 - a. Mejora de las características geotécnicas.
 - b. Costo del movimiento de tierras (topografía)
 - c. Nivel freático
 - d. Cubierta vegetal
 - e. Número de árboles a talar

- II. Costos de operación y mantenimiento generados de manera diferencial por la selección del terreno. Estos costos deberán ser asumidos por el prestador y, en definitiva, por los usuarios.
 1. Asociados a los bombeos que se implantarían como consecuencia de la elección del terreno
 2. Asociados a las instalaciones de tratamiento que es posible construir, si algún terreno impone condiciones diferenciadas a algún tipo de tecnología.

C. Sostenibilidad ambiental

- I. Características del medio receptor de vertido
 1. Cuerpo de agua
 - a. Límites de emisión en el punto de vertido
 - b. Sensibilidad del medio. Características ecológicas y capacidad de dilución.
 - c. Afecciones potenciales/Usos aguas abajo
 2. Terreno. En aquellos casos donde no exista cuerpo receptor. Incluido acuífero que pueda verse afectado.
 3. Reúso potencial. En aquellos casos donde, dependiendo del terreno, se facilite en mayor medida el reúso.
- II. Características ambientales del entorno
- III. Consumos energéticos y generación de gases de efecto invernadero debido a los bombeos que se implantarían como consecuencia de la elección del terreno.

D. Sostenibilidad social

- I. Cercanía a la población actual y en el futuro teniendo en cuenta el crecimiento de la población y las actividades económicas
- II. Cercanía a zonas especialmente sensibles como zonas turísticas.
- III. Rechazo de la población local o de otros núcleos aguas abajo respecto a algún punto de vertido
- IV. Preferencia social debido a que los terrenos puedan emplearse alternativamente para otros usos demandados en la población (relacionado con el costo de oportunidad)

E. Incertidumbre respecto a la adquisición de terrenos y servidumbres de paso del emisor

A partir de una estructuración de los factores en una forma similar a la que se muestra aquí, resulta más sencillo ponderar la importancia que cada aspecto debería tener sobre la decisión final. En cada caso deberían estructurarse y ponderarse en la manera más adecuada para las circunstancias locales. Se debe tener en cuenta que en un caso concreto puede no haber diferencias sustanciales para muchos de estos factores entre las diferentes alternativas, por lo que no merecerá la pena considerarlos en el proceso de selección.

Por otra parte, determinados criterios se habrán impuesto en la etapa de preselección como requisitos limitantes, pero que una vez se verifica su cumplimiento, puede no tener sentido volverlos a analizar en esta etapa de valoración. Por ejemplo, la superficie necesaria ha podido ser un criterio determinante en las etapas previas para descartar determinados terrenos, pero una vez que se ha realizado este primer cribado y todos los terrenos que quedan tienen superficie suficiente para alojar la planta, no sería conveniente introducir esta variable en el análisis multicriterio, asignando distintas puntuaciones a terrenos que en todos los casos cumplen con esta condición.

Por otra parte, la importancia que cada factor ha de tener sobre la decisión final va a depender de las circunstancias locales. En el apartado 3, al analizar los diferentes factores, se aportan ejemplos de situaciones donde pueden ser más o menos importantes cada uno de ellos. Igualmente, en la guía de Selección de alternativas de tratamiento se puede encontrar un análisis sobre la importancia que podría

tener cada uno de los factores más importantes. Todas estas recomendaciones se podrán considerar para realizar el modelo de valoración.

Box 10. Selección de terrenos para ubicar la PTAR en Bluefields (Nicaragua)

Bluefields es un municipio de Nicaragua que contaba con una población de más de 50 000 habitantes en los años 2014-2015, cuando se realizaron los estudios para los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario y una estimación de crecimiento de 64 000 habitantes para el año horizonte de proyecto (2034).

Como primer paso para estudiar la configuración básica de la red de saneamiento y del tratamiento de aguas residuales, se analizó si resultaba más conveniente construir una planta o varias descentralizadas. Sin embargo, la solución descentralizada se descartó porque no fue posible encontrar terrenos vacíos disponibles que respetaran la distancia mínima a viviendas de 300 m, establecida en la *Norma Técnica Ambiental para Regular los sistemas de tratamiento de aguas residuales y su reúso* (NTON 05 027-05, 2006). Esta situación se verificó en visitas de reconocimiento realizadas por los técnicos de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL).

