

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



MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES, UNIÓN EUROPEA Y COOPERACIÓN



MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Confederación de Directores Ibero-Americanos de Agua | Conferencia de Directores Ibero-Americanos del Agua

© AECID 2021

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

Av. Reyes Católicos, 4

28040 Madrid, Spain

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: 109-21-095-6

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: Carlos López Monllor, Ignacio del Río Marrero y Esther García Sastre Andrés. Área de Tecnología del Agua del Centro de Estudios Hidrográficos.

Diseño original y maquetación:

CEDEX

Email:

dfcas@aecid.es

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	GLOSARIO	4
3	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE COSTOS	6
3.1	PRECISIÓN REQUERIDA	6
3.2	MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE COSTOS	7
3.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE COSTOS	11
4	PARTICULARIDADES DE LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE PTAR EN PLANIFICACIÓN	13
4.1	UTILIZACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE COSTOS EN ESTUDIOS DE PLANIFICACIÓN	13
4.2	VARIABILIDAD DE LAS PTAR	14
4.3	LAS CURVAS DE COSTO	15
4.4	EL ALCANCE DEL PLAN	16
4.5	LA NATURALEZA DE LAS ACTUACIONES DEL PLAN	17
4.6	ACTUACIONES SINGULARES	22
5	INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DE CÁLCULO	26
5.1	PLANTEAMIENTO GENERAL	26
5.2	ESTRATIFICACIÓN	27
5.2.1	VARIABLES A CONSIDERAR EN LA CONFORMACIÓN DE ESTRATOS	28
5.2.2	ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA DEFINICIÓN DE LA LÍNEA DE TRATAMIENTO PREDOMINANTE	33
5.3	DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE CURVAS	35
6	CURVAS A PARTIR DE DATOS REALES	38
6.1	RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN	38
6.2	ACTUALIZACIÓN DE COSTOS	41
6.3	IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE “OUTLIERS”	42
6.4	OBTENCIÓN DE LA CURVA DE COSTOS	43
7	CURVAS TEÓRICAS	45
7.1	REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE CURVAS DISPONIBLES	45
7.2	ELABORACIÓN DE CURVAS TEÓRICAS	46
8	RELACIÓN CURVAS TEÓRICAS Y CURVAS REALES	52
9	UTILIZACIÓN DE CURVAS DE APOYO ELABORADAS PARA OTRAS SITUACIONES	55
9.1	IDENTIFICACIÓN DE CURVAS DE REFERENCIA	55
9.2	FACTORES A TENER EN CUENTA PARA LA SELECCIÓN DE LA CURVA DE REFERENCIA	59
10	AJUSTE DE CURVAS	65
10.1	AJUSTE A PARTIR DE DATOS REALES	65

10.2	AJUSTE CON COEFICIENTES RAZONADOS	66
11	<u>ESTIMACIÓN FINAL DE COSTOS Y CONTRASTE DE CURVAS</u>	<u>73</u>
12	<u>REFERENCIAS</u>	<u>75</u>
	<u>APÉNDICE I: AMPLIACIÓN DE CIFRAS SIGNIFICATIVAS EN LOS COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE</u>	<u>76</u>
	<u>ANEXO I: CURVAS DE REFERENCIA DISPONIBLES</u>	<u>77</u>

CASOS EJEMPLO

BOX 1. EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE COSTOS DE TUBERÍA	9
BOX 2. EJEMPLO DE MAYORACIÓN DEL COSTO DE PTAR	17
BOX 3. EJEMPLOS DE NORMATIVA PROGRESIVA	19
BOX 4. EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE COSTOS DE MEJORA DEL TRATAMIENTO PARA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES	21
BOX 5. SECTORIZACIÓN DEL PLAN NACIONAL DE AGUA Y SANEAMIENTO DE EL SALVADOR	23
BOX 6. DIFERENCIAS GENERADAS POR EL CONTEXTO SOCIOECONÓMICO	31
BOX 7. EJEMPLO DE ELABORACIÓN DE CURVA DE COSTO PROMEDIO	34
BOX 8. ACTUALIZACIÓN DE COSTOS EN MOMENTOS DE INFLACIÓN EXTRAORDINARIA	41
BOX 9. NORMATIVAS EN LATINOAMÉRICA	48
BOX 10. EJEMPLO DE SELECCIÓN DE CURVAS DE REFERENCIA	62
BOX 11. EJEMPLO DE AJUSTE DE CURVA DE REFERENCIA	68

FIGURAS

FIGURA 1. A) CURVA DE COSTOS OBTENIDA A PARTIR DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA. B) CURVA DE COSTOS OBTENIDA A PARTIR DE MÉTODO DE ESTIMACIÓN TEÓRICA	16
FIGURA 2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE EXCRETAS DE TITANYEN, EN SITUACIÓN DE ABANDONO EN EL AÑO 2019 (PUERTO PRÍNCIPE, HAITÍ)	18
FIGURA 3. EJEMPLO DE ESTRATIFICACIÓN	28
FIGURA 4. PTAR DE ARROYO CULEBRO CUENCA BAJA. FUENTE: CANAL DE ISABEL II	30
FIGURA 5. PTAR DE KONANI, ALTIPLANO BOLIVIANO	31
FIGURA 6: PTAR EN DESARROLLO URBANÍSTICO PRIVADO, PANAMÁ	32
FIGURA 7. ÁRBOL DE DECISIÓN PARA LA DEFINICIÓN DEL CAMINO METODOLÓGICO MÁS ADECUADO PARA CADA ESTRATO	36
FIGURA 8. IDENTIFICACIÓN DE “OUTLIERS”	42
FIGURA 9. IDENTIFICACIÓN DE “OUTLIERS” POR COMPARACIÓN CON LA CURVA TEÓRICA	43
FIGURA 10. A) REPRESENTACIÓN EN ESCALA NORMAL. B) REPRESENTACIÓN EN DOBLE ESCALA LOGARÍTMICA	44
FIGURA 11. CURVA DE COSTO CON SOLAPAMIENTOS POR CAMBIO TECNOLÓGICO EN EL TRATAMIENTO PRIMARIO	47
FIGURA 12. CURVAS REAL Y TEÓRICA DE PROCESOS DE FILTROS PERCOLADORES EN ESPAÑA	52
FIGURA 13. CURVAS REAL Y TEÓRICA DE PROCESOS DE FANGOS ACTIVOS EN ESPAÑA	53
FIGURA 14. CURVAS REAL Y TEÓRICA DE PROCESOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN ESPAÑA	54
FIGURA 15. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 1 RAFA+FP”	57
FIGURA 16. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 2 FP”	57
FIGURA 17. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 3 AE”	57
FIGURA 18. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 4 LAG”	58
FIGURA 19. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 5 HUM”	58
FIGURA 20. COMPARATIVA DE LAS CURVAS REALES DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 3 AE”	58
FIGURA 21. COMPARATIVA DE LAS CURVAS REALES DISPONIBLES PARA LA “LÍNEA 4 LAG”	59
FIGURA 22. AJUSTE DE CURVA DE REFERENCIA A PARTIR DE DATOS REALES EN ESCALA NORMAL	66

FIGURA 23. AJUSTE DE CURVA DE REFERENCIA A PARTIR DE DATOS REALES EN DOBLE ESCALA LOGARÍTMICA 66

TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE ESTIMACIÓN DE COSTOS PROPUESTA POR AACE. FUENTE: AACE, 2020	7
TABLA 2. RANGOS POBLACIONALES DE LAS CURVAS DISPONIBLES	60
TABLA 3. CONDICIONES AMBIENTALES CONSIDERADAS EN LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS TEÓRICAS DISPONIBLES	60
TABLA 4. COMPARATIVA DE PRECIOS DE DIFERENTES UNIDADES DE OBRA Y EQUIPOS EN ESPAÑA, EL SALVADOR Y BOLIVIA (USD ACTUALIZADOS A 2019)	61
TABLA 5. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD ENTRE CURVAS TEÓRICAS Y REALES	67

I INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La protección de la calidad de los recursos hídricos constituye una de las grandes prioridades a nivel mundial, tal y como reflejan los Objetivos de Desarrollo Sostenible y, en concreto, el ODS 6 - Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. La meta 6.3 plantea de aquí a 2030 *mejorar la calidad del agua mediante: la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de productos químicos y materiales peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y el aumento sustancial del reciclado y de la reutilización sin riesgos a nivel mundial*. Esta meta destaca la importancia de reducir y controlar los vertidos al medio y, por tanto, implica la necesidad de contar con marcos regulatorios que contribuyan al cumplimiento de dicho fin.

En los países de Latinoamérica se han experimentado algunos progresos sustanciales en tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, aún queda mucho por resolver. De hecho, la meta 6.3, se valora por todo el sector en la región como una de las más difíciles de alcanzar. Uno de los principales problemas que se ha encontrado en la región para poder afrontar de una manera adecuada el desarrollo necesario es la carencia de una planificación adecuada que tome en consideración todos los aspectos que es necesario desarrollar.

La evaluación de los costos necesarios es un componente básico de cualquier plan que conlleve el desarrollo de infraestructuras, ya que permite una programación del gasto realista, que vaya acompañada con los objetivos establecidos y con las posibilidades financieras. Sin embargo, puesto que el tratamiento de las aguas residuales es uno de los servicios cuyo desarrollo se encuentra más retrasado, en muchos países de la región se carece de información fiable sobre sus costos y las variables que los condicionan, lo que limita la calidad de los estudios que puedan desarrollarse para el plan.

Existen diferentes procedimientos para la estimación de costos de infraestructuras y la idoneidad de utilizar un método u otro va a depender del fin para el que se requiere, pero también de diferentes factores limitantes, como la disponibilidad de información o de los recursos humanos suficientes para realizar la estimación. En cada caso se debería tratar de llegar a la mejor estimación posible teniendo en cuenta estos factores. No obstante, la experiencia muestra que con frecuencia se emplean métodos poco homogéneos o poco apropiados. En concreto en la estimación de costos de PTAR en planificación es habitual que no se tengan en cuenta métodos homogéneos ni contrastados, llegando a resultados engañosos que, en muchos casos, generan una minusvaloración del esfuerzo inversor. De esta forma la planificación nace ya condenada a no poder cumplir con los objetivos establecidos.

En este contexto, poder contar con metodologías y herramientas que puedan ayudar a alcanzar una estimación de costos lo más realista posible en los procesos de planificación que se están abordando en la región, resulta de gran utilidad, y con este objetivo el Departamento del Fondo de Cooperación para el Agua Saneamiento (FCAS) de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) ha encargado al CEDEX la elaboración de esta guía.

En un marco amplio, esta monografía se desarrolla como complemento metodológico específico del documento “Recomendaciones para la elaboración de planes de saneamiento y tratamiento de

aguas residuales”, que en la actualidad se está elaborando también el CEDEX por encargo del FCAS y en el ámbito de la Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA).

Por otra parte, en el desarrollo de esta guía y de los planteamientos metodológicos que se exponen en la misma ha tenido una incidencia muy significativa los trabajos llevados a cabo por el CEDEX como parte del contrato con la Corporación Andina de Fomento (CAF) para la “Asistencia técnica para la elaboración del Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales” de Argentina, durante los años 2019 y 2020. Durante el desarrollo de los mismos fue posible afianzar los conceptos y las metodologías que propone este documento, así como ponerlas a prueba. De hecho, este caso de estudio se expone en algunos de los ejemplos de esta guía. Estos estudios concretos no podrían haber sido realizado sin la colaboración de los responsables de la CAF y de la Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento (DNAPYS) de Argentina.

Contenidos del documento

Esta monografía se divide en dos partes. La primera, que abarca los capítulos 3 y 4, aborda los aspectos básicos de la estimación de costos de PTAR en planes de inversión. En el primer capítulo se describen consideraciones de carácter más general sobre estimación de costos y en el segundo las particularidades de esta estimación de costos concretamente para PTAR en procesos de planificación.

La segunda parte, que abarca el resto del documento, se centra básicamente en aspectos metodológicos, proponiéndose una serie de procedimientos para la elaboración de las curvas de costos de PTAR en procesos de planificación, así como algunos ejemplos de su aplicación. En concreto el capítulo 5 es la introducción de lo que se desarrolla posteriormente, incluyendo la estratificación como modo de afrontar la gran variabilidad de costos que presentan las PTAR, e introduciendo un árbol de decisión para orientar con respecto a qué metodología utilizar en función de la información disponible y de los recursos humanos con los que se cuente para su procesamiento. A continuación se describen las metodologías propuestas (capítulos 6 al 10), que por su entidad cuentan con categoría de capítulo. Y es en éstos donde se hace el aporte más importante de este documento, que es dar soluciones para poder estimar costos cuando no se dispone de una información mínima. Para ello se ha desarrollado una metodología que toma de base curvas de costos desarrolladas en otros países y para lo que se aporta diversa información de base que se expone en detalle en el Anexo I. Por último, el capítulo 11 expone algunos aspectos a tener en cuenta ya en estimación final de costos y en el contraste de las curvas obtenidas.

Se considera importante reseñar que en un plan de infraestructuras ha de estimarse el costo tanto de inversión como de explotación, con el objeto de poder prever las necesidades de recursos a lo largo de todo el plan y habilitar las fuentes de financiación adecuadas. Las metodologías propuestas en este documento se centran en la estimación de costos de inversión en PTAR, sin entrar en el detalle de los de operación y mantenimiento. No obstante se considera relevante indicar que es muy importante tener estos últimos en consideración, además de para prever las necesidades de recursos, para asegurar que las líneas de tratamiento que se proponen en la evaluación de los costos de inversión son acordes a la capacidad de pago de la población y que, de este modo, se consiga un servicio sostenible.

Agradecimientos

Además de los técnicos de la AECID y del CEDEX que han intervenido, se debe agradecer el apoyo prestado a Carlota Real y Franz Rojas, de la CAF, para poder aplicar las metodologías que se

presentan y especialmente a José María Regueira y Emiliano Aguerreberry, de la DNAPYS por su colaboración en los trabajos de aplicación en Argentina, que han sido de enorme utilidad para el desarrollo de las mismas.

2 GLOSARIO

AACE:	American Association of Cost Engineering
AE:	Aireación Extendida
AECID:	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ANDA:	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador
ARG:	Argentina
ARS:	Peso argentino
BOB:	Boliviano (moneda oficial Bolivia)
BOL:	Bolivia
CAF:	Confederación Andina de Fomento
CEDEX:	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CF:	Coliformes fecales
CODIA:	Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua
DBO₅:	Demanda biológica de oxígeno en cinco días
DNAPYS:	Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento de Argentina
DQO:	Demanda química de oxígeno
ELS:	El Salvador
ENTAR:	Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Bolivia
ESP:	España
EUR:	Euro
FCAS:	Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento
FP:	Filtros percoladores
HUM:	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial
IFAS:	Proceso de lodos activos mixto, en suspensión y en lecho fijo
LAG:	Lagunas de estabilización
MBBR:	Reactor biológico de lecho móvil
MBR:	Reactor biológico de membranas
NILSA:	Navarra de Infraestructuras Locales, S.A.
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PNTAR:	Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Argentina
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales. Entendidas en este texto como aguas residuales provenientes de poblaciones.
PRFV:	Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio
RAFA:	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Ud: Unidad

USD: Dólar estadounidense

3 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE COSTOS

3.1 PRECISIÓN REQUERIDA

Es evidente que cualquier estimación presupuestaria es aproximada, puesto que no se conoce el costo real de un proyecto hasta que la obra se ha ejecutado por completo. El grado de aproximación requerido para la estimación va a depender del tipo de estudio que se esté desarrollando y, en definitiva, de las consecuencias que tenga dicha estimación. Generalmente, la precisión requerida es muy alta en el proyecto de ejecución, pero se va a ir reduciendo según el alcance del estudio se hace más general, hasta la planificación.

Cuando se licita la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo ideal sería contar con un proyecto donde se hayan estudiado todos los aspectos que la condicionan y haya llegado a medir y presupuestar todas las partidas necesarias con precios de mercado, ya que desviaciones significativas de la estimación de presupuestos pueden causar graves trastornos en la ejecución.

En la fase de estudios previos, para la selección de alternativas de ese proyecto, el objetivo sería poder estimar los costos de cada una de las opciones de tratamiento propuestas, teniendo en cuenta las principales variables que en ese emplazamiento podrían llegar a condicionar su costo (costo de materiales o equipos, características del terreno, disponibilidad de accesos, etc.). Lo más importante en ese nivel de estudio es poder comparar las alternativas y no tanto la precisión en la estimación de costos de cada una. Por tanto, debería asegurarse que todas las alternativas se valoran de manera homogénea y que se consideran los elementos que pueden condicionar los costos debido a las singularidades locales, tanto en la obra civil como en los equipos electromecánicos.

Antes de esta fase de estudios de preinversión, en muchos casos hay un paso previo, generalmente conocido como identificación del proyecto, que va a requerir también de una primera estimación de costos para que se tenga en cuenta presupuestariamente por parte de las entidades financiadoras. En ese momento, aunque lógicamente no se han podido hacer todavía los estudios oportunos y, de hecho, en muchos casos no se conoce todavía ni el lugar de emplazamiento de la PTAR, es conveniente contar con una metodología que facilite la estimación de costos con cierto margen de seguridad. En algunos países e instituciones la autorización presupuestaria para el proyecto se realiza en ese instante y posteriormente no se puede o es muy difícil de modificar, por lo que en estos casos resulta especialmente importante contar con un margen de seguridad suficiente en la estimación, que evite poner en riesgo la ejecución de la obra. En estos casos se podría partir de un diseño tipo, que considerara algunos parámetros de fácil obtención, como variables climatológicas, dotación o carga contaminante unitaria, que permitan una aproximación al costo del proyecto. Además, si este paso supone la imposición de un límite presupuestario, sería muy conveniente aplicar ciertos coeficientes de seguridad.