Una vez adoptada la solución centralizada, para el sistema de tratamiento se estudiaron 5 alternativas: emisario submarino, lagunas de estabilización, UASB con lagunas de estabilización, filtros percoladores y lodos activados. Se realizó un análisis multicriterio de las distintas alternativas, determinando que la opción de lagunas de estabilización sería la más sostenible.

En paralelo con la elección del tratamiento se realizó una identificación de terrenos que pudieran ser adecuados para ubicar la planta, lo que no resultó sencillo, dado que la mayor parte de los terrenos baldíos aparentemente más favorables eran zonas pantanosas (swampos según la terminología local). Finalmente se llegó a una preselección de tres terrenos, identificados por la zona de la población en la que se encontraban: Miller-Creek, Musulaine y Caño Muerto.



Figura 40. Proyecto de Bluefields. Fuente: VEOLIA and TECNICASA (2013).

En una primera aproximación, tras la realización de diversas visitas de campo y la deliberación de los expertos, se descartó la zona de Caño Muerto, por tratarse de una zona pre-urbanizada, hacia donde con mayor probabilidad se expandiría el crecimiento de la población y por ubicarse

demasiado cerca del aeropuerto, dado que la legislación nicaragüense establece también unas distancias mínimas a estas instalaciones, por el riesgo que puede suponer la atracción de aves.

En los dos terrenos restantes se realizaron estudios topográficos y geotécnicos y se desarrolló un sistema multicriterio de decisión. Entre los factores se tuvo en cuenta el área disponible, la distancia al núcleo poblacional, la dirección del viento, la posibilidad de conflictos con la población, el uso del suelo, el valor estimado del emplazamiento, el costo de construcción de los caminos de acceso y las características ambientales (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis multicriterio del terreno en Bluefields. Fuente: VEOLIA and TECNICASA (2013).

Sitio	Criterios evaluados:											Evaluación del emplazamiento	
	Sociales			Técnicos				Económicos					Ambientales
	Respecto a un núcleo poblacional		Posibilidad de conflictos con la población	Área inundable		Uso del suelo ⁶⁶	Área (Ha)		Valor Estimado de la tierra		Rehabilitación de caminos de acceso		
	Distancia (m)	Dirección del viento		SI	NO		Disponible	Requerida	Unitario (US \$/m ²)	Calculado (US \$)	Longitud (Km)		Costo ⁶⁷ (US \$)
Miller Creek	140	Barlovento	Potencial	X		No clasificado. Está inmerso en áreas de uso: deportivo (área verde), habitacional y de servicio.	2.00	17.62	3.00	176,200.00	0.10	3,945.96	2.00
Musulaine	4,000	Sotavento	NO		X	No clasificado.	23.00	17.62 ⁶⁸	0.14	24,668.00	4.83	190,590.06	2.30

Aunque en este caso la alternativa de Musulaine resulta claramente más idónea, el análisis multicriterio muestra que no resulta superior en todos los aspectos. Por ejemplo en caso de realizar la obra en Miller-Creek, el costo de rehabilitación de los caminos de acceso sería claramente inferior. Los sistemas de apoyo en la decisión permiten, además de identificar las opciones más favorables, evidenciar en qué es superior cada alternativa y las posibles debilidades de cada una de ellas.

5 RESUMEN Y PRINCIPALES APORTACIONES

A continuación se resumen las principales consideraciones y recomendaciones para el estudio de selección de terrenos:

- La selección del terreno de la PTAR suele ser el factor que condiciona en mayor medida tanto la configuración de la red de saneamiento como la selección de la tecnología de tratamiento y, con ello, sus costos de construcción, operación y mantenimiento.
- A pesar de ello, con frecuencia los responsables locales seleccionan los terrenos bajo criterios que son completamente ajenos a las necesidades del proyecto de saneamiento y tratamiento y las propuestas se alejan mucho de las condiciones ideales.
- En algunos casos, incluso, la asignación del terreno de la PTAR se realiza antes de comenzar los estudios del proyecto, por exigencia del financiador, y sin realizar ningún tipo de análisis técnico.
- Son muchos los factores que han de considerarse en la elección de la ubicación de la PTAR. El terreno afecta tanto a los costos de construcción como a la sostenibilidad técnica, económica, ambiental y social de la actuación. Así, los principales condicionantes por los que un terreno puede afectar al proyecto son: la superficie disponible; la cercanía a la población y su altitud relativa; las características topográficas y geotécnicas; los riesgos de inundación o de otro tipo; la disponibilidad de viales de acceso y de conexiones a los servicios; las afecciones medioambientales y la disponibilidad de cuerpos receptores adecuados para el vertido.
- La elección del terreno se ve limitada, a su vez, por otros condicionantes. Es necesario conocer toda la normativa local que pueda afectar en general a la protección de usos y espacios y, de manera específica, la que se refiera a la ubicación de las plantas de tratamiento.
- Por otra parte, es fundamental que la adquisición del predio para el proyecto pueda materializarse con garantías y a un costo razonable.
- Debido a las grandes repercusiones que tiene esta elección, debería realizarse mediante un estudio técnico específico a lo largo del desarrollo del proyecto y de manera coordinada con los estudios de configuración de la red de saneamiento y de selección de la tecnología de tratamiento, puesto que estos tres estudios son complementarios y se retroalimentan.
- Existen diferentes herramientas y procedimientos de ayuda en estos estudios, que pueden resultar de utilidad dependiendo del contexto y de la fase del proyecto en que se trabaje.
- Idealmente los análisis para la selección del terreno deberían comenzar en las fase de identificación del proyecto, donde se trataría de conocer cómo es a disponibilidad de terrenos, si existen o no muchas opciones y de qué características son. En esta fase se realizaría una primera preselección de los terrenos aparentemente más idóneos, y, posteriormente, durante los estudios de prefactibilidad, se pasaría a una segunda fase de estudio detallado de sus características de los terrenos y de su integración con la red de saneamiento.
- Para los estudios iniciales pueden resultar especialmente útil el empleo de listas patrón y sistemas de información geográfica, que permiten realizar un cribado rápido.
- El empleo de GIS en las primeras fases permite realizar un análisis general de toda el área disponible (generalmente, de todo el término municipal) y obtener una preselección de un pequeño número de terrenos (se recomienda que sean, al menos, tres).
- Posteriormente, en una segunda fase, se realizará un análisis más concreto en los terrenos preseleccionados, pudiéndose seguir metodologías de análisis multicriterio para asegurar un procedimiento de selección más ordenado y transparente

6. REFERENCIAS

- BOE, 1961. Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas.
- Carreño Morales, R., Carreño Morales, S., Alegre Fidalgo, P., 2013. Metodología para la búsqueda de emplazamientos idóneos para sistemas de fitodepuración de aguas residuales en el medio rural gallego. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Galicia.
- CEDEX, 2022. Recomendaciones para proyectos de saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Selección de tecnologías de tratamiento.
- CEDEX, 2021. Recomendaciones para la elaboración de planes de saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Metodologías para la estimación de costos de tratamiento de aguas residuales en la planificación sectorial.
- CEDEX, 2010. Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas.
- CEDEX, 2009. Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano, 3ª Edición. ed.
- CEDEX, CENTA, 2016. Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CEDEX, CENTA, 2010. Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- CENTA, CEDEX, 2021. Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, Bolivia.
- CTE, 2019. Código Técnico de la Edificación. Documento básico de seguridad estructural. Ministerio de Vivienda, España.
- Deepa, K., Krishnaveni, M., 2012. Suitable Site Selection of Decentralised Treatment Plants Using Multicriteria Approach in GIS. *Journal of Geographic Information System* 04, 254–260. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.43030>
- Del Río, I., 2020. Presentación del Estudio de soluciones del saneamiento y depuración en las aglomeraciones urbanas de La China, Butarque y Sur.
- Gobierno de Guatemala, 2006. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.
- González de Vallejo, L., 2004. Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall.
- Grossi Gallegos, H., Righini, R., 2012. Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16.
- IGME, 2003. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Fundamentos y casos prácticos. Instituto Geológico y Minero de España.
- Jajac, N., Marović, I., Rogulj, K., Kilić, J., 2019. Decision support concept to selection of wastewater treatment plant location-the case study of Town of Kutina, Croatia. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11040717>