Finalmente, en este camino de lo más detallado a lo más general, se llegaría al proceso de planificación nacional, donde se va a requerir también una estimación grosera del costo de las distintas actuaciones propuestas. En este caso la estimación de costos tiene dos objetivos principales:

- Poder contar con una valoración global del costo de las medidas que se han de implementar. El costo total del plan.

- Poder distribuir el costo entre anualidades realistas, de tal forma que adapte el desarrollo a los intereses o capacidades, con una estimación suficientemente acertada de lo que se ha de invertir cada año.

Además, sería deseable poder realizar otros análisis complementarios que pudieran ser interesantes para el plan, como la estimación de las inversiones por diferentes grupos o estratos (en cada región, por tamaño de población o por etnias, entre otros). En planificación la información de costos se maneja generalmente agregada y lo importante es contar con valores medios que sean lo más acertados posible. En consecuencia, no es necesario alcanzar mucha precisión en la estimación del costo de cada una de las actuaciones concretas, pero sí es necesario evitar el sesgo.

La siguiente tabla (AACE, 2020) muestra la clasificación de la estimación de costos propuesta por American Association of Cost Engineering (AACE), donde se puede apreciar cómo la metodología recomendable, así como la precisión esperada, dependen del objetivo que se persiga con la estimación.

Tabla 1. Clasificación de estimación de costos propuesta por AACE. Fuente: AACE, 2020

Tipo	Nivel avance proyecto (gasto ejecutado)	Objetivo de estimación	Metodologías típicas adoptadas	Precisión esperada
1	0-2%	Concepción del proyecto	Factor en función de la capacidad, modelos paramétricos, juicio de expertos, o analogía	Rango bajo: (-) 20-50% Rango alto: (+) 30-100%
2	1-15%	Estudio de factibilidad	Factor en función de los equipos necesarios o modelos paramétricos	Rango bajo: (-) 15-30% Rango alto: (+) 20-50%
3	10-40%	Autorización o control del presupuesto	Revisión detallada y desglosada de unidades de obra	Rango bajo: (-) 10-20% Rango alto: (+) 10-30%
4	30-75%	Control de ofertas/licitaciones	Revisión detallada y desglosada de unidades de obra	Rango bajo: (-) 5-15% Rango alto: (+) 5-20%
5	65-100%	Revisión de ofertas/licitaciones	Revisión detallada y desglosada de unidades de obra	Rango bajo: (-) 3-10% Rango alto: (+) 3-15%

3.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE COSTOS

Existen diferentes métodos para la estimación de los costos. Dependiendo del propósito de la estimación y de la disponibilidad de información, se podría usar uno o una combinación de estos métodos. En general, a medida que aumenta el nivel de definición del proyecto, la metodología de estimación tiende a progresar desde técnicas conceptuales paramétricas hacia técnicas deterministas.

A. Método de estimación detallado

Son estimaciones deterministas basadas en estudios detallados de las actuaciones, realización de mediciones de cada uno de los elementos y aplicación de costos unitarios. Cada actuación se descompone en elementos detallados para cuantificar los costos directos (personal, materiales, equipos, etc.). Los costos indirectos, los gastos generales y las contingencias se agregan según sea necesario. La estimación puede revisarse a medida que se refinan los detalles conocidos.

Las técnicas de estimación de costos unitarios o detallados se utilizan principalmente para estimaciones de propuesta o ejecución, una vez se haya realizado un dimensionamiento de las instalaciones. Su precisión va a depender del rigor de la información disponible, los recursos destinados para desarrollar la estimación de costos y la validez de las bases de la estimación.

Los métodos de estimación por costos unitarios o detallados tienen un nivel mayor de confianza y presentan numerosas ventajas, pero requieren de un tiempo y un costo muy elevado para su determinación.

En un ejercicio de planificación, cuando es necesario estimar el costo de muchas actuaciones, no podría abordarse una metodología de este tipo con carácter general. Lo cual no quiere decir que no pudieran tomarse en consideración estimaciones de este tipo realizadas previamente con otros fines para dar apoyo a los estudios o que algunas instalaciones muy singulares y con mucho peso en el plan general de inversiones no se puedan estudiar en más detalle, con una metodología propia.

B. Técnicas de estimación paramétrica

Para preparar estimaciones conceptuales tempranas y cuando hay poca información de detalle disponible, resultan más útiles los modelos paramétricos.

La estimación paramétrica consiste en elaborar funciones de estimación de costos que proporcionan relaciones entre variables independientes, como parámetros de diseño o características físicas, y el costo (la variable dependiente). Los modelos pueden ser muy simples, con una única variable independiente, como la capacidad de la infraestructura, o más complejos, donde se involucran varias variables independientes o generadoras de costos (características regionales, climatología, etc.).

Las estimaciones paramétricas necesitan de la recopilación y el análisis de datos de costos de proyectos anteriores o históricos para desarrollar las funciones. Son versátiles, adaptándose a cambios o a la obtención de nueva información y permiten un análisis de sensibilidad sencillo y una evaluación estadística. Por otra parte, han de contar con una base de datos depurada y puede llevar mucho tiempo equiparar el alcance de los datos o garantizar que los datos se hayan equiparado correctamente. Deben representar el "estado del arte", es decir, deben actualizarse periódicamente para contar con datos de costos que tomen en cuenta las tecnologías actuales.

Las técnicas pueden ser muy sencillas, partiendo de simples relaciones de analogía, donde se conoce el costo de una construcción y su valor se extrapola a otras en función de una medida de la unidad ejecutada (m^3 de capacidad o m lineales de tubería). También se pueden ir haciendo más complejas según se conoce la influencia de otras variables, como son la economía de escala (generalmente introducida como un factor en curvas de costo), las circunstancias locales o la tipología de las actuaciones.

En ocasiones se plantean modelos donde se diferencia entre los costos asociados a los equipos y a la obra civil por presentar dinámicas muy diferentes en función de la escala o de la ubicación.

Las curvas paramétricas, junto con la estimación teórica, que se introduce en el siguiente subapartado, son los métodos más comunes para estimar costos en planificación y los que se propondrán en los desarrollos metodológicos expuestos en la segunda parte de esta monografía.

Cuando las estimaciones de costo se realizan por medio de técnicas paramétricas los resultados obtenidos van a ser representativos de la muestra general y, como es obvio, su precisión mejorará con el número de datos empleados. Al manejar valores estadísticos, si se quieren hacer interpretaciones sobre estratos o grupos más reducidos de la muestra partiendo de estos métodos de cálculo, es importante destacar que, además de las limitaciones obvias debidas a la reducción del número de datos, se podrían estar cometiendo errores asociados al carácter general de la información utilizada.

C. Método de estimación teórica

El método consiste en realizar diseños tipo de infraestructuras en función de una serie de parámetros básicos, apoyándose en supuestos teóricos. Este diseño tipo se valora mediante la aplicación de cuadros de precios unitarios representativos, como pudieran ser los aplicados por las diferentes unidades ejecutoras en el país. Una vez realizados los diseños teóricos en determinados escenarios, se interpola una curva, en función de variables fundamentales, por ejemplo la capacidad o la temperatura, y se obtienen de esta forma unas curvas de costos de inversión teóricos.

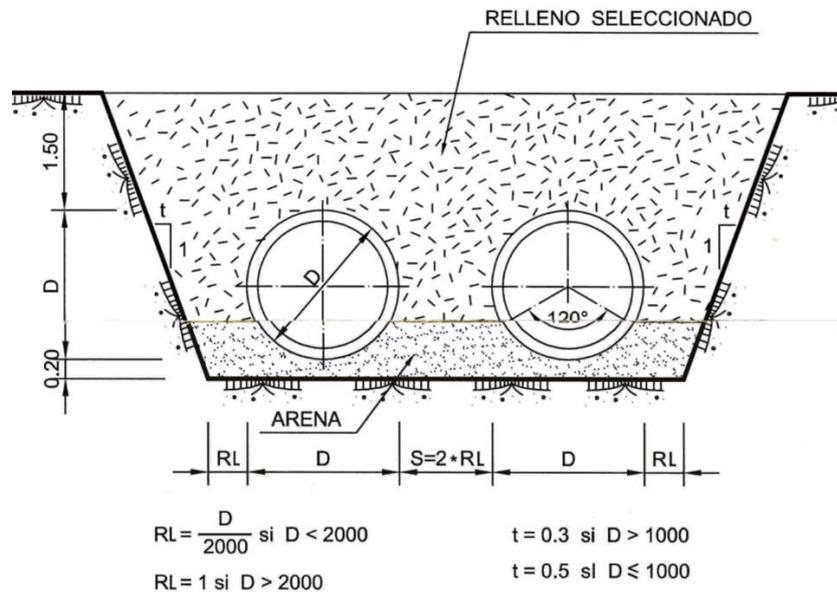
Estos costos de inversión teóricos en muchas ocasiones van a corresponder a unas condiciones favorables, porque las mediciones y los precios unitarios se definen teniendo en cuenta un contexto propicio, tanto en lo referente a los aspectos constructivos como en la accesibilidad. Por ejemplo, en estimaciones realizadas para las PTAR, generalmente no se toma en consideración que en ocasiones va a ser necesaria la excavación en roca, ni la necesidad de bombeos adicionales debidos a una topografía desfavorable o el requerimiento de obras auxiliares para los accesos por carretera y de las redes eléctrica o de agua potable. En otras obras más simples, como pueden ser las tuberías, sí suele ser habitual realizar las estimaciones teniendo en cuenta que determinados porcentajes de la obra se van a realizar en terrenos no favorables. No así en el caso de las PTAR, ya que puede existir una amplia casuística de condicionantes y obras auxiliares, y debido a esto va a ser necesario disponer de información detallada de casos reales, tanto para la definición del modelo como para la verificación de la validez de los resultados obtenidos en los métodos de estimación teórica.

Box 1. Ejemplo de estimación de costos de tubería

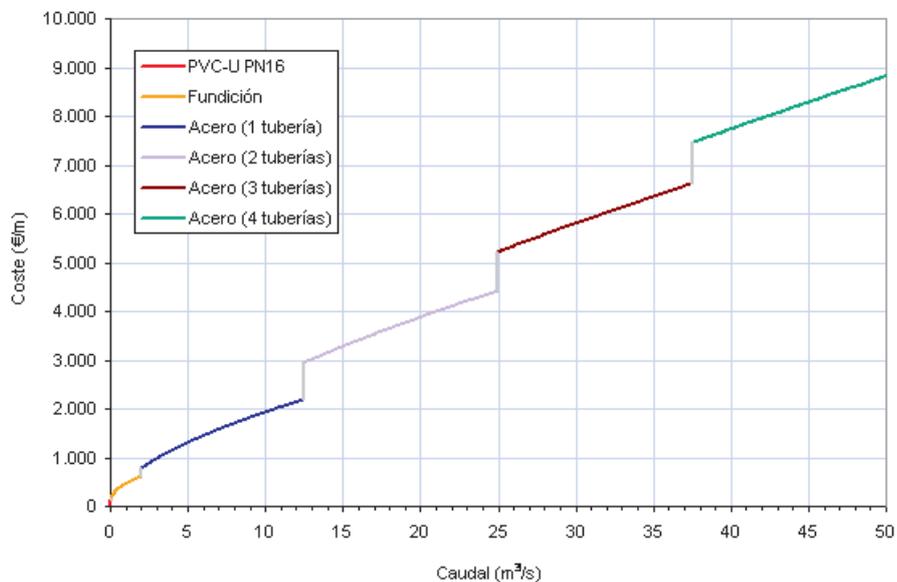
En 2011 el CEDEX publicó una *Guía técnica para la caracterización de las actuaciones a considerar en planes hidrológicos y estudios de viabilidad* (CEDEX, 2011), donde caracterizaron las principales medidas a considerar en los planes hidrológicos de cuenca. La caracterización para cada medida consistía en: (1) descripción; (2) identificación sobre el tipo de presiones (e indicadores de calidad) sobre los que repercute; (3) el ámbito territorial; (4) los costos de inversión y de operación y mantenimiento; (5) la vida útil y (6) la eficacia.

La siguiente figura muestra la sección tipo realizada para el cálculo de costos de tuberías de impulsión, que podría ser con una, dos o más conducciones dependiendo de los volúmenes a transportar. Además, se tuvo en cuenta el tipo de tubería y otros costos difícilmente cuantificables que se calcularon como porcentajes del costo de ejecución (valvulería y otros elementos complementarios; camino de servicio; reposición de servicios afectados; etc.). La

realización de este estudio se basó en 31 proyectos reales y en precios de tubería suministrados por los fabricantes.



A partir de esta sección tipo, los precios unitarios y el ajuste con los casos reales, se obtuvo la curva de costos por metro lineal de conducción en función del caudal a transportar, que se muestra a continuación.



D. Método de opinión de expertos

La opinión de expertos es una técnica mediante la cual se consulta a un grupo de especialistas hasta que se pueda establecer un consenso sobre el costo de una actividad. La técnica de opinión experta es más apropiada en las primeras etapas de un proyecto y puede tener interés sobre todo cuando las experiencias previas son muy limitadas. También puede ser útil como verificación de modelos paramétricos elaborados.

Debido a su subjetividad y falta de documentación de respaldo, se recomienda usar la opinión de los expertos principalmente para confirmar que la estimación no contiene errores elementales o suposiciones inválidas, o para analizar posibles carencias de las estimaciones más que para elaborar la estimación en sí.

Al respecto, se debe tener muy en cuenta que los expertos consultados cubren todo el espectro de experiencia que se quiere abarcar con la planificación y, en su defecto, la opinión de expertos se debe tomar con precaución fuera de su ámbito de experiencia.

E. Estimación de otros costos del ciclo del proyecto

Se pueden usar diferentes métodos para estimar otros costos de apoyo a proyectos, incluidos el diseño, la ingeniería, las inspecciones, la supervisión, el medio ambiente, la seguridad y salud, etc. Algunos métodos citados son (U.S. Department of Energy, 2018):

- **Conteo de planos y especificaciones:** Se basa en que cuanto más complejo es un proyecto, más planos y especificaciones requerirá, lo que significa que los costos de diseño asociados serán más altos. Se calcula el número de planos y especificaciones que representan un proyecto específico y a partir de un costo unitario por plano definido se estima el costo total.
- **Dedicación equivalente:** Se calcula la cantidad de horas de trabajo requeridas y se multiplica por el costo por hora laboral.
- **Método de porcentaje:** Se estima como un cierto porcentaje de los costos directos y se asigna esta cantidad a las otras funciones del proyecto (como diseño, gestión de proyectos, supervisión, etc.). Este método es el más empleado en niveles de planificación.

3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE COSTOS

La idoneidad de un método de estimación de costos u otro dependerá principalmente de la naturaleza de la actuación, del conocimiento que se tiene sobre las variables que tienen incidencia y de la información disponible.

Hay tipos de obras, por ejemplo las lineales, que resultan más sencillas de caracterizar y por tanto de estimar su costo, tanto si la estimación se realiza a partir de datos reales como si se realiza por diseños teóricos. Sin embargo otras resultan muy variadas en la tipología constructiva y, consecuentemente, en sus costos.

Cuando se encuentra mucha variabilidad en el costo de las infraestructuras suele ser debido a que este costo depende de muchos factores. Por ejemplo, en el caso de las PTAR existe un gran abanico de tecnologías y el costo, tanto de inversión como de operación y mantenimiento, puede variar de una tecnología a otra de una manera muy importante. La preferencia de una línea de tratamiento u otra dependerá de las circunstancias concretas de cada emplazamiento y del contexto socioeconómico, aspectos que no será posible prever con mucho detalle, al menos en la fase de planificación.

Las estimaciones que se realicen, cuando la infraestructura dependa de muchas variables, deben adoptar soluciones de compromiso entre el número de variables a utilizar (o que es posible conocer) y la precisión de la estimación. Generalmente, se suele dividir la muestra total en grupos o estratos en función de alguna variable, de tal forma que la variabilidad dentro de ese grupo sea menor y se puedan obtener métodos de estimación de costos más ajustados. La solución de compromiso vendrá condicionada, entre otras, por las siguientes circunstancias:

- Deberían tomarse en consideración en el análisis solo aquellas variables que luego se vayan a conocer en el ámbito donde se planifica. Por ejemplo, no tiene sentido analizar cómo influye en los costos de las instalaciones las características geotécnicas del terreno si posteriormente no se va a poder conocer esta variable en la propuesta de actuaciones.
- Debería adoptarse un número de procedimientos que no resulte excesivo y acabe por complicar el entendimiento y seguimiento de las estimaciones realizadas. A nivel de planificación, probablemente no aporte mayor precisión que se diferencien muchas casuísticas. Incluso podría aumentar el riesgo de que incurrir en un sesgo en alguna de ellas, dando resultados poco comparables.
- En cualquier caso las estimaciones que se realicen deberían poder contrastarse con la información real de que se disponga. Esta información generalmente es limitada y no va a permitir realizar un análisis muy desagregado porque algunos de los casos podrían quedarse sin información suficiente de contraste.

Finalmente señalar que necesariamente no hay por qué seleccionar un único método de estimación. Por el contrario, si la información disponible es limitada, probablemente será mejor apoyarse en diferentes procedimientos para poder alcanzar una mejor estimación, incluida la verificación con opinión de expertos.

4 PARTICULARIDADES DE LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE PTAR EN PLANIFICACIÓN

En este capítulo se expondrán las particularidades más importantes de la estimación de costos en PTAR en procesos de planificación. En el primer capítulo se expone como se utilizan las estimaciones de costos en estudios de planificación. Posteriormente, en el segundo apartado, se describe la variabilidad de las PTAR, indicando porqué son infraestructuras especialmente singulares a la hora de abordar la estimación de costos. En el tercer apartado se describe la curva de costos, que es la herramienta habitualmente utilizada en estimación de costos de PTAR en planificación. En los dos siguientes se analizan aspectos que será muy importante tener en consideración cuando se realicen estimaciones: el alcance del plan y la naturaleza de las actuaciones que se van a acometer en el mismo. Por último, en el sexto apartado, se expone el modo de abordar la estimación de costos de actuaciones singulares cuyo costo pueda condicionar sobremanera el monto total del plan.

Es importante comentar que, aunque en los procesos de planificación de PTAR suela prestársele mucha más atención a los costos inversión que a los de explotación, se debe tener estos últimos en consideración, además de para prever las necesidades de recursos, para asegurar que las líneas de tratamiento que se proponen en la evaluación de los costos de inversión son acordes a la capacidad de pago de la población y que, de este modo, se consiga un servicio sostenible.

4.1 UTILIZACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE COSTOS EN ESTUDIOS DE PLANIFICACIÓN

Hasta en los proyectos mejor estudiados se cometen errores y en un trabajo de planificación no se puede pretender realizar estudios de detalle para cada uno de los casos porque, probablemente, solo entablar los contactos necesarios para ello llevaría un tiempo excesivo. Por tanto, necesariamente se deben manejar estimaciones generales que permitan alcanzar los objetivos de la forma más precisa posible. Cuanto más precisa sea la estimación, menos errores de todo tipo habrá, pero será necesario buscar una solución de compromiso que permita, con la información, el tiempo y los medios disponibles, aportar la estimación más fiable.

En los procesos de planificación resulta muy útil contar desde las fases iniciales de los trabajos con una primera estimación del esfuerzo económico que va a suponer el plan, aunque se realice de una forma muy grosera. El fin de esta estimación temprana es lograr que los responsables políticos sean conscientes del esfuerzo que se debe hacer y puedan madurar una postura (establecer un límite presupuestario realista) mientras se elabora el plan. Esta estimación ni requiere ser muy precisa ni es conveniente que lo sea. Simplemente se trata de evidenciar el orden de magnitud del esfuerzo que se debe acometer. El método de aproximación es conveniente que sea expresamente burdo para quedar claro que se proponen como instrumentos de trabajo de apoyo en los estudios y debería evitarse, en la medida de lo posible, hacer públicos los resultados, puesto que la opinión pública puede empezar a conjeturar sobre unas cantidades que, posteriormente, pueden quedar muy alejadas de los presupuestos finales.

El resultado del proceso de planificación de infraestructuras será un plan de inversiones que cuente con una estimación global del costo del plan. Esta estimación, aunque más precisa que la primera estimación comentada en el párrafo anterior, tampoco requerirá de una exactitud grande del costo de cada una de las actuaciones consideradas. Lo realmente importante es que la estimación de los costos globales no tenga sesgo y sea suficientemente aproximada. En definitiva, no tiene importancia si el costo concreto de cada actuación posteriormente resulta mucho mayor o mucho menor, lo

que se debe cuidar es que la suma de los errores se compense y el cómputo total arroje un valor próximo a la realidad.

Asimismo, en todas las planificaciones los datos de costos se suelen utilizar para realizar una programación económica (anual o en otros periodos de tiempo) de las actuaciones, repartiendo la carga entre todos los años del plan, bien linealmente o bien aumentando progresivamente. Esa distribución anual tampoco requiere ser muy precisa, por cuanto solo trata de evaluar si se puede o no acometer y establecer una regularidad abordable para su desarrollo.

Además, idealmente, el plan de inversiones debería poder permitir realizar otros análisis complementarios como puede ser la estimación de costos de inversión en cada región, por rango de población o por diferentes etnias, entre otros. Aunque estas estimaciones tampoco requieren de mucha precisión, es importante tener en cuenta que, cuando se pretende establecer una distribución a partir de la estimación general de costos, el error en el análisis de cada subdivisión será probablemente mayor y el resultado podría estar alejado del valor medio ideal. Sin embargo, si se pretendiera replicar el método de cálculo para cada subdivisión, empleando solo sus datos, se debe recordar que el riesgo de cometer errores aumenta conforme disminuye el tamaño de la muestra, así en una región que contara con pocos datos de partida, el presupuesto estimado sería menos preciso que en otra donde se cuenta con muchos datos.

En algunos planes de inversión de PTAR la información de costos se emplea también en la priorización de actuaciones, mediante análisis costo-eficacia por ejemplo, utilizándose el costo estimado de cada una de las actuaciones concretas. Puesto que no es posible alcanzar una estimación muy precisa de cada una de las actuaciones, la utilización de los datos desagregados debería realizarse con prudencia. Por ejemplo, si se pretende establecer algún tipo de límite presupuestario para descartar determinadas actuaciones, estos límites deberían establecerse con cierta holgura o, si se emplean los costos de cada actuación en la priorización de actuaciones, deberían tener un papel secundario y no determinante. Otro posible modo de proceder sería establecer unas categorías de priorización tomando en cuenta otras variables y, posteriormente, dentro de cada categoría, ordenar las actuaciones por los costos estimados.

4.2 VARIABILIDAD DE LAS PTAR

Las PTAR constituyen un tipo de infraestructura que se ve sometida a una variabilidad muy singular en lo referente a costos de inversión, ya que responde no solo a los típicos condicionantes de la mayor parte de las obras, como pueden ser la economía de escala o las características del terreno donde se construya, sino que además presenta una variabilidad debida a la amplia tipología de sistemas de tratamiento existentes y a que, incluso dentro de cada tipología, el diseño puede variar muy sustancialmente dependiendo de las peculiaridades del agua residual, de la climatología e, incluso, de la altitud. Además, en muchas de las tecnologías se requiere de equipos muy específicos que dependiendo de la implantación en cada país, sus costos pueden variar mucho.

La estimación de costos de un plan de inversiones de PTAR debe abordarse teniendo en cuenta toda esta variabilidad. Para ello se pueden realizar agrupaciones en función de la distinta casuística de modo que, sin complicar el estudio en demasía, la estimación final resulte lo más ajustada posible y se optimice la información disponible. En el capítulo 5 se expone el análisis de estratificación que se puede aplicar para afrontar esta variabilidad.

4.3 LAS CURVAS DE COSTO

Debido a las características particulares de las PTAR la curva de costos es la herramienta que se utiliza por antonomasia en el proceso de planificación. En ella se representa en el eje de abscisas una magnitud indicativa del tamaño de la instalación, como puede ser la población conectada al sistema de saneamiento, la carga contaminante tratada o el caudal tratado, y en el eje de ordenadas el costo relativo de la PTAR (costo por habitante conectado o por carga/caudal tratado). De este modo, a partir del tamaño de la infraestructura se puede obtener fácilmente la estimación del costo de la misma.

La primera circunstancia destacable en curvas de costos de PTAR es la existencia de un efecto muy pronunciado de la economía de escala, siendo más elevados los costos de construcción per cápita cuanto menor capacidad tenga la planta. Esto se debe a que el costo de una serie de elementos de la instalación no se reduce de forma lineal con el tamaño. Así, en las PTAR pequeñas, instalaciones auxiliares como cerramientos, caminos de acceso e internos, edificaciones, enganche de agua y de luz, etc. tienen un peso relativo en el costo total mucho mayor que en plantas grandes. Además, las variaciones diarias en caudal, con caudales punta proporcionalmente mucho más altos en PTAR pequeñas, imponen diseños más holgados a los elementos de proceso que en las instalaciones grandes. Por último, aunque esto es ya algo a tener en cuenta en todas las infraestructuras, el efecto de economía de escala tiene en parte también origen en la variación de los precios unitarios en función de la cuantía de materiales y equipos requerida.

Las curvas de costos a utilizar pueden tener distintos orígenes, en función de si se han utilizado técnicas de estimación paramétrica a partir de datos reales o supuestos teóricos para su determinación. A continuación se exponen dos ejemplos típicos de estas curvas de costo para ambos casos.

La figura 1.a) muestra la curva resultante tras realizar el ajuste de los datos disponibles de costos de obras ejecutadas mediante regresión, donde los puntos grises corresponden a los datos de costos de obras ejecutadas disponibles para el caso analizado y la línea azul corresponde al ajuste potencial por mínimos cuadrados resultante.

La figura 1.b) muestra una curva obtenida por el método de estimación teórica, donde se han realizado diseños teóricos para diferentes tamaños de población, determinando para cada uno unas mediciones de obra y equipos asociados, y, tras aplicar unos precios unitarios representativos y unos coeficientes de mayoración apropiados se ha llegado a una estimación aproximada del costo para cada diseño. Los puntos grises representan la estimación de costo realizada para cada tamaño poblacional planteado. Posteriormente mediante la interpolación entre puntos, o el ajuste potencial por mínimos cuadrados en su defecto, se genera la curva de costo, representada en la figura por la línea verde.

Además de la capacidad de la instalación hay otros parámetros que van a condicionar la curva de costos y que puede ser conveniente tomar en consideración para alcanzar una estimación de costos más ajustada. Entre ellos, los más comunes son la tipología de tratamiento y la temperatura. La introducción de esta variabilidad en el análisis con curvas de costo puede tener lugar mediante la consideración de estratos, según se expone en el apartado 5.2.

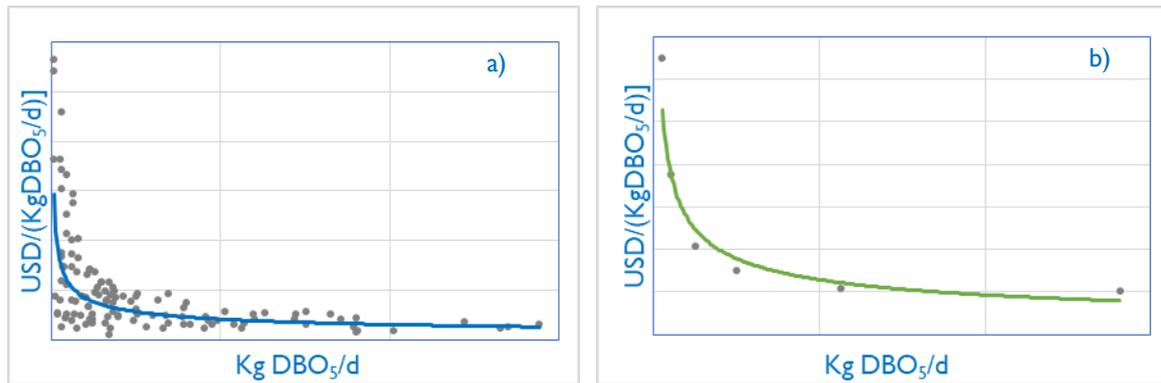


Figura 1. a) Curva de costos obtenida a partir de técnicas de estimación paramétrica. b) Curva de costos obtenida a partir de método de estimación teórica

4.4 EL ALCANCE DEL PLAN

El alcance del plan es siempre un aspecto muy importante a considerar, pero más aún cuando se trata de saneamiento y tratamiento de aguas.

Por un lado porque los tipos de actuación que contempla un plan pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, al margen de las PTAR, es habitual que los planes incluyan redes de saneamiento colectivo, soluciones de saneamiento individual o infraestructuras para la reutilización de las aguas.

Por otro lado porque no es lo mismo abordar un plan rural, un plan urbano, un plan de áreas metropolitanas o uno que contemple todo conjuntamente, siendo los enfoques y las metodologías a seguir diferentes.

Además, el alcance del plan puede también contemplar otros aspectos como el reforzamiento de operadores de las infraestructuras que se van a construir/remodelar, la gestión social/ambiental de los proyectos o la reposición de otros servicios afectados.

Y por último porque las obras auxiliares o las actuaciones complementarias necesarias para que las PTAR funcionen correctamente pueden requerir de inversiones muy importantes, y no siempre están reflejadas en el alcance del plan. Las obras auxiliares o actuaciones complementarias más típicas son las mejoras en la red de saneamiento o la construcción del bombeo de llegada a la PTAR o el emisario hasta la planta, pero en otros casos hay también tanques de regulación, bombeos de salida, emisario de vertido, tratamiento del excedente de pluviales, tratamientos avanzados para reutilización, etc. Deficiencias en estas obras auxiliares o actuaciones complementarias van a repercutir inevitablemente en el buen funcionamiento de la PTAR asociada, por lo que será muy importante que, aunque no sean parte del alcance del plan, se asegure que se van a abordar por otra vía.

Aunque esta monografía se limita a estimación de costos de PTAR, que será probablemente el tipo de actuaciones más complejo de todos los que pueden tener lugar en un plan de saneamiento, será necesario ser consciente de todos estos aspectos por los motivos expuestos en el párrafo anterior.

Debido a la dificultad de prever y estimar todas estas partidas en la fase de planificación, cuando se consideran dentro del alcance de un plan específico de PTAR, suele ser habitual mayorar el costo de la PTAR en un porcentaje medio para todas las actuaciones con el objetivo de interiorizarlas en el costo. No obstante a lo comentado, las curvas de costos no tienen por qué ser la herramienta más adecuada para determinadas actuaciones en determinados contextos, por lo que es necesario un análisis concienzudo para evaluar en qué medida una mayoración en el costo de la PTAR podría estar introduciendo un error excesivo en la estimación del costo. Un ejemplo al respecto serían las

soluciones de saneamiento individual cuya estimación suele ser más adecuado hacerlas a partir de costos unitarios de tratamientos individuales.

Por otro lado, y aunque no vaya asociado al alcance del plan, por las implicaciones en cuanto a mayoración del monto considerado, se considera importante comentar que la estimación de costos realizada es bastante habitual que no incluya los costos asociados a la preparación de los proyectos (planes directores, estudios de prefactibilidad y proyecto constructivo), a la supervisión de obra o a la puesta en marcha. Todas estas partidas, en el caso que se considere apropiada su inclusión en la estimación económica a realizar, suelen también interiorizarse en el costo mediante la aplicación de coeficientes de mayoración, al igual que para las obras auxiliares y actuaciones complementarias.

Box 2. Ejemplo de mayoración del costo de PTAR

En el enfoque inicial del plan de inversiones asociado a la *Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales* en Bolivia se consideraron los siguientes coeficientes o porcentajes de mayoración, a aplicar sobre el costo estimado para cada PTAR, para otros componentes incluidos dentro de alcance del plan, pero que iban más allá de la construcción de la PTAR.

- Pre-inversión	4%
- Supervisión	8%
- Gestión Social y Ambiental	15%
- Puesta en Marcha	8%
- Mejora de operadores	10%
- Emisarios	8%
- Inversión complementaria	20%

4.5 LA NATURALEZA DE LAS ACTUACIONES DEL PLAN

Cuando se acomete un plan nacional de PTAR, normalmente el país cuenta ya con una serie de instalaciones construidas, cuya importancia, antigüedad y estado dependen del nivel de desarrollo existente. De cara a diseñar un programa de actuaciones no va a suponer el mismo costo la rehabilitación de una PTAR que una ampliación o una obra completamente nueva y todos estos casos deberían tenerse en consideración.

Cuando se trata de la ejecución de nuevas inversiones el enfoque de estimación de costos es más sencillo y se limitaría a poder desarrollar las curvas de costo más apropiadas.

Sin embargo, cuando se trata de ampliar o modificar instalaciones existentes, a la variabilidad característica de las PTAR, habría que sumar la del tipo de actuación que se va a ejecutar y la del estado de la instalación sobre la que se actúa, lo que repercutirá en costos diferentes. En estos casos suele ser muy difícil cuantificar con precisión el nivel de inversión necesario en cada caso hasta que no se acomete el proyecto y se hace un diagnóstico en profundidad, aunque no por ello se debe renunciar a la realización de estimaciones.

Es por esto que en las PTAR de nueva construcción la evaluación del costo-eficacia viene muy condicionada por el tamaño de la misma, siendo la eficacia mayor en poblaciones grandes por la economía de escala. Sin embargo, en las ampliaciones o modificaciones de instalaciones esta relación dependerá de la magnitud de las actuaciones a realizar en cada caso.

Con objeto de reducir la variabilidad, resulta muy conveniente poder clasificar las actuaciones por tipologías, en función del costo esperable con respecto al costo de construcción. De este modo las actuaciones se podrían clasificar como sigue:

A. Puesta al día

En algunos casos las PTAR se encuentran en buen estado y generalmente solo requieren de una puesta al día, la sustitución de algún equipo o de alguna modificación menor que permita optimizar el aprovechamiento de las instalaciones. Aunque la previsión sea de costos muy menores, la realidad en estos casos suele ser que, cuando se acometen las reformas, no solo se sustituye lo imprescindible sino que se actualizan más elementos y equipos de los previstos inicialmente, con el objeto de que las instalaciones queden listas para un periodo prolongado de funcionamiento sin problemas.

No obstante la puesta al día generalmente forma parte de un mantenimiento mínimo de los activos o de un reajuste del diseño para adaptarse a las condiciones reales de funcionamiento y no se suele tomar en cuenta en los procesos de planificación

B. Rehabilitación total

Para algunas instalaciones resultará evidente que la remodelación y puesta al día debe ser total, con lo que el costo va a ser muy similar al de la ejecución de unas nuevas instalaciones o, incluso, superior porque conlleva la demolición de la PTAR existente para aprovechar los terrenos. Este suele ser el caso de instalaciones muy viejas, que han superado su vida útil, o de instalaciones abandonadas que han sido objeto del vandalismo y de robos. En estos casos, incluso, no se debe descartar que exista la necesidad de ocupar terreno adicional para ampliar la instalación, del que no se disponga.