- Junta de Andalucía, 2023. Actualización de la base de costes de la construcción de Andalucía (BCCA). Julio de 2023 [WWW Document]. URL <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoarticulaciondelterritorioyvivienda/areas/vivienda-rehabilitacion/planes-instrumentos/paginas/bcca-jul-2023.html> (accessed 4.17.24).
- Kerpelis, P.N., Alexakis, D.E., Golfopoulos, S.K., 2022. A Qualitative Approach to the Seismic Estimation of Wastewater Treatment Plants and Potential Impacts on the Hydrosphere. *Water* (Switzerland) 14. <https://doi.org/10.3390/w14203225>
- Kerpelis, P.N., Golfopoulos, S.K., Alexakis, D.E., Repapis, C.C., 2023. Non-structural and operational parameters for the estimation of seismic vulnerability of wastewater treatment plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05046-w>
- Lanzano, G., De Magistris, F.S., Salzano, E., Fabbrocino, G., 2014. Vulnerability of industrial components to soil liquefaction. *Chem Eng Trans* 36, 421–426. <https://doi.org/10.3303/CET1436071>
- López Monllor, C., 2022. Análisis de alternativas y selección de sistemas de depuración, in: XXXIX Curso de Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras. CEDEX.
- Mansouri, Z., Moghaddas, N.H., Dahrazma, B., 2013. Wastewater treatment plant site selection using AHP and GIS: a case study in Falavarjan, Esfahan. *JGeope* 3, 63–72.
- MARN, 2010. Acuerdo Gubernativo 51/2010. Reglamento de vertidos para cuerpos receptores de la cuenca del Lago de Atitlán y su entorno.
- MDSMA, 1995. Reglamento en materia de contaminación hídrica. Bolivia.
- Memon, B.A., Mumtaz Azmeh, M., Pitts, M.W., 2002. The environmental hazards of locating wastewater impoundments in karst terrain.
- NCSR-02, 2009. Norma de Construcción sismorresistente. Parte General y Edificación . Ministerio de Fomento.
- NTON 05 027-05, 2006. Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para Regular los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y su Reúso.
- Oakley, S., 2021. Manejo integrado de aguas residuales dentro y fuera la cuenca del Lago Atitlán. *Agua, Saneamiento y Ambiente* 16, 46–63.
- RTS 13.05.01:18, 2018. Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.05.01:18. Agua. Aguas residuales. Parámetros de calidad de aguas residuales para descarga y manejo de lodos residuales.
- Shahmoradi, B., Isalou, A.-A., 2013. Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak, Iran Citation: Shahmoradi B, Isalou AA. Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak Introduction I, Iran. *J Adv Environ Health Res*.
- TRAGSA, 2023. Tarifas. Importe de obras, trabajos y proyectos [WWW Document]. URL <https://www.tragsa.es/es/grupo-tragsa/regimen-juridico/tarifas/Paginas/default.aspx> (accessed 4.17.24).
- UNE 104421:1995, 1995. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de polietileno de

alta densidad (P.E.A.D.) o láminas de polietileno de alta densidad coextruido con otros grados de polietileno.

VEOLIA, TECNICASA, 2013. Estudio de factabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario de la ciudad de Bluefields.

Wagner, W., 2010. Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia.

ANEXO I. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA EL PROCESO DE IDENTIFICACION Y SELECCIÓN DE TERRENOS

La información necesaria para realizar la identificación y selección de terrenos adecuados puede venir de varias fuentes o será necesario realizar estudios específicos para obtenerla.