Figura 2. Planta de tratamiento de excretas de Titanyen, en situación de abandono en el año 2019 (Puerto Príncipe, Haití)

C. Ampliaciones

Las ampliaciones de una instalación pueden deberse a diferentes circunstancias:

- Mejora en el tratamiento (modificaciones en los procesos existentes o adición de nuevos procesos) para mejorar los requerimientos de calidad. Esto puede ser debido a diferentes razones: incumplimiento de la calidad de vertido exigida, nuevos requerimientos de calidad más exigentes (eliminación de nutrientes) o reutilización del efluente.
- Ampliación de la capacidad total de la instalación, ya sea en caudal, carga contaminante o ambas. En ocasiones una instalación no ha llegado a su vida útil, pero en la red de saneamiento se recoge una carga industrial importante no prevista en diseño que va a condicionar la necesidad de ampliación de ciertos elementos.
- Ambas circunstancias

En la complejidad y costo de ejecución de las obras influirá de manera determinante si las actuaciones estaban previstas o no:

- Previstas: En ocasiones la ejecución de las PTAR se ha proyectado por fases, bien porque la proyección del crecimiento de población así lo aconseja, por restricciones presupuestarias o incluso por la naturaleza progresiva de la normativa. En estos casos los terrenos y elementos de conexión se previeron desde el inicio de las obras y la ejecución de la ampliación suele ser más sencilla, sin necesidad de alterar el funcionamiento de las líneas existentes. Suele ser incluso habitual que se haya previsto la disponibilidad de terrenos para una posible mejora en el tratamiento de aguas o de lodos. Y, lo más importante a efectos de estimación de costos, el proyecto suele contar ya con un presupuesto detallado de la actuación. También en estos casos se debe contar con una partida presupuestaria para la rehabilitación de algunos equipos de la línea existente, con objeto de dejar toda la instalación puesta a punto.
- No previstas: En estos casos la solución puede ser más complicada y, consecuentemente los costos más elevados. El planteamiento de esta actuación puede ser el de añadir líneas adicionales al tratamiento o, si no hay superficie disponible, inclinarse por opciones de tratamiento para complementar o ampliar la capacidad de las instalaciones. Para este último caso, por ejemplo, los tratamientos de lodos activados convencionales se pueden ampliar transformándolos en sistemas más compactos como dobles etapas (sistema AB), membranas (MBR) o los sistemas de soporte fijo sobre lecho móvil (MBBR, IFAS) que pueden aumentar la capacidad de la PTAR aprovechando las cubas de lodos activos existentes, y sin requerir más espacio que para la decantación, o ni eso si se trata de MBR. Por el contrario estos sistemas complican la operación y en muchos casos suponen consumos energéticos mayores.

Box 3. Ejemplos de normativa progresiva

En ocasiones las normativas son progresivas en el tiempo, lo que puede suponer un incentivo para la ejecución de PTAR por fases.

Un ejemplo es la normativa de Guatemala que estableció, en su redacción original, un modelo de reducción progresiva de las cargas de DBO₅, para el sistema general de vertidos, estableciendo asimismo distintas etapas de cumplimiento:

Etapa	Uno				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	50000≤EG<250000
Reducción porcentual	10	20	30	35	50
Etapa	Dos				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	50000≤EG<125000
Reducción porcentual	10	20	40	45	50
Etapa	Tres				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<65000	
Reducción porcentual	50	70	85	90	
Etapa	Cuatro				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<4000		4000≤EG<7000		
Reducción porcentual	40		60		

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Así, por ejemplo, una PTAR que origine una carga contaminante de 5.000 kg/d de DBO₅, antes de 2024 debería realizar una reducción del 60% de la carga de DBO₅.

Otro ejemplo de reducción por etapas se encuentra en la norma nicaragüense, donde se estipula que el límite máximo de Coliformes Fecales se regirá por medio del principio de gradualidad, con el objetivo de lograr la aplicación de la Mejor Tecnología de Práctica disponible, para responder de manera progresiva a la disminución de la contaminación provenientes de las descargas de aguas residuales, siempre y cuando el vertido no se deposite a cuerpos de agua donde se afecte la salud humana (manteniendo los rangos establecidos por el Ministerio de Salud). Se establecen los siguientes límites y periodos de tiempo:

Periodo de tiempo	2017-2022	2023-2026	2027-2029
Coliformes Fecales	1×10 ⁵	1×10 ⁴	1×10 ³

Una vez se haya clasificado la actuación en función de su tipología, la estimación del costo en cada caso podría realizarse como un porcentaje del costo original de esa infraestructura. Es decir, por ejemplo:

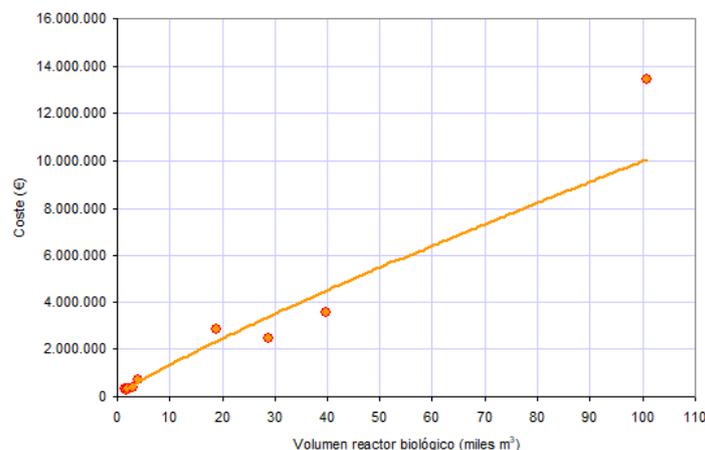
- Una puesta al día podría considerarse entre un 10 y un 20% del costo total actualizado de la instalación original

- Una rehabilitación total podría considerarse un 100% del costo actualizado de la instalación original
- Una ampliación de capacidad prevista, en el caso de que no venga estimada ya en el proyecto original, que siempre será más preciso acudir a él, podría considerarse el costo de nueva inversión de la capacidad que se amplía más un 30% del costo actualizado de la instalación original
- Una ampliación de capacidad imprevista podría considerarse un costo de nueva inversión de la capacidad que se amplía más un 50% del costo actualizado de la instalación original.
- Una mejora en el tratamiento para aumentar los requerimientos de calidad debería conllevar de estudios específicos cuando se trate de nuevos requerimientos de calidad más exigentes o reutilización del efluente a nivel nacional. En el box 4 se expone un ejemplo al respecto. En casos donde no sea viable hacer el tipo de aproximaciones como el que se expone se podría considerar un 50% del costo actualizado de la instalación original.

Box 4. Ejemplo de estimación de costos de mejora del tratamiento para eliminación de nutrientes

En la *Guía técnica para la caracterización de las actuaciones a considerar en planes hidrológicos y estudios de viabilidad*, elaborada por el CEDEX (CEDEX, 2011) con el fin principal de servir de apoyo a la elaboración de los planes de cuenca, una de las medidas caracterizadas fue la adaptación del tratamiento existente de aguas residuales urbanas para eliminación de nutrientes.

Para estimar el costo de la ampliación se analizaron nueve proyectos de instalaciones reales de lodos activos, evaluando el costo del reactor biológico exclusivamente y representándolo en función de su volumen.



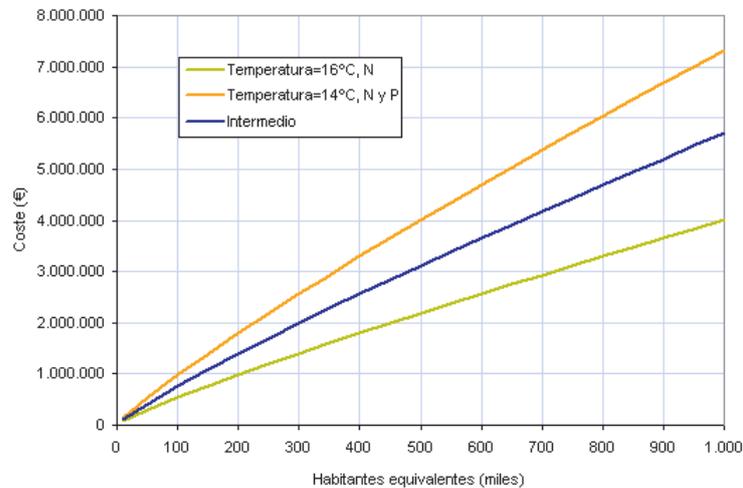
Posteriormente, considerando unas condiciones tipo de diseño y funcionamiento del proceso de depuración, se obtuvo la relación:

$$V = 0,035 \cdot he$$

donde V es el volumen del reactor original en m³ y he son los habitantes equivalentes de diseño del reactor.

A partir de esta expresión y empleando la ecuación de ajuste obtenida en el gráfico anterior, se obtuvieron las curvas de la siguiente gráfica, que representan el costo asociado a la ampliación de un reactor biológico convencional de lodos activos para adaptarlo a eliminar nutrientes en

función de los habitantes equivalentes en un caso tipo considerado favorable donde el reactor existente habría que duplicarlo (temperatura de 16°C y eliminación de nitrógeno) como en otro caso tipo considerado desfavorable donde el volumen de reactor habría que triplicarlo (temperatura de 14°C y eliminación de nitrógeno y fósforo).



Las expresiones matemáticas de las funciones de costo obtenidas, donde I es el costo de inversión en euros y x el número de habitantes equivalentes a tratar, fueron las siguientes:

Actuación	Función de costo
Temperatura del agua residual de 16°C (ampliación del volumen del reactor al doble de su capacidad)	$I = 23,69x^{0,8713}$
Temperatura del agua residual de 14°C (ampliación del volumen del reactor al triple de su capacidad)	$I = 43,34x^{0,8713}$
Valor intermedio (ampliación del volumen del reactor a 2,5 veces su capacidad)	$I = 33,73x^{0,8713}$

Por otra parte, se debe tener en cuenta que algunas de estas actuaciones pueden resultar complejas, tanto en el estudio para programar las obras como en la ejecución de las mismas, sobre todo si conlleva demolición y/o adaptación de la ejecución para evitar alterar el funcionamiento de las instalaciones y por esto pueden tener un ciclo de proyecto más dilatado de lo habitual. En estos casos, dado que lo que condiciona una planificación normalmente es el desembolso de la inversión, pueden iniciarse los estudios con antelación pero la programación de costos debería tener en cuenta que su ejecución se puede dilatar.

4.6 ACTUACIONES SINGULARES

En la planificación del desarrollo de infraestructuras y particularmente en la planificación del saneamiento y tratamiento de aguas, es común que existan entre todas las actuaciones previstas algunas que son muy singulares y de elevado costo. El ejemplo más típico son las actuaciones en grandes áreas metropolitanas, donde reside una parte muy importante de la población, con diferentes núcleos interconectados, redes de colectores muy extensas y complejas y grandes plantas de tratamiento. Estas instalaciones van a tener un costo y una complejidad que va a tener un peso muy importante en el costo total del plan y en su implantación.

El error inherente a los métodos estandarizados de estimación de costos, como los representados por las curvas de costos, no van a ser probablemente el modo más adecuado de estimar el costo de estas instalaciones singulares y deberían emplearse procedimientos más precisos, analizando el caso concreto de una forma más detallada.

Por lo expuesto resulta siempre muy conveniente que, a las PTAR a las que por su magnitud puedan condicionar sobremanera el monto del plan de inversiones de la planificación concreta que se esté abordando, se les realice una estimación detallada específica, para lo que sería necesaria la realización del anteproyecto con su estudio de alternativas asociado.

Es muy habitual que las grandes poblaciones ya cuenten con estudios previos específicos y planes directores de saneamiento, que contengan estimaciones de costos con un nivel de precisión mucho más elevado que el que pueda lograrse con sistemas generales de estimación. Y en los casos en que no, sería importante que el organismo competente en la planificación sectorial prevea la realización de planes directores en las grandes zonas urbanas antes de abordar un plan de inversiones nacional.

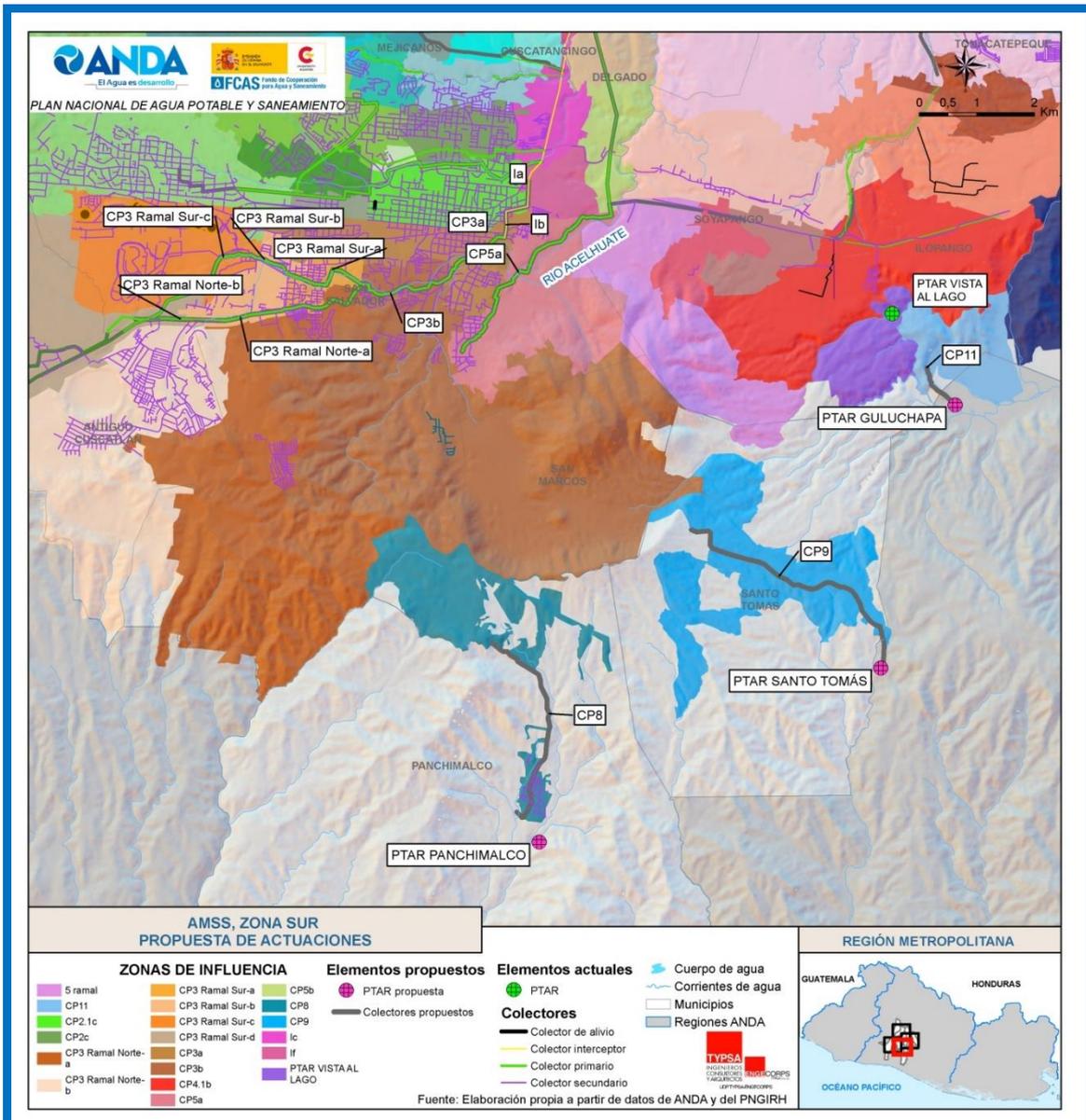
Box 5. Sectorización del Plan Nacional de Agua y Saneamiento de El Salvador

En el *Plan Nacional de Abastecimiento y Saneamiento en El Salvador* (ANDA, 2017), se realizó una sectorización del plan diferenciando entre los siguientes ámbitos:

Área Metropolitana de San Salvador (AMSS): Esta conurbación, en un futuro próximo, llegaría a congregarse a la mitad de la población del país. Las soluciones al abastecimiento y saneamiento se estudiaron de manera específica y a un nivel de mucho más detalle que el resto del plan. Las actuaciones en este ámbito serían, con mucha diferencia, las inversiones unitarias más importantes a acometer dentro del plan. Por eso los costos no se estimaron con curvas de costos, sino que tras estudiar las distintas cuencas vertientes se trató de optimizar la implantación de PTAR (enfoque más parecido al de un plan director que al de un plan sectorial).

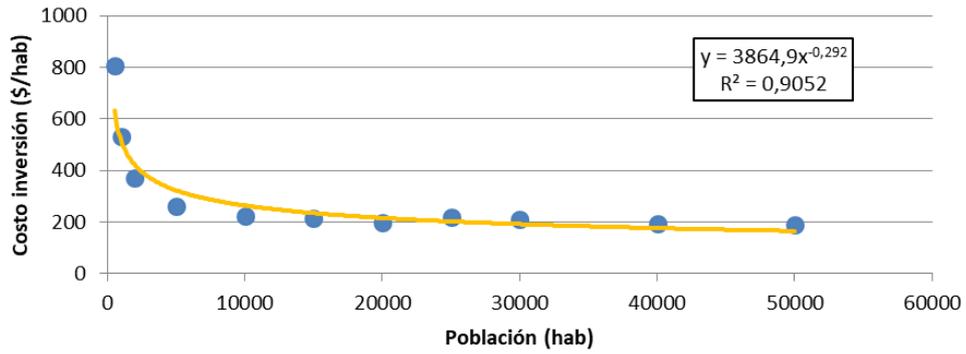
Tras el estudio realizado, las actuaciones asociadas a PTAR consideradas en la zona sur del área metropolitana de San Salvador, y cuya ubicación se muestra en la siguiente figura, fueron:

- Construcción de la PTAR de Guluchapa junto a la PTAP de Guluchapa.
- Construcción de la PTAR de Santo Tomás.
- Construcción de la PTAR de Panchimalco.
- Puesta en servicio de la PTAR abandonada de la PTAR Vistas al Lago.