I.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

A partir de la cartografía existente de la zona y de las imágenes aéreas y su evolución histórica, que hoy en día resulta de enorme facilidad conocer a través de los servicios gratuitos disponibles por internet, se puede obtener información muy valiosa para el estudio, como puede ser:

- Modelo de elevaciones de la zona y delimitación de cuencas y vertientes
- Usos del suelo y evolución en los usos
- Zonas húmedas e inundables. En algunos países empieza a haber cartografía de zonas inundables o a través de la revisión de imágenes históricas.
- Geología que, aunque no sea geotecnia, aporta cierta información sobre lo que se puede esperar.

I.2 ASPECTOS NORMATIVOS

Debe realizarse un análisis de la normativa vigente que condicionaría la selección del terreno de forma directa y de aquella que siendo de aplicación al proyecto también condicione el terreno.

Entre la norma que afecte de manera al terreno estaría toda la referente a limitaciones de uso y zonas protegidas, así como la normativa general y particular de urbanismo (planes de desarrollo urbano), si existiera. Si no hay normas de obligado cumplimiento en materia de urbanismo, en muchos lugares existen planes indicativos de desarrollo y ordenación urbana elaborados por las municipalidades que deberían ser respetados. Entre este tipo de normas resulta de especial transcendencia la legislación sobre expropiación forzosa que exista en el país y su capacidad real de ser llevada a la práctica.

Además de esta legislación de carácter general, como ya se ha mencionado, hay países que regulan de manera específica los terrenos de las PTAR, imponiendo distancias de estas instalaciones a las poblaciones, así como unas superficies mínimas.

Desde el punto de vista del tratamiento y del proyecto debe analizarse la existencia de zonas protegidas que impongan valores límite más estrictos, bien sea por sus características ambientales o por los usos realizados aguas abajo.

También debe analizarse la normativa general del país o los planes de desarrollo que puedan tener incidencia en el área del proyecto, de forma que no se produzcan interferencias entre estos planes y el proyecto.

Normativa de expropiación forzosa en España y América latina

De ser necesaria la expropiación de los terrenos, debe analizarse la ley de expropiación forzosa en el país objeto del proyecto, pues puede condicionar la fecha de comienzo de las obras y puesta en servicio de estas.

Las leyes de expropiación forzosa analizadas son muy similares en el procedimiento expropiatorio pero difieren en los plazos.

Se realiza un análisis de las leyes de expropiación en algunos países teniendo en cuenta las siguientes normas:

- Argentina: Ley 21.499 de expropiaciones.
- España: Ley de 16 de diciembre de 1954 de expropiación forzosa.
- Guatemala: Decreto No. 529, por el que se aprueba la Ley de Expropiación.
- México: Ley de Expropiación de 1936.
- Nicaragua: Decreto No. 581, por el que se aprueba la Ley de Expropiación.
- Perú: Texto Único Ordenado del Decreto Legislativo n° 1192, decreto legislativo que aprueba la ley marco de adquisición y expropiación de inmuebles, transferencia de inmuebles de propiedad del Estado, liberación de interferencias y dicta otras medidas para la ejecución de obras de infraestructura.
- República Dominicana: Ley 344 que establece un procedimiento especial para las expropiaciones intentadas por el Estado, el Distrito de Santo Domingo o las Comunes.

En primer lugar, la expropiación debe estar basada en una causa objetiva de utilidad pública o interés social. La diferencia entre uno y otro es que la utilidad pública está relacionada con el buen funcionamiento de una administración pública, mientras que por interés social se entiende cualquier interés prevalente al individual. La legislación de Argentina y México, en principio solo permite la expropiación por causa de utilidad pública, incluyen en este concepto el interés social al permitir beneficiarios distintos de las administraciones públicas. En el caso de Perú se establece que el único beneficiario es el Estado, aunque se permite explícitamente que actúe a través de “*empresas prestadoras de servicios de saneamiento públicas de accionariado estatal o municipal*”.

En cualquier caso, la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales es una causa justificada de la expropiación.

I.3 ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

También deben tenerse en cuenta los aspectos administrativos que puedan condicionar la viabilidad del proyecto. Los más importantes están relacionados con el costo de la adquisición del terreno, las expropiaciones de los terrenos necesarios y la tramitación del proyecto.