Ciudades importantes: En este caso el planteamiento fue mixto. Se identificaron 15 situaciones que presentaban una especial problemática, ya fuera en lo que se refiere al abastecimiento, al saneamiento o ambos, y en estos casos se realizó un estudio un poco más detallado por si su solución pudiera derivar en costos mayores de los estimados de forma general. Adicionalmente se estimaron, tanto para estas como el resto de las actuaciones, la tipología y costos de las actuaciones de forma genérica (ver ámbito urbano). Por lo que en estos casos se pudo contar con una doble estimación.

Ámbito urbano: En este caso se desarrolló una planificación general, empleando métodos de estimación generales con curvas de costos y evaluando la situación global y soluciones tipo para todo el sector urbano, incluidas las ciudades anteriores.



Ámbito rural: Se estimaron los costos teniendo en cuenta la singularidad de que en sistemas rurales no suele ser viable el establecimiento de un sistema de alcantarillado debido a la baja densidad de viviendas, por lo que los costos se calcularon a partir de precios unitarios de sistemas de tratamiento individuales.

5 INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

5.1 PLANTEAMIENTO GENERAL

Los procedimientos para estimar los costos de PTAR en planificación pueden ser más o menos precisos y en función de su precisión serán, también, más o menos complejos de desarrollar y de aplicar. Pueden elaborarse métodos estandarizados para todo el ámbito o sistemas que responden a diferencias locales; pueden ser únicos o diferenciados para los distintos estratos, incluso puede haber estimaciones específicas para casos singulares. Conocida esta variabilidad se hace necesaria una orientación para evaluar qué camino es el más adecuado para realizar la estimación de costos en función de la información y recursos disponibles.

Como se ha comentado, las curvas de costos es la herramienta de uso más habitual en determinación de costos de inversión de PTAR en la fase planificación y a partir de este capítulo se desarrollarán los aspectos metodológicos específicos para poder determinar las curvas de costos óptimas dependiendo de cada contexto concreto.

A modo de síntesis de lo expuesto en el capítulo 4, para enfocar correctamente un plan de inversiones de PTAR y que las metodologías de estimación de costos se puedan elaborar adecuadamente, se deben abordar previamente los siguientes aspectos:

1. Conocer los tipos de actuaciones incluidas en el alcance del plan, como pueden ser: redes de saneamiento colectivo, soluciones de saneamiento individual, plantas de tratamiento, sistemas de reutilización de aguas, etc. De todas ellas, las metodologías de cálculo que se exponen en esta monografía se limitan a las PTAR, ya que serán probablemente el tipo de actuaciones más complejo.
2. Evaluar la naturaleza de las actuaciones consideradas en PTAR: nueva construcción, rehabilitación, ampliación de capacidad, mejora del tratamiento, etc. Las metodologías expuestas están elaboradas pensando en nueva construcción pero podrían emplearse para otras estimaciones aplicando un porcentaje de conversión, según se describe en el apartado 4.5.
3. Identificar si existen actuaciones que por su magnitud puedan condicionar sobremanera el monto del plan que se está evaluando. En caso de haberlas la estimación de su costo debería hacerse mediante una estimación detallada específica.

Posteriormente se deberá evaluar la variabilidad existente en el país de estudio y discernir si será deseable y viable la estratificación. Es en el primer apartado de este capítulo donde se dan pautas metodológicas a este respecto.

Una vez realizado este análisis se procedería a la elaboración de curvas de costos para los estratos definidos con el método más adecuado. Para ello en el segundo apartado se expone un árbol de decisión que evalúa qué camino metodológico es más adecuado seguir, en función de la información disponible y los recursos humanos que se cuente para procesarla.

En muchas ocasiones la información disponible es dispar y la calidad de las curvas que se puede obtener también lo es (tanto reales como teóricas). Además ambos tipos de curvas, dependiendo del caso, presentan ventajas e inconvenientes, por lo que, cuando sea posible, debería emplearse toda la información disponible para realizar la estimación de costos. Se puede presentar la situación que se carezca de información suficiente para elaborar curvas fiables dentro de un estrato o incluso a nivel país. Para esos casos esta monografía propone también soluciones, consistentes en tomar

otras curvas de referencia, ya sean del mismo país pero de otro estrato/tecnología o de otros países, y adaptarlas a la situación concreta a partir del análisis de las variables más importantes.

5.2 ESTRATIFICACIÓN

Como se ha expuesto anteriormente, las PTAR constituyen un tipo de infraestructura que se ve sometida a una variabilidad muy singular, que se repercute en los costos de inversión, llevando en muchos casos a que no se puedan obtener curvas de costos de aplicación general. Un modo de obtener curvas con cierto grado de precisión consistiría en desagregar la muestra completa en una serie de grupos o estratos dentro de los cuales la variabilidad fuese menor.

En esta monografía se denomina estrato a cada uno de los contextos específicos dentro de un país donde, a efectos de planificación de PTAR, resulta adecuado considerar una curva de costo diferenciada. Las razones para ello pueden ser muy variadas, como por ejemplo que la climatología, las características socioeconómicas de la población o los límites impuestos al vertido sean muy diferentes para algunos grupos, lo que puede provocar que las tecnologías a considerar o el dimensionamientos de los procesos sea muy distinto que, a su vez, repercute en costos también diferentes.

En el caso de un país como pudiera ser Países Bajos, homogéneo climática y socioeconómicamente, y donde los estrictos requerimientos legislativos hacen que los lodos activos sea, con mucha diferencia, la tecnología predominante, probablemente la variabilidad sea pequeña y sería adecuado elaborar solo una curva para todo el país.

Sin embargo, lo habitual es que existan en el país diversos contextos que condicionen la selección de las líneas de tratamiento y/o la adopción de diferentes bases de diseños. En estos casos, si se identifican variables que claramente establecen patrones muy distintos, va a ser mejor elaborar varias curvas para cada uno de los estratos. Evidentemente, cuantas más variables se introduzcan en el análisis y más estratos se diferencien, menos variabilidad habrá en cada uno de ellos y las curvas de costos tendrán una mayor precisión. No obstante, esta mayor desagregación supondrá un aumento de la complejidad del análisis y además, requerirá de mayor disponibilidad de información básica de contraste, puesto que dentro de cada uno de los estratos definidos se debería contar con información suficiente para reducir el error en los ajustes y lograr cierta seguridad estadística.

La siguiente figura muestra un ejemplo muy simple de cómo una estratificación por tipología de tratamiento puede hacer mejorar la precisión de las estimaciones a partir de datos de proyectos, sin mermar la seguridad estadística y sin añadir una complejidad excesiva al análisis. En este caso considerar dos estratos, uno donde se adoptasen tratamientos intensivos como tratamiento predominante y tratamientos extensivos en el otro, sería adecuado.

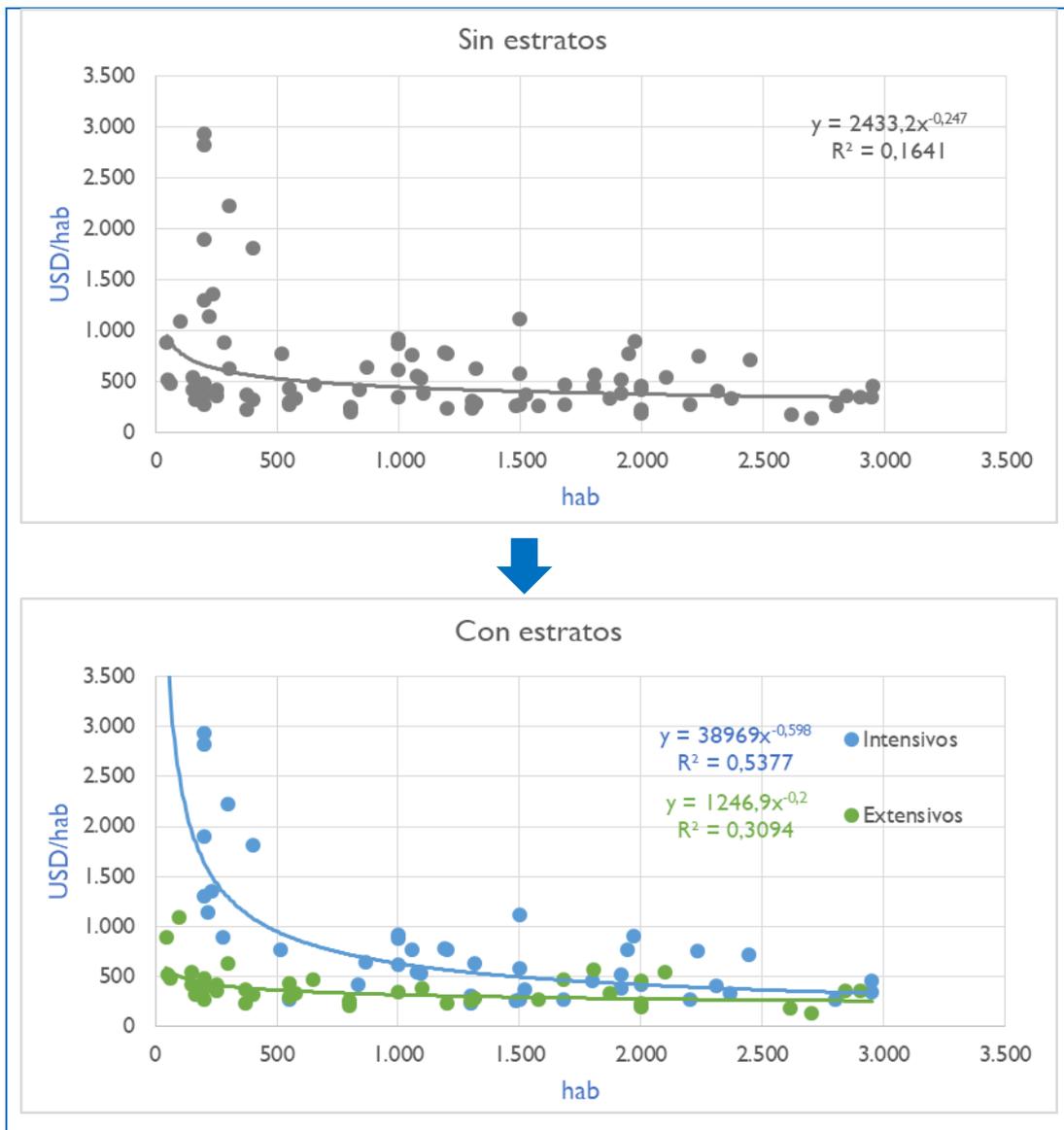


Figura 3. Ejemplo de estratificación

Los estratos a definir en cada caso estarán condicionados no solo por el contexto específico del país, sino también por la información disponible para las líneas de tratamiento predominante consideradas. En ocasiones la elección más deseable no es viable por no disponer de información suficiente y se debe optar por otra que, aunque sea menos adecuada, cuente con una batería de datos mayor donde apoyar las estimaciones. Se debería evaluar cuál es la mejor aproximación, alcanzando una solución de compromiso entre varianza y disponibilidad de datos, minimizando el error de la totalidad de la estimación.

5.2.1 Variables a considerar en la conformación de estratos

Los estratos a considerar dependerán de la variabilidad que presente el país de estudio en una serie de factores que condicionan las bases de partida, el diseño o la selección de la línea de tratamiento predominante.

No debe olvidarse que la estratificación se realiza con el fin de estimar los costos y, por tanto, las diferentes curvas que se obtengan deberían poder aplicarse con relativa seguridad. De nada sirve separar grupos si posteriormente no hay un criterio claro de dónde aplicar cada una de las curvas

obtenidas. Por ejemplo, podríamos tener curvas para cada uno de los tipos de tratamiento diferente, pero con el conocimiento de detalle tan limitado que necesariamente ha de manejar un estudio de planificación, no vamos a ser capaces de determinar qué tecnología se implantará en cada lugar concreto.

Por ello, la selección de las variables debe hacerse pensando no solo en la reducción de la variabilidad sino también en su aplicabilidad posterior. En cada lugar puede haber factores propios, si bien los más comunes suelen ser los siguientes:

- Los límites de vertido impuestos
- La variabilidad climática/ambiental
- El contexto socioeconómico
- El tamaño poblacional
- Las características y disponibilidad del terreno
- Las tecnologías preferibles por los operadores

Como es lógico, la consideración de una determinada variable en el proceso de estratificación solo tendría sentido si el número de actuaciones diferenciadas tuviera una incidencia importante en el monto total del plan. También el grado de precisión que se requiera en el plan de inversiones asociado a la planificación que se está abordando será otro factor determinante en la consideración de factores.

La información y recursos disponibles para la estimación de costos es un condicionante de la determinación de los estratos, resultando habitualmente un factor limitante, por lo que serán aspectos a tener también en cuenta.

A continuación se describen los factores propuestos, pero en cualquier caso se debe tener en consideración que no se trata de un listado exhaustivo y que la estratificación debe provenir de una reflexión y análisis adecuados para el contexto específico.

Límites de vertido

Los límites de vertido impuestos vendrán dados por las normas de vertidos y las normas de calidad que existan en el país. Evidentemente, si existen requerimientos diferenciados, las líneas de tratamiento más adecuadas también serán distintas y por tanto los costos. Los países que tienen límites diferentes en función del contexto se apoyan en los criterios de impacto ambiental y de costo-eficacia para definirlos, habiendo algunos países que diferencian por tamaño poblacional y otros que lo hacen en función de la sensibilidad del medio receptor. Para esto último suele ser habitual definir zonas de especial protección medioambiental donde los requerimientos de vertido o de calidad son más estrictos o donde se deben eliminar contaminantes que no se consideran en las zonas que no gozan de esta denominación, como podrían ser los nutrientes.

Un ejemplo de una diferenciación generada por la normativa podría venir de la aplicación de la Directiva 91/271/CEE, en la Unión Europea, donde se establecen límites distintos para la eliminación de nutrientes en zonas sensibles en función del tamaño de población. También diferentes países de Latinoamérica cuentan con condiciones especiales dependiendo del medio receptor. Hay casos extremos, como Bolivia o Cuba, donde deben clasificarse todos los cuerpos de agua y otras situaciones más sencillas, como la normativa general de Guatemala que contempla límites específicos para esteros y lagos. En algunos países de la región se cuenta incluso con cuerpos de agua muy singulares que tienen su propia limitación. Este sería el caso de la cuenca del lago Atitlán en Guatemala o de del lago Xolotlán en Nicaragua.



Figura 4. PTAR de Arroyo Culebro Cuenca Baja. Fuente: Canal de Isabel II

Factores ambientales

La consideración de aspectos climáticos/ambientales en la definición de estratos dependerá principalmente de la variabilidad al respecto que haya en el país donde se lleva a cabo el plan. Algunas variables ambientales y climáticas tienen una influencia muy significativa en el dimensionamiento de las infraestructuras y por tanto en sus costos de implantación y de operación. Las más relevantes son:

- La temperatura, que afecta de un modo muy significativo al crecimiento bacteriano, siendo una de las variables críticas en el diseño de PTAR. Temperaturas bajas implican infraestructuras más grandes y por lo tanto costos de implantación mayores. Por otro lado también puede resultar un factor limitante en la selección de la tecnología, que es lo que ocurre con los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendentes (RAFA), que es una tecnología muy habitual en climas cálidos, pero cuya utilización en climas fríos es inviable.
- La altitud tiene un efecto reductor de la solubilidad del oxígeno y, debido a esto, las tecnologías como lodos activos que cuentan con aireación artificial tienen unos costos de implantación y operación mayores en zonas elevadas. EL Altiplano Andino es un claro ejemplo de piso ecológico muy singular por su gran altitud y los países del entorno presentan una enorme variabilidad ambiental que van desde incluso el nivel del mar hasta los 4000 m de altitud.
- La precipitación, puesto que, aunque se cuente con sistemas de saneamiento separativos, es muy común que se produzcan variaciones en los caudales recogidos. Algunas tecnologías son muy sensibles a las cargas hidráulicas, como sería el caso de los RAFA, lo que hace cuestionable su selección en zonas con alta precipitación y redes unitarias. Otras tecnologías, como los lechos de secado, cuando no están techados, ven mermado mucho su rendimiento en zonas con alta precipitación.

Es de destacar que muchas veces, cuando la variabilidad ambiental es muy amplia dentro del país, estas diferencias también determinan cambios en la economía y los hábitos de las poblaciones, que repercuten a su vez en las características de las aguas residuales.



Figura 5. PTAR de Konani, Altiplano boliviano

Contexto socioeconómico

Si existen diferencias en el contexto socioeconómico de diferentes poblaciones puede considerarse también en la selección de estratos por diversas razones:

- Por una parte, el consumo de agua, la alimentación o los hábitos en cuanto a permanencia en la población para desarrollar la actividad laboral o la higiene son factores determinantes del caudal y la carga contaminante aportados a la red por cada habitante, factores que condicionarán el dimensionamiento de la instalación y, por tanto el costo per cápita de la PTAR.
- Por otra la capacidad de pago o el poder adquisitivo de la población podrían condicionar la tipología de tecnologías que puedan implantarse. Así, las poblaciones más rurales con menos capacidades y recursos, necesitarían procesos extensivos de bajo costo y complejidad de operación (lagunaje, humedales, etc.).

Para poder evaluar la capacidad de pago o el poder adquisitivo sería interesante disponer de alguna variable que lo reflejase ya que, a diferencia de las variables climáticas, dependerá de muchos factores y su determinación no será directa. En muchos países existen clasificaciones oficiales del nivel socioeconómico de las poblaciones, sirvan como ejemplo los mapas de pobreza del Fondo de Inversión Social para el Desarrollo Local de El Salvador o el Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Argentina.

Box 6. Diferencias generadas por el contexto socioeconómico

Como ejemplo paradigmático de diferencias generadas por el contexto socioeconómico se muestra a continuación la variabilidad existente en las cargas unitarias y dotaciones promedio en las tres zonas ecológicas principales de Bolivia para poblaciones de entre 1.000 y 2.000 habitantes (MMAyA, 2021). Estas diferencias hacen muy deseable que en un proceso de planificación sectorial se considere estratificación al respecto.

	Altiplano	Valles	Llanos
Carga unitaria (g DBO ₅ /(hab ·d))	20-35	30-45	30-45
Dotación (L/(hab ·d))	30-70	50-90	70-110

Tamaño de población

Es común que se definan los estratos en función del tamaño poblacional o, incluso, que los planes de infraestructuras se centren exclusivamente en un rango de población. De hecho es bastante habitual que exista un plan para el ámbito urbano y otro para el rural, e incluso en ocasiones puede haber también un plan específico para el ámbito metropolitano. Aunque hacen referencia a una sectorización del plan y no a estratos propiamente dichos, ya que fue una división que se mantuvo para todo el plan y no únicamente para la estimación de costos, el box 5 “Sectorización del Plan Nacional de Agua y Saneamiento de El Salvador” ilustra una situación en la que el tamaño poblacional podría haber sido la variable principal para determinación de estratos (área metropolitana, zonas urbanas y zonas rurales).

El tamaño de población es una variable que integra muchas otras aunque no siempre de una manera clara. Así, en general, en muchos países de Latinoamérica se asocia casi directamente el tamaño al carácter rural de la población, pero en esos mismos países hay también núcleos pequeños que surgen en el entorno urbano, bien como asentamientos irregulares de la población más desfavorecida, bien como desarrollos urbanísticos privados de población con más recursos. Estos dos casos, determinados por las condiciones socioeconómicas pueden ser muy diferentes del rural de cara a prever las infraestructuras a implantar, por lo que deberían diferenciarse.



Figura 6: PTAR en desarrollo urbanístico privado, Panamá

Características de los terrenos

Las características y disponibilidad del terreno, serán variables que también influyen en la tipología de instalaciones que se puedan implantar. Si un país presenta diferencias entre zonas cuya aridez o pobreza en materia orgánica del suelo lo hace poco atractivo para actividades agrícolas o ganaderas y por tanto se cuenta con grandes extensiones disponibles, y otras, por ejemplo, donde sus características montañosas impiden emplear sistemas que requieran grandes superficies, condicionará la selección de la línea de tratamiento predominante. Casos paradigmáticos que servirían de ejemplo al respecto sería el Altiplano Andino o las grandes extensiones existentes en Argentina, donde las soluciones tecnológicas extensivas con costos de explotación muy reducidos,

como por ejemplo las lagunas de estabilización, a priori serían las más adecuadas. En cambio, en otros países como El Salvador pasa al contrario y, en general, no se consideran soluciones extensivas debido a que es un país muy montañoso y las grandes pendientes imposibilitan la implantación de este tipo de líneas de tratamiento.

Preferencias de los operadores

Otros factores como las preferencias de los operadores de las distintas zonas pueden en ocasiones ser también determinantes a la hora de seleccionar la línea de tratamiento predominante y por tanto los estratos definidos. Sirva como ejemplo la entidad de saneamiento autonómica (NILSA), de la Comunidad Foral de Navarra, en España, que ha optado históricamente por los filtros percoladores como solución tecnológica, teniendo la gran mayoría de sus PTAR esta tecnología. Debido a esto en un eventual plan de inversiones en esa zona lo razonable sería considerar como tecnología predominante en el tratamiento secundario el filtro percolador, aunque hubiese otra alternativa tecnológica que también pudiese ser adecuada.

5.2.2 Aspectos a tener en cuenta en la definición de la línea de tratamiento predominante

Una vez identificados los estratos que pudieran ser más adecuados será necesario identificar para cada uno de ellos la línea o líneas de tratamiento predominantes. La preferencia de la línea de tratamiento a considerar en cada proyecto se debe decidir en un estudio de alternativas donde se evalúa en detalle el contexto del mismo. Evidentemente, en una planificación no se puede disponer de esta información de detalle, por lo que debería trabajar con supuestos y aproximaciones, basadas en la lógica y en la experiencia. La experiencia muestra que hay una tendencia a recurrir a uno a unos pocos tipos de línea de tratamiento cuando las circunstancias son similares.

Para la definición de la línea de tratamiento predominante de cada estrato considerado se puede recurrir al estudio de las preferencias de los proyectistas en esas circunstancias, evaluando el porcentaje de proyectos donde se ha optado por cada línea o conjunto de líneas de tratamiento. No obstante, a veces la experiencia muestra que no hay razones claras por las que se ha optado por determinadas líneas o, incluso, en ocasiones se han construido soluciones completamente desaconsejables. Adicionalmente, debería tomarse en consideración si es posible que haya habido alguna mejora tecnológica reciente que, por no haber estado disponible en el pasado, se encuentra poco implantada. Este pudiera ser el caso, por ejemplo, de los reactores anaerobios que se encuentran ya muy implantados en algunos países pero en otros, sin embargo, es relativamente reciente su consideración en proyectos. Por todo esto es importante que, aparte de estudiar las preferencias de los proyectistas, la selección de la línea de tratamiento predominante para cada estrato considerado se apoye en un juicio de expertos.

Por otra parte, y no menos importante, la selección de estas líneas debería permitir la elaboración de las curvas de costos, es decir que haya información de base suficiente para el estrato en cuestión. En caso contrario se deberá recurrir a soluciones de compromiso, considerando líneas de tratamiento con costo similar o agregaciones de líneas de tratamiento. En los casos en los que no se cuente con información de base suficiente, la mejor solución puede ser reducir el número de estratos y realizar una aproximación posterior, una vez elaborada la curva de costos, según se describe en el capítulo II, mediante la consideración de subestratos.

Es importante comentar que, o bien porque en un determinado estrato sea igualmente habitual la implantación de dos o más líneas de tratamiento diferentes, o bien porque no existen datos

suficientes para elaborar la curva de la línea de tratamiento que se considera predominante para un estrato, es muy usual considerar la agregación de líneas de tratamiento que presentan costos similares, para ampliar el banco de datos disponible. Al respecto es una práctica habitual realizar esta agregación en dos grandes categorías:

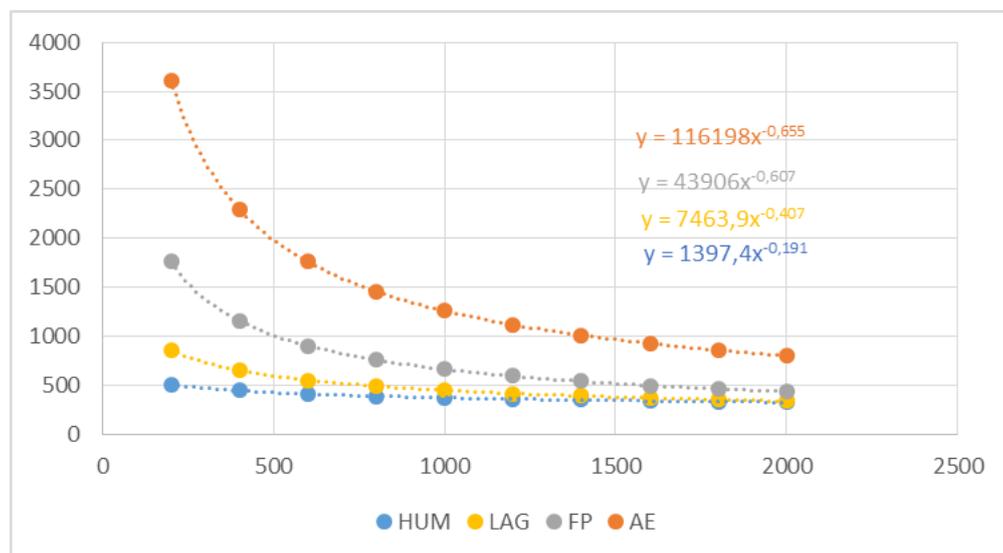
- Sistemas extensivos, entendidos como aquellos que se basan en la imitación de los procesos de depuración que ocurren de forma natural en los suelos y en los cuerpos de agua, que en general van a requerir de grandes superficies, pero de bajos consumos energéticos. Aquí es habitual, por ejemplo, agregar los costos de lagunas de estabilización y de los humedales.
- Sistemas intensivos, aquellos que tratan de potenciar las condiciones en las que se produce la depuración de aguas y por tanto consiguen reducir la superficie, si bien generalmente a costa de emplear un suministro externo de energía que acelera el proceso de depuración. Se podrían considerar conjuntamente, por ejemplo, los costos de plantas con lodos activados y con filtros percoladores

En el caso de coexistir varias líneas de tratamiento en un estrato determinado, se podría optar por considerar el costo de una sola de las tecnologías, si se piensa que va a ser muy predominante sobre las otras o, en caso contrario, se podría generar una curva de costo promedio a partir de las curvas de costos originales y de la consideración de un porcentaje de preponderancia de esas líneas para distintos tamaños poblacionales. El siguiente box ilustra un ejemplo de lo expuesto.

Box 7. Ejemplo de elaboración de curva de costo promedio

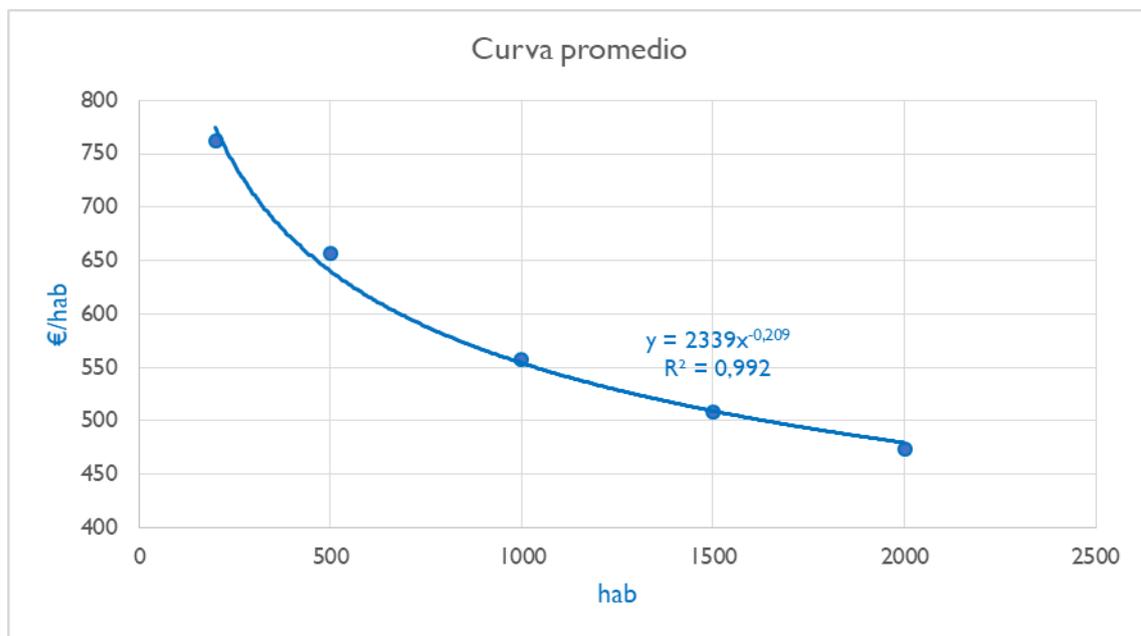
En España se ha realizado recientemente un ejercicio para estimar los costos de la depuración en pequeños núcleos entre 200 y 2.000 habitantes.

En este caso se contaba con curvas de costo para cada una de las tecnologías más empleadas (aireación extendida, filtro percolador, humedales artificiales subsuperficiales y lagunas de estabilización) pero, evidentemente, no se podría determinar con seguridad qué tecnología se aplicaría en cada caso. Sin embargo sí se podía realizar una estimación a juicio de experto sobre cuál sería la probabilidad de encontrar cada tecnología en función del tamaño de población. Utilizando toda esta información se pudo elaborar una curva promedio en función de porcentajes de preponderancia las cuatro líneas de tratamiento. Las curvas de costos, actualizadas a 2020, elaboradas para ese rango poblacional para cada tecnología, fueron las siguientes.



A continuación se muestran los porcentajes de preponderancia que se consideraron en uno de los escenarios estudiados y la curva promedio resultado de la aplicación de los mismos sobre las curvas originales.

Tecnología / Población (hab)	200	500	1.000	1.500	2.000
Humedales (HUM)	80%	70%	60%	50%	40%
Lagunas de estabilización (LAG)	10%	10%	10%	10%	10%
Filtros percoladores (FP)	5%	10%	15%	20%	25%
Aireación extendida (AE)	5%	10%	15%	20%	25%



Esta curva combinada fue la que se empleó para obtener los costos de inversión totales que se necesitaban para construir las instalaciones.

5.3 DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE CURVAS

Las curvas de costos, en general, se pueden obtener a partir de datos reales o de cálculos teóricos. Sin embargo, ambos tipos de curvas pueden presentar problemas en su determinación y en la precisión de sus resultados. Si existen pocos datos reales o los mismos no tienen una distribución uniforme (por ejemplo, existe un sesgo en la cantidad de datos disponibles hacia un determinado tamaño de la población o hacia una determinada tecnología) y el sesgo que presentan no es el mismo que las actuaciones que se pretende acometer, la curva obtenida a partir de datos reales puede no ser representativa. Las curvas teóricas pueden diseñarse para evitar estos sesgos, pero resultan muy laboriosas de obtener puesto que requieren multitud de diseños (por tecnologías y tamaños) y estimaciones de mediciones de obra/equipos y costos unitarios (que pueden ser imprecisos) pero además, como se ha dicho, en general representarían un escenario ideal y en la mayor parte de los casos la realidad impondrá costos adicionales.

Por todo ello, quizá la mejor forma de actuar es, cuando sea posible, utilizar ambos tipos de curvas de forma complementaria, de tal forma que se puedan aprovechar las ventajas de una y otra. Las aproximaciones realizadas con datos reales proporcionarán una información más aproximada de dónde puede encontrarse el orden de magnitud de los costos pero, probablemente, las curvas teóricas podrán aportar información más aproximada de cuál es la variación relativa de costos según varía el tamaño de población. La conveniencia de contar con distintos métodos permite, además, contrastar resultados y tener mayor seguridad en las estimaciones. Estos conceptos básicos son los que se han tomado en consideración para diseñar una metodología para la determinación de las curvas de costos de PTAR más adecuadas en función del contexto existente.

La información disponible será un factor determinante del camino metodológico a seguir en la elaboración de las curvas. Obviamente no será lo mismo si se cuenta con numerosa información de instalaciones reales, si esta información es limitada, si hay disponibles curvas teóricas ya elaboradas o si no existe ningún tipo de información.

Al respecto la siguiente figura muestra un árbol de decisión orientativo de cuál podría ser el camino a seguir para cada realizar la estimación de costos en cada estrato considerado.

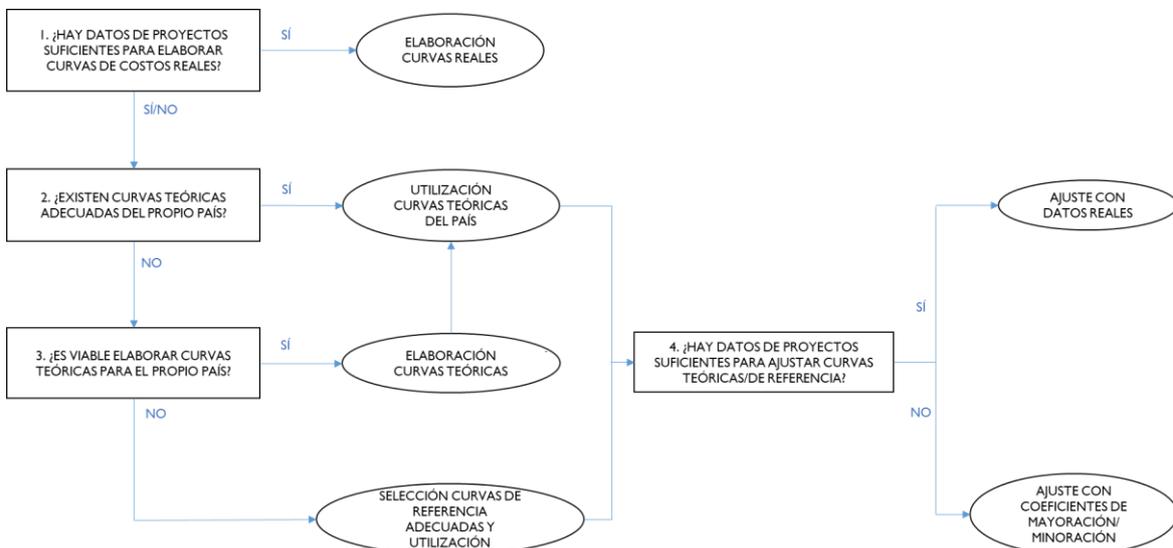


Figura 7. Árbol de decisión para la definición del camino metodológico más adecuado para cada estrato

Evidentemente contar con suficiente información real es la mejor garantía para poder realizar una estimación adecuada de costos. Por ello, lo primero que se debe plantear en el análisis a realizar para cada estrato es si en el país del caso de estudio existe suficiente información sobre costos de proyectos para elaborar la curva real. En caso positivo se procederá al ajuste estadístico de los datos a partir del cual se obtendrá la curva real según se describe en el capítulo 6.