En ocasiones se pueden adquirir los terrenos de mutuo acuerdo, este suele ser el procedimiento más rápido y con menos rechazo social porque no hay partes perjudicadas. Si la administración o la empresa prestadora del servicio dispone de un terreno de características similares al seleccionado, puede proponerse realizar una permuta. En otras ocasiones el acuerdo con los propietarios de los terrenos no es posible, por lo que se debe recurrir a la expropiación. Si esto ocurre, deben analizarse los procedimientos de expropiación forzosa del país en cuestión y estimar la duración total del procedimiento, ya que estos suelen ser largos y complejos.

Además, debe realizarse una estimación realista de los costos de adquisición de estos terrenos, para evitar sobrecostos inesperados.

En cualquier caso, y con objeto de evitar la especulación, debe tenerse claro que la adquisición de los terrenos debe realizarse a precios de mercado, y que es preferible seleccionar un terreno algo menos adecuado, comprado a precios de mercado, que premiar conductas abusivas que hacen uso de información privilegiada para obtener un beneficio económico ilícito.

I.4 ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS, TOPOGRÁFICOS Y GEOTÉCNICOS EN LOS TERRENOS

El terreno o terrenos que se plantean para la construcción de la PTAR deben de caracterizarse adecuadamente. Los aspectos que hay que determinar entre otros incluyen los estudios hidrográficos, topográficos, geotécnicos, nivel freático, distancia a zonas habitadas, etc.

Es una práctica habitual en muchos países realizar los estudios de alternativas, de terreno y de tecnología de tratamiento, sin haber hecho previamente los estudios topográficos y geotécnicos, que se dejan para la fase de diseños finales. Esto es un error metodológico importante puesto que, si los estudios deben hacerse, lo mejor es realizarlos previamente al estudio de alternativas, asegurando así mayor precisión en las conclusiones del mismo.

El levantamiento topográfico se realiza en la localidad y su entorno, aportando más detalles en las zonas donde está previsto construir las infraestructuras, colectores, estaciones de bombeo, emisario y alternativas de terrenos contemplados para la construcción de la PTAR.

En este sentido, el primer trabajo de esta serie fue una Guía con las metodologías para integrar los distintos estudios en la selección de alternativas de tratamiento (CEDEX, 2022; López Monllor, 2022). En ella se incidió en la importancia de estos estudios, y en el nivel de desarrollo requerido, dado que la caracterización de los terrenos es fundamental para evitar errores en la estimación de los costos de ejecución y operación y mantenimiento así como en el proceso de análisis y selección de alternativas. En el Anexo I de la Guía de selección del alternativas se realiza un análisis más detallado del contenido y la integración de estos estudios desde un punto de vista general.

I.5 ASPECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS CON LA UBICACIÓN DEL TERRENO

La información del apartado anterior, junto con los planos de desarrollo urbanístico de la ciudad constituye la información de base, que permitirá la configuración del sistema (trazado de los colectores, ubicación de las estaciones de bombeos, situación de la PTAR y puntos de vertido).

Se deben estudiar todos los condicionantes técnicos adicionales propios de cada alternativa propuesta que se han mencionado en esta guía, siendo necesario en todos los casos analizar los posibles trazados de colectores hasta la planta y de emisarios de vertido desde esta hasta el medio receptor o zona de reúso.

En ocasiones va a ser también necesario realizar mejoras previas en las infraestructuras de la localidad. Puede que, previamente a la construcción de la planta, se deba realizar un proyecto de adecuación o construcción de accesos, de manera que posteriormente se pueda realizar la obra.

Si existe sistema de saneamiento, puede ser necesario realizar obras de acondicionamiento y mejora de algunas construcciones, o incluso el rediseño de parte de la red existente para facilitar la conducción hasta la nueva planta.

Además, se deben analizar los distintos escenarios de expansión de la población a largo plazo, pues las PTAR son infraestructuras con un periodo considerable de vida útil, de al menos 20 años, y que no se pueden trasladar una vez que se ha construido.

ANEXO 2. LISTA PATRÓN EN LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

IDENTIFICACIÓN DEL TERRENO [identificación]	
Superficie del terreno	
Análisis necesarios: Se determinarán valores de superficie mínima en función de las características de las aguas residuales a tratar (o de la población si no se conoce) y de la temperatura media del mes más frío para albergar tratamientos intensivos y extensivos, así como para posibles instalaciones auxiliares y ampliaciones futuras	
¿La superficie del terreno es suficiente para realizar un tratamiento extensivo?	
¿La superficie del terreno es suficiente para realizar un tratamiento intensivo?	
Disponibilidad del terreno	
¿El terreno es propiedad de la municipalidad o de la entidad prestadora del servicio?	
No es propiedad de la municipalidad ni de la entidad prestadora pero su adquisición se prevé sencilla	
Los costos de adquisición del terreno no son tan elevados como para ser un factor limitante en la elección de la tecnología de tratamiento	
Es posible adquirir terrenos contiguos para realizar posibles ampliaciones de la planta	
Diferencia de cotas con la población	
Análisis necesario: Estimar las cotas del terreno y las previsibles de salida de la población, así como la elevación necesarias de los bombeos para llegar a la planta	
¿Es posible la llegada de las aguas residuales a la planta por gravedad? Cota del terreno en su parte más alta en relación con la cota de salida del emisario de la población.	
¿Se debe realizar un bombeo para asegurar la llegada de las aguas residuales a la planta? Indicar una estimación del porcentaje del caudal que se debe bombear.	
Emisario hasta el terreno	
Análisis necesario: Estimar el posible trazado del emisario hasta la PTAR	
El trazado del emisario desde la población hasta la planta se puede realizar sin incurrir en costos excesivos de movimiento de tierras	
El terreno donde van a estar alojadas dichas tuberías no es demasiado accidentado	

Vertido cercano al terreno	
Es posible el vertido de las aguas tratadas sin realizar bombeos intermedios	
La distancia hasta el punto de vertido en cuerpo receptor	
El punto de vertido no se encuentra en una zona con protección medioambiental	
No existe una zona con protección medioambiental aguas abajo del punto de vertido a una distancia tal que condicione el tratamiento a aplicar	
Usos actuales del terreno	
Baldío/matorral	
Tierra de cultivo	
Suelo urbano	
Otros uso (vertedero, acopio de materiales, etc.) Especificar	
Uso de los terrenos vecinos	
Distancia a la población y otras actividades	
El terreno seleccionado se encuentra a una distancia de núcleo de población o a cualquier actividad sensible al que va a dar servicio de entre 500 y 5 000 m	
El núcleo de población o actividad sensible más cercana se encuentra a una distancia inferior a 500 m	
Características básicas del terreno	
El terreno es llano o con desniveles moderados	
El terreno presenta desniveles considerables pero se puede realizar el tratamiento sin sobrecostos excesivos de bombeos o movimiento de tierras	
El terreno presenta desniveles excesivos y su adecuación a la mayoría de los tratamientos exigiría unos sobrecostos desproporcionados de manera que la elección del terreno condicionaría el tipo de tratamiento a elegir	
El tipo de suelos del terreno es aparentemente adecuado para todas o la mayoría de las técnicas de tratamiento. Los costos unitarios de movimiento de tierras no se prevén excesivos debido al tipo de suelo	
El terreno está formado por rocas inalteradas o similar de manera que el movimiento de tierras sea difícil o sus costos unitarios anormalmente altos	
El terreno no es adecuado para la ubicación de una planta de tratamiento (suelos de relleno, contenido excesivo de materia orgánica, problemas de expansividad, etc.)	