Aunque se cuente con suficiente información real de costos, la experiencia en diferentes países ha demostrado que, en la medida que sea posible, resulta mucho más adecuado emplear métodos de estimación de costos que provengan tanto de datos reales como de datos teóricos. Como se ha comentado las curvas teóricas normalmente aportan información más aproximada de cuál es la variación relativa de costos según varía el tamaño de población. Es por esto que, tanto si hay datos de proyectos suficientes como si no, se debería conocer si en el país se dispone de la curva teórica asociada, elaborada de un modo suficientemente riguroso. En caso positivo se debería aprovechar para, tras el ajuste pertinente expuesto en el apartado 7.1, elaborar la curva resultado.

En caso negativo habría que plantearse si se dispone de recursos y tiempo suficiente como para elaborar la curva teórica para el país y si es posible construirla a partir de supuestos teóricos, según se describe en el apartado 7.2.

En el caso de que no se den los supuestos anteriores, se evaluará si es aceptable utilizar curvas disponibles de otros países o de otras tecnologías como curvas de referencia, según se describe en el capítulo 9.

Para el ajuste de las curvas teóricas/de referencia se deberá primeramente evaluar si hay datos de proyectos reales suficientes como para realizar dicho ajuste. En caso positivo se realizará el ajuste a partir de los datos de proyectos disponibles, según se describe en el apartado 10.1. En caso negativo se podrá realizar un ajuste a partir de unos coeficientes de mayoración/minoración razonados según se expone en el apartado 10.2.

Resumiendo, se plantean básicamente tres caminos alternativos para la determinación de la curva de costo de cada estrato:

1. A partir de datos reales (curva real).
2. A partir de datos teóricos (curva teórica) y sometiéndolas posteriormente a un ajuste (curva ajustada)
3. A partir de curvas de referencia y sometiéndolas posteriormente a un ajuste (curva ajustada)

Y siempre que sea posible, utilizar ambos tipos de curvas, real y teórica, de forma complementaria, de tal forma que se puedan aprovechar las ventajas de una y otra.

Finalmente, y una vez se cuente ya con las curvas de costo que se hayan considerado más adecuadas para cada estrato, se deberán contrastar las mismas, así como contemplar la posibilidad de hacer una serie de adaptaciones de las curvas. Estas adaptaciones son útiles para la interiorización en las curvas de costos de otros aspectos tan importantes como pueden ser los asociados a otras fases del ciclo del proyecto de la PTAR más allá de la construcción, a obras complementarias o al desarrollo comunitario y de operadores. También puede ser adecuado considerar la creación de subestratos. Estos aspectos se justifican y se desarrollan con más detalle el capítulo 11.

6 CURVAS A PARTIR DE DATOS REALES

En un plan de inversiones lo más deseable sería disponer de información suficiente de proyectos de PTAR ejecutadas en el país de estudio para, a partir de ellos, poder desarrollar las curvas de costos. Estas curvas se han denominado “curvas reales”, para abreviar.

Para poder elaborar unas curvas reales con cierto rigor es necesario ser cuidadoso con los datos empleados y su procesamiento. Este capítulo describe algunos aspectos a tener en cuenta en la recopilación y sistematización de la información, en la actualización de los costos y en la validación de la información recopilada. Todos estos pasos previos son necesarios antes de obtener la curva interpolada.

6.1 RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN

La calidad de las estimaciones que se realicen va a depender principalmente de la cantidad y calidad de datos con los que se cuente. Es por esto que la fase de recopilación de la información es muy importante, debiéndosele prestar especial atención e interpretar la información disponible con el mayor de los cuidados para poder obtener curvas lo más precisas posibles.

Búsqueda y solicitud de información de partida

La búsqueda y solicitud de información de partida es una labor que requiere un tiempo significativo, por lo laborioso y por la dependencia de fuentes de información externas que pueden tardar en aportar la información, por lo que, aunque sea necesaria para el final del plan, hay que empezar con este trabajo desde el inicio de los estudios del mismo.

Es importante destacar que las fuentes de datos ciegos no son recomendables porque no se conoce la calidad de la información y generalmente se han preparado a partir de costos totales de las actuaciones, sin discernir las infraestructuras que incluye, por lo que pueden dar resultados muy dispares y engañosos. Resulta mucho más adecuado acudir al análisis de proyectos y para ello en un comienzo contactar con las unidades ejecutoras de proyectos en el país y elaborar una base de datos con todos los proyectos de los que se disponga.

En cuanto a la idoneidad de los proyectos, lo más adecuado es disponer de proyectos relativamente recientes, de menos de 10 años de antigüedad, para contar con soluciones tecnológicas y diseños actualizados. No obstante en ocasiones esto no es posible, por lo que será adecuado evaluar por medio de juicio de experto si para cada una de las tecnologías consideradas en el análisis ha habido cambios tecnológicos considerables que recomienden descartar los proyectos más antiguos.

En esta búsqueda de proyectos será también necesario diferenciar entre nuevas instalaciones y remodelaciones o ampliaciones, pues la información de detalle necesaria en cada una de ellas será diferente.

Información a obtener y sistematizar

Para todos los proyectos analizados de nueva construcción será imprescindible recopilar y sistematizar, como mínimo:

- Tipo de proyecto:
 - Proyecto as-built. Esta es la información ideal para poder conocer las instalaciones realmente ejecutadas y los costos de las mismas.

- Proyecto de ejecución. En el caso de que la información disponible de algún caso provenga del proyecto de ejecución y no del as built, deberá ajustarse el costo final si se han producido variaciones importantes en la obra con respecto a lo previsto en proyecto.
- Año de construcción
- Año horizonte considerado en el proyecto
- Objetivo del tratamiento. Definir los límites de vertido (o las características del efluente en el caso de que vaya a haber reutilización) considerados en el proyecto.
- Variables climáticas y ambientales consideradas en el diseño: temperatura, altitud, etc.
- Unidades de tratamiento que componen la PTAR, o al menos la tecnología del tratamiento secundario.
- Presupuesto desglosado. No obstante, en los proyectos donde el limitado desglose del presupuesto no haga posible un análisis pormenorizado del alcance, se deberá al menos detallar las obras auxiliares o complementarias que incluye el proyecto aparte de la propia PTAR (línea eléctrica, camino de acceso, bombeos, colector de llegada, emisario de vertido, etc.).
- Si hay elementos de proceso que estén dimensionados para otro caudal distinto al de diseño, debe identificarse. Este sería el caso de las PTAR que cuentan con tratamiento primario para tratar el exceso de caudal en momentos de lluvia.
- Variables que reflejen el tamaño de la actuación, como son población servida proyectada para el año horizonte y caudal y carga contaminante de diseño, tomándose preferiblemente la información de las tres variables.

Con respecto a las variables que reflejan el tamaño de la actuación es necesario advertir que es muy importante discernir entre las poblaciones o barrios que simplemente figuran en el proyecto de la población a los que da servicio la PTAR y por tanto para los que se ha realizado el dimensionamiento, ya que no hacerlo suele ser un error muy recurrente en esta fase de recopilación de información. También es frecuente que exista una mala interpretación de los datos del tamaño de la planta cuando los dimensionamientos se realizan para un año horizonte pero solo se construye una primera etapa. Debido a aspectos como estos es importante que el personal que revise los proyectos tenga ciertos conocimientos de las plantas de tratamiento, de cómo son los proyectos en este sector, de lo que pueden ser prácticas habituales y de los chequeos que es necesario realizar, por lo que si no es un profesional del sector debería ser formado antes de proceder al análisis de la información de los proyectos.

Aunque no es imprescindible, resultaría deseable disponer también de la siguiente información:

- Las dimensiones de las unidades de proceso más significativas de la línea de tratamiento considerado, con el objeto de poder evaluar si el dimensionamiento realizado ha sido o no adecuado.
- Conocer si hay algún aspecto del contexto del proyecto que es probable que haya condicionado significativamente el costo de la PTAR. Algunos ejemplos al respecto serían que el terreno tenga una pendiente excesiva y que haya requerido de un movimiento de tierras mayor al habitual o que, contando con unidades de proceso enterradas, el terreno sea rocoso o tenga el nivel freático elevado.

- Presupuestos detallados y desglosados de los proyectos as-built.

Para hacer comparables los proyectos habrá que acotar los presupuestos al alcance pretendido, que habitualmente será el de una PTAR genérica. Este paso sería importante en cualquier infraestructura, pero es especialmente relevante en el caso de PTAR porque, como se ha comentado anteriormente, los proyectos suelen incluir obras auxiliares o complementarias, que varían de una PTAR a otra y por ello distorsionan su comparabilidad. Se restará del costo total del proyecto el correspondiente a las obras auxiliares o complementarias que se hayan llevado a cabo.

Adicionalmente, también es interesante analizar si es muy común la inclusión de algún tipo de obra complementaria en los presupuestos evaluados, con objeto de tenerla en cuenta en alcance que se defina para el plan de inversiones de PTAR en cuestión. Por ejemplo, las PTAR se suelen construir alejadas de las poblaciones, por lo que en un porcentaje elevado, cuando no existe una instalación previa, será necesaria la construcción de un emisario y, donde no sea viable la llegada del agua por gravedad al predio determinado para la PTAR, también será necesario un bombeo. En el caso de corroborar que la gran mayoría de PTAR cuenta con estos componentes, o con otros, se podría plantear incluir los mismos en el alcance del plan de inversiones, debiendo esto quedar claramente especificado en los informes asociados que se generen.

Para el caso de ampliación o rehabilitación de PTAR la casuística es muy grande. Por ello, además de la información especificada para proyectos de nueva construcción, la información a recopilar incluiría:

- Naturaleza de la actuación: puesta al día, rehabilitación total, rehabilitación parcial, ampliación capacidad prevista, ampliación de capacidad imprevista o ampliación de capacidad para aumentar requerimientos de calidad.
- Explicación de la actuación realizada, como mínimo de un modo superficial.

Toda la información ya sistematizada será necesario almacenarla adecuadamente en sistemas informáticos, por ejemplo en una base de datos.

Revisión de las obras complementarias incluidas en la información recibida

Aunque en un principio no sea objeto directo de la sistematización pretendida, la información de las actuaciones complementarias también es interesante recopilarla, ya que posteriormente puede ser muy útil si en el plan de inversiones se requiere hacer una estimación grosera del costo de las mismas con respecto a los de la PTAR y de este modo justificar los coeficientes que se aplicarán sobre las curvas de costos para interiorizar costos adicionales, según se especifica en el capítulo II.

Algunos ejemplos de actuaciones complementarias serían:

- Mejoras en la red de saneamiento
- Adecuación del camino de acceso a la PTAR
- Obras auxiliares para el acceso a la red eléctrica, incluido el centro de transformación en el caso de que el acceso a la red sea en alta tensión
- Obras auxiliares para el acceso a la red de agua potable
- Bombeo y emisarios de llegada a la PTAR
- Bombeo y emisarios de salida de la PTAR
- Tanques de regulación

- Tratamiento del excedente de pluviales
- Tratamientos avanzados para reutilización

6.2 ACTUALIZACIÓN DE COSTOS

Dado que los proyectos analizados corresponderán a diferentes años, para dar coherencia al análisis a realizar, será necesario seleccionar un año de referencia, que normalmente será el año de publicación del plan o el año anterior, y actualizar el costo de todas las instalaciones para el año seleccionado.

La actualización de costos se suele realizar mediante los índices de evolución de precios que publican los institutos de estadística. No obstante, en algunos países, no solo elaboran un índice genérico de evolución de precios sino que, además, se cuenta con índices diferenciados de la evolución de precios de la obra civil y equipos o incluso se cuenta con fórmulas oficiales para el cálculo de la evolución de los precios. Como es obvio se recurrirá a los índices más específicos que se disponga, pues serán los que reflejen más fielmente la evolución de precios que ha tenido lugar.

Es importante tener en consideración que momentos históricos de inflación extraordinaria en el país de estudio desestabilizarán el análisis. En estos casos, se considera necesario realizar la conversión a una moneda de referencia en la región que goce de una estabilidad razonable, como es el USD en Latinoamérica, y aplicar los índices de actualización sobre los costos ya en esta moneda. El siguiente box ilustra un ejemplo de lo expuesto.

Box 8. Actualización de costos en momentos de inflación extraordinaria

Con el objetivo de ilustrar cómo se actualizaría los costos en momentos de inflación extraordinaria se expone el modo de proceder en el procesado de información llevado a cabo en el *Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales* de Argentina (CEDEX, 2020b).

Se disponía un amplio banco de datos de costos de proyectos de PTAR, cuyos años de licitación variaban entre 2013 y 2018, momentos en que la inflación en el país osciló sustancialmente. La secuencia de cálculos llevados a cabo para la actualización de los costos se muestra en la siguiente tabla, con tres PTAR que se muestran a modo de ejemplo.

	Costo (ARS)	Año oferta	USD/ARS (año oferta)	Costo (USD)	Variación IPC USD a 2019	Costo (USD-2019)
PTAR 1	744.517.314	2016	15,74	47.300.973	1,06	50.139.031
PTAR 2	315.469.436	2013	6,06	52.057.663	1,09	56.742.852
PTAR 3	321.950.716	2018	25,5	12.625.518	1,02	12.878.029

Los equipos electromecánicos tienen la particularidad de que saltos tecnológicos pueden afectar significativamente a sus precios. Por ejemplo, la introducción de los difusores porosos finos fue una mejora en los procesos de lodos activos que hizo variar significativamente tanto costos de inversión (más elevados) como costos de explotación (más bajos debido a la mejor eficiencia de la nueva tecnología). Por lo expuesto resulta deseable que, principalmente cuando las líneas de tratamiento analizadas cuenten con un alto grado de tecnología, los proyectos analizados sean relativamente recientes. En el caso de que no sea posible conseguir una batería de proyectos suficientemente

amplia resulta necesario analizar los saltos tecnológicos que hayan podido tener lugar en el rango temporal de los proyectos disponibles y evaluar si es viable la adaptación de los costos al estado del arte actual. En el ejemplo expuesto de los lodos activos se debería decidir si se obvian los datos de PTAR disponibles anteriores a la introducción de los difusores porosos finos o si se modifican los costos disponibles de PTAR previas a este cambio tecnológico, adaptando costos tanto de inversión como de explotación a los del contexto actual.

6.3 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE “OUTLIERS”

Una vez sistematizada la información, se deberá representar gráficamente la nube de proyectos para el estrato analizado. Para ello se dispondrá en el eje de abscisas una magnitud indicativa del tamaño de la instalación, como puede ser la población servida por el sistema de saneamiento, y en el eje de ordenadas el costo relativo de la PTAR, como puede ser el costo por habitante servido. Esta representación servirá para identificar proyectos que se alejan significativamente del costo promedio que sería esperable, proceso conocido como identificación de “outliers”.

La siguiente figura muestra en gris la nube de datos disponibles para una línea de tratamiento concreta, junto a la curva azul, resultante del ajuste potencial por mínimos cuadrados de los datos. El punto señalado con una circunferencia roja ilustra claramente lo que sería un “outlier”, ya que presenta una desviación muy significativa con respecto al costo promedio que sería esperable.

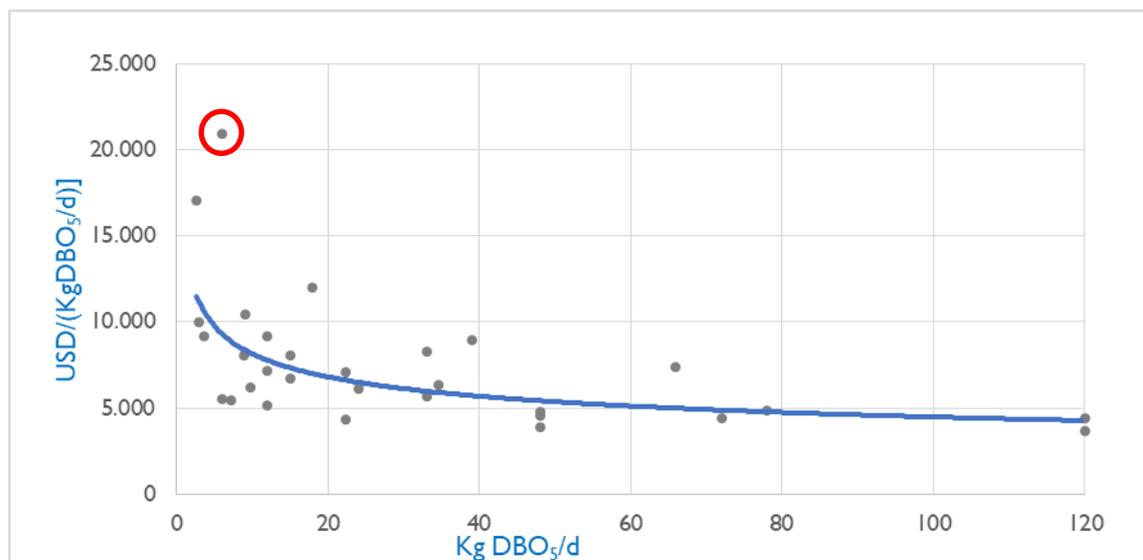


Figura 8. Identificación de “outliers”

Cuando se disponen de curvas teóricas para el país de estudio se puede hacer otro análisis para la identificación de “outliers”. En principio, la curva teórica refleja unos costos de inversión en unas condiciones ideales, donde las mediciones y los precios unitarios se definen teniendo en cuenta un contexto propicio, tanto en lo referente a los aspectos constructivos como en la accesibilidad. Debido a esto lo esperable es que los datos reales se encuentren por encima o en el entorno de la curva teórica, pudiéndose considerar el resto de datos como “outliers”. La siguiente figura muestra en gris la nube de datos disponibles para una línea de tratamiento concreta, junto a la teórica disponible representada en color verde. Los puntos señalados con una circunferencia roja, que se encuentran significativamente por debajo de la curva teórica podrían considerarse “outliers”.

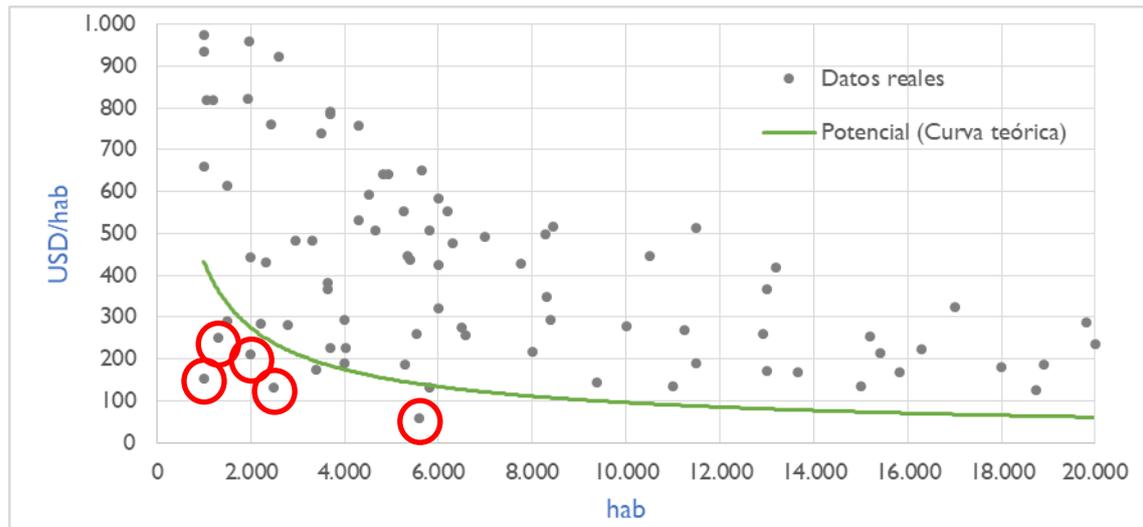


Figura 9. Identificación de “outliers” por comparación con la curva teórica

Una vez identificados los “outliers” se procederá a su análisis para evaluar si es adecuado o no considerar los mismos en el cálculo de la curva de costos.

Este análisis consiste en la revisión de la información del proyecto en detalle, para asegurar que:

- No ha habido ningún error de interpretación en el proceso de recopilación de la información.
- No se ha incluido en el coste alguna actuación complementaria.
- El dimensionamiento realizado es correcto.
- La solución tecnológica propuesta es razonablemente adecuada al contexto concreto.
- Se trata de un proyecto con condiciones locales muy atípicas y que, debido a ello, ha requerido de un costo extraordinario (cubrición por cercanía a la población, nivel freático muy elevado, condiciones geotécnicas muy desfavorables, etc.).

En el caso de que haya habido algún error de interpretación en el proceso de recopilación de información o de que se haya incluido en el coste alguna actuación complementaria, se deberán corregir los datos y asegurar que con las correcciones realizadas los datos correspondientes a los proyectos analizados dejan de ser “outliers”.

En el caso de que se trate de proyectos mal dimensionados o que claramente correspondan a una solución tecnológica mal enfocada, por ejemplo un lagunaje que se ha hecho por excavación en un terreno rocoso, deberán descartarse.

En el caso de que se trate de proyectos con un contexto local muy atípico, deberá evaluarse mediante juicio de experto la idoneidad de considerarlo o no dentro del análisis.

6.4 OBTENCIÓN DE LA CURVA DE COSTOS

Una vez realizado el análisis de “outliers” el último paso sería la obtención de la curva de costos a partir de los datos finalmente considerados, mediante el ajuste de los mismos.

El tipo de ajuste a realizar será el que, representando la economía de escala correctamente, ajuste mejor los datos. Habitualmente es el ajuste potencial por mínimos cuadrados el que resulta más adecuado, pero puede haber ocasiones en que un ajuste lineal, como cuando el rango poblacional

sea reducido, o un ajuste polinómico, como cuando haya saltos en la curva asociados a cambios en la línea de proceso por cuestión de su tamaño (introducción de automatización de equipos, desdoblamiento en líneas de proceso, etc.), pueden ser preferibles.

El modo más sencillo de realizar esta operación es por medio de hojas de cálculo, con las funcionalidades de ajuste gráfico automático de datos que disponen, que facilitan la fórmula de la curva ajustada así como su coeficiente de determinación (R^2) junto a la curva ajustada. La herramienta más común, que sería el software de Microsoft Excel, tiene la característica de que aporta un número de cifras significativas limitado para los coeficientes de la curva calculada automáticamente, lo que puede suponer una inexactitud en algunos casos. En estos casos será necesario acudir a métodos de cálculo alternativos, como por ejemplo la utilización de las funciones específicas de Microsoft Excel para la determinación de coeficientes para regresión lineal, según se explica en el Apéndice I.

El valor del coeficiente de determinación (R^2) refleja el grado de dispersión de los datos disponibles y, a partir de él, se podría establecer el error medio en la estimación del costo con el ajuste realizado.

Es importante destacar que una curva real se construye con los datos disponibles y que la distribución de los mismos por rango poblacional no tiene porqué ser homogénea. Lo más común es poder contar con más datos de la franja de población donde se dispone de más plantas y además donde la información sobre dichas plantas resulta más fiable. Esta franja de datos va a tener mucha incidencia en el valor medio y en la forma de la curva, y en la aplicación posterior de la curva para la estimación de costos se debe ser consciente de este aspecto.

Una vez determinada la curva, y con fines comparativos con otras curvas, resulta muy conveniente la representación en doble escala logarítmica (escala logarítmica en ambos ejes del gráfico). De este modo las curvas potenciales se transforman en rectas y la comparativa con otras curvas se vuelve mucho más sencilla y visual, ya que los factores de economía de escala se verán reflejados en función del paralelismo entre curvas, de modo que cuanto mayor sea la relación de paralelismo más similar será la economía de escala asociada a las mismas. La siguiente figura ilustra la comparativa entre una curva real (azul oscuro) y su correspondiente teórica (verde) representándola primero en escala normal y posteriormente en doble escala logarítmica.

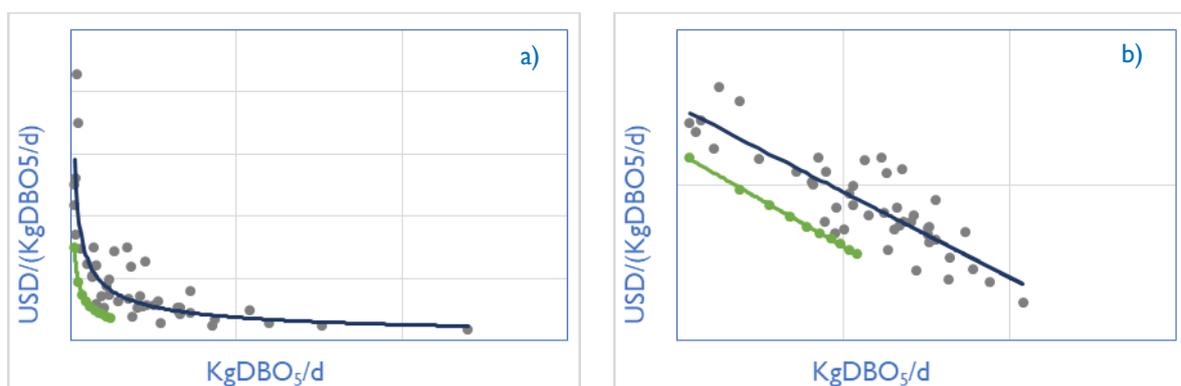


Figura 10. a) Representación en escala normal. b) Representación en doble escala logarítmica

7 CURVAS TEÓRICAS

Al margen de disponer de curvas reales suficientemente precisas, siempre será deseable contar con curvas teóricas, ya que estas permiten complementar y contrastar los resultados de las curvas reales. Además, en los casos en que no se disponga de curvas reales, las curvas teóricas serán la base más adecuada para la estimación de costos del plan de inversión.

Las curvas teóricas se elaboran a partir de los diseños tipo de unos supuestos teóricos cuyo costo se determinará a partir de la valoración de las mediciones de obra y equipos calculados mediante la aplicación de un cuadro de precios unitarios representativos del país de estudio.

Aunque no suele ser habitual, en ocasiones en los países ya hay disponibles curvas de costos teóricas elaboradas de un modo suficientemente riguroso. En estos casos el modo de proceder es bastante sencillo, pues solo habrá que analizar la información de base utilizada para su elaboración y el alcance considerado y actualizar las curvas. En el primer apartado de este capítulo se aportan recomendaciones al respecto.

En el caso de que no se disponga de curvas teóricas ya elaboradas, y siempre que se cuente con el tiempo y los recursos suficientes, sería conveniente construir la curva teórica para cada uno de los estratos definidos. En el segundo apartado se dan algunas recomendaciones a tener en cuenta para la elaboración de curvas teóricas.

La utilización de estas curvas teóricas en un plan de inversiones requerirá su ajuste ya que los diseños tipo considerados para la elaboración de las mismas corresponden a unas condiciones favorables, donde las mediciones y los precios unitarios se definieron teniendo en cuenta un contexto propicio, tanto en lo referente a los aspectos constructivos como en la accesibilidad. En el capítulo 10 se exponen los distintos caminos que es posible seguir para la realización de este ajuste, así como detalles del método a tener en cuenta en cada uno de ellos.

7.1 REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE CURVAS DISPONIBLES

En el caso de que se dispongan de curvas teóricas previamente elaboradas será necesario revisar la metodología seguida para su elaboración, así como las bases de partida consideradas, con el objetivo de conocer si se elaboraron de un modo suficientemente riguroso. También será necesaria la revisión del alcance para asegurar que el alcance considerado para la elaboración de las curvas se corresponde con el del plan de inversiones que se pretende acometer y, en caso contrario, realizar las modificaciones oportunas. De este modo si, por ejemplo, el alcance de la curva de costos incluyese el tratamiento para reúso y el alcance pretendido no lo contempla, debería estudiarse que minoración aplicar para que la curva resultado no incluyese el tratamiento de regeneración.

Por otro lado será necesaria la actualización de las curvas, empleando para ello los índices de precios más adecuados que se dispongan en el país. En el apartado 6.2 ya se ha expuesto cómo realizar la actualización de costos de proyectos y es también de aplicación para la actualización de curvas. Asimismo, en el caso de que las curvas teóricas tengan una antigüedad significativa, será necesario evaluar la composición de las líneas de tratamiento para asegurar que cuentan con soluciones tecnológicas y diseños actualizados, pudiendo considerarse en caso contrario el ajuste de los costos a partir de coeficientes razonados, según se exponía en ese mismo apartado.

En el caso de que no solo se cuente con las curvas, sino también con las herramientas de cálculo que se utilizaron para desarrollarlas, será posible una actualización mucho más adecuada. De este modo sería posible restablecer los costos partiendo de los precios unitarios actualizados de las

diferentes partidas de obra y equipos, así como adaptar el alcance e incluso modificar los diseños si las soluciones tecnológicas consideradas se considera que no son las más apropiadas.

7.2 ELABORACIÓN DE CURVAS TEÓRICAS

En las situaciones en que no se disponga de curvas teóricas en el país, aunque supone un importante esfuerzo, se pueden elaborar desde un plano teórico, a partir del conocimiento de los tratamientos más típicos del país. El procedimiento básico general constaría de los siguientes pasos:

- Desarrollo en hojas de cálculo de una herramienta de diseño básico de los principales elementos de las líneas de tratamiento cuyos costos se quieren estimar. Esta herramienta ha de permitir realizar los cálculos completos de toda la línea para una serie de tamaños de población (caudales y cargas diferentes).
- Propuesta de una implantación tipo de los elementos de proceso en un terreno ideal.
- Estimación de las mediciones de las partidas más importantes del proceso, a partir de los diseños básicos y las implantaciones tipo consideradas.
- Aplicación de los precios de ejecución de las principales partidas presupuestarias. Para ello habrá que recopilar previamente estos precios de obra.
- Aplicación de coeficientes para compensar las partidas minoritarias no medidas, que dependerá de las tecnologías implantadas.
- Contraste de los resultados con datos reales.

En general estas curvas se elaboran para unas condiciones ideales, en las que no hubiera problemas constructivos ni instalaciones complementarias, partiendo de unos datos de cargas y caudales típicos por tamaño de población, llegando a los requisitos de vertido que marca la norma o a los niveles que comúnmente se manejen en el país.

Aunque el objeto de esta monografía no sea realizar una descripción detallada de los diseños de los supuestos teóricos a considerar en la determinación de curvas teóricas, en este apartado se explica en qué se basan y se dan algunas pautas genéricas para elaborarlas.

En la actualidad desde la AECID se están elaborando modelos para calcular, entre otras cosas, costos de inversión para varias líneas de tratamiento habituales en Latinoamérica. El objetivo es ofrecer una herramienta abierta y transparente que pueda ayudar a los responsables de la planificación sectorial de los distintos países a elaborar de un modo relativamente sencillo curvas de costos teóricas en las que apoyarse para el cálculo de costos para un plan sectorial de PTAR.

Aspectos relevantes

Habrán decisiones que deberán tomarse para abordar la realización de estos diseños, como son:

- El rango poblacional que se desea que reflejen las curvas teóricas a obtener. Esto no es algo que deba tomarse a la ligera, pues si el rango es muy amplio el abanico de tecnologías y líneas de tratamiento a considerar también lo será, lo que complicará los diseños básicos a realizar.
- Los procesos que formarán parte de las líneas de tratamiento consideradas. Es importante tener en cuenta que en algunos casos los procesos de las líneas de tratamiento cambiarán con el tamaño de la PTAR. Por ejemplo, es habitual que en climas fríos en líneas basadas en filtros percoladores el tratamiento primario sea Tanque Imhoff en pequeñas poblaciones y en poblaciones mayores se considere decantación primaria. Para ello será necesario

especificar en qué tamaños de PTAR tendrían lugar ambos procesos, pudiendo existir solapamientos como los mostrados en la siguiente figura.

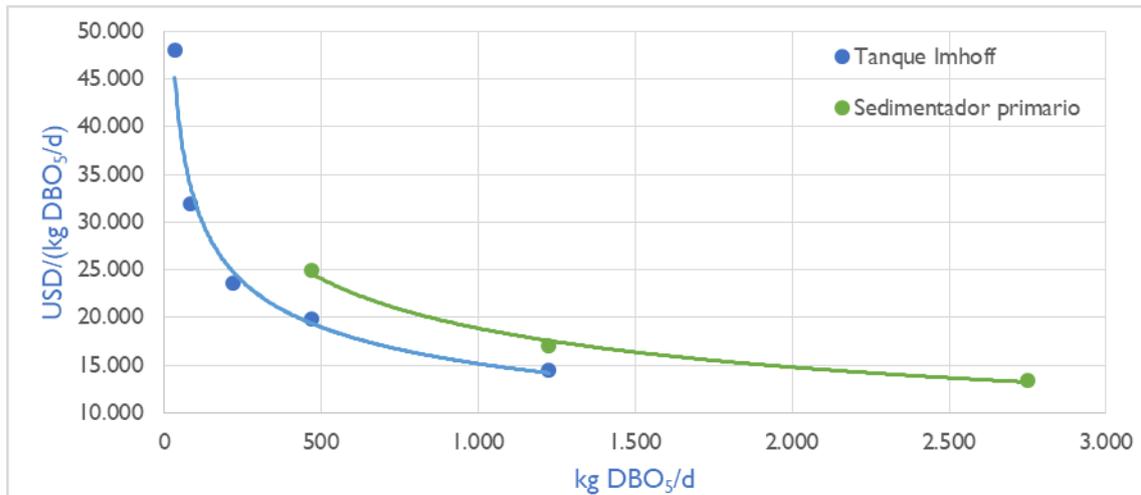


Figura 11. Curva de costo con solapamientos por cambio tecnológico en el tratamiento primario

- El grado de automatización, que generalmente variará en función del tamaño de la PTAR considerado. Es habitual que en pequeñas poblaciones no se considere la automatización (rejas de limpieza manual, desarenadores estáticos...) y en grandes poblaciones sí (rejas de limpieza automática, desarenador-desengrasador aireado...). Al igual que en el caso anterior será necesario especificar en qué tamaños de PTAR se considera la automatización, pudiendo existir también solapamientos.
- Los procedimientos de diseño que habitualmente consideran los proyectistas del país para el diseño de los procesos considerados en las líneas de tratamiento predominantes.
- En cuanto a la medida del caudal habrá que determinar el método y el/los punto/s de la PTAR donde se realizaría la medida, algo que también podrá variar con el tamaño de la PTAR.
- En las líneas de tratamiento donde no se produzca la digestión del lodo en la línea de agua, como podrían ser los casos de los filtros percoladores en climas fríos o los lodos activos convencionales, se deberá considerar su digestión en la línea de lodos. Si se considera o no aporte externo de calor en el digestor será una decisión clave que tendrá un peso relevante tanto en el costo de inversión final, como en los costos de explotación asociados.
- La inclusión de procesos adicionales en la línea de tratamiento, como para la regeneración del efluente para reúso, para la desinfección, la recuperación del biogás generado o la eliminación del fósforo vía química, serían también decisiones a considerar. En estos casos se podrán hacer diseños básicos modulares, tipo mecano, de modo que se calculen los costos de los distintos módulos independientemente y se dé la oportunidad al usuario de la herramienta de incluir procesos adicionales o no, según las necesidades que se presenten en la planificación sectorial concreta.

Límites de vertido

Los límites de vertido serán un aspecto determinante del costo