Si se conoce por actuaciones en la cercanía, nivel de capa freática o si ésta se encuentra por debajo de la cota de cimentación	
Existe una capa freática y es posible que se encuentre por encima de la cota de cimentación si se realizan parte de las instalaciones bajo la cota del terreno	
La cota máxima del nivel freático se encuentra casi a nivel de superficie o aparecen surgencias del nivel freático en el terreno o en otros cercanos situados a una cota similar	
El terreno no se encuentra en una zona inundable	
El terreno se encuentra parcialmente en zona inundable y sería posible construir obras de defensa sin incurrir en costos excesivos	
El terreno se encuentra totalmente en zona inundable o no sería posible construir obras de defensa sin incurrir en costos excesivos	
Conexiones	
Existe un tendido de red eléctrica al que se puede conectar la PTAR a menos de 1 000 metros	
Existe un tendido de red eléctrica al que se puede conectar la PTAR a una distancia entre 1 000 y 5 000 metros	
No existe un tendido de red eléctrica al que se pueda conectar la PTAR a una distancia menor a 5 000 metros	
Se puede conectar la PTAR a la red de agua potable sin incurrir en costos excesivos	
Existe un camino pavimentado que permite el paso de camiones hasta la PTAR o sus inmediaciones	
Existe un camino no pavimentado que permite el paso de camiones hasta la PTAR o sus inmediaciones durante todo el año	
Existe un camino hasta la PTAR y sus inmediaciones pero no permite el paso de camiones durante todas las estaciones, por lo que tendría que adecuarse.	
No existe camino de acceso hasta la PTAR o sus inmediaciones	

ANEXO 3. VALORACIÓN EN LA FASE DE ESTUDIOS PREVIOS

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
I. INCIDENCIA EN LA SOSTENIBILIDAD TÉCNICA			
a. Superficie disponible			
b. Bombeos necesarios			
II. INCIDENCIA SOBRE LOS COSTOS Y COMPLEJIDAD DE CONSTRUCCIÓN			
1. Costos de adquisición de los terrenos			
2. Costos de servidumbres de paso			
3. Costos de instalación de bombeos			
a. Costos del bombeo hasta la planta			
b. ¿Pueden ser necesarios bombeos en el interior de la planta?			
4. Costos de canalizaciones y tuberías			
a. Costo del emisario desde la población a la PTAR			
b. Costo del emisario de salida			
5. Costos de acondicionamiento del terreno y complejidad de la construcción asociada			
a. Por tipo de suelo			
b. Por nivel freático			
c. Cubierta vegetal y número de árboles a talar donde sea relevante y diferenciador			
d. Costo del movimiento de tierras			
6. Costos de las obras de defensa contra las inundaciones			
7. Costos de conexión a la red eléctrica			
8. Costos de conexión a la red de abastecimiento de aguas			
9. Costo de los accesos			
a. Costos de construcción de nuevos accesos			

b. Costos de acondicionamiento de los accesos existentes			
III. INCIDENCIA SOBRE LOS COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO			
a. Repercusión diferencial por limitación de tecnologías extensivas o de algún tipo			
b. Costos de bombeos necesarios			
IV. INCIDENCIA EN LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL			
1. Características del punto de vertido			
a. Límites de emisión en el punto de vertido			
b. Sensibilidad ambiental de la zona de descarga			
c. Usos afectados aguas abajo			
2. Características ambientales del entorno			
3. Consumo energético derivado de la ubicación			
V. INCIDENCIA EN LA SOSTENIBILIDAD SOCIAL			
a. Cercanía a núcleos de población			
b. Cercanía a actividades sensibles			
c. Existencia de otros usos potenciales para el terreno			

En cada caso concreto se recomienda seguir la siguiente metodología:

- Asignar un peso relativo a cada uno de los grandes criterios de sostenibilidad. En general, los más importantes suelen ser la sostenibilidad técnica y económica, que están además muy relacionados, pero dependiendo de la situación pudiera ser de igual importancia o, incluso, mayor, la sostenibilidad ambiental o social.
- Asignar un peso relativo a cada factor dentro de los grandes criterios.
- Valorar de forma relativa cada una de las alternativas para cada factor.
- Obtener las valoraciones finales por ponderación de las valoraciones relativas y suma de resultados.

Los resultados de esta primera valoración, al tratarse de las primeras fases del proyecto pueden no ser definitivos, pero con una matriz de este tipo se puede tener una primera noción de cuáles son las ventajas y problemas que puede presentar cada una de las opciones de terreno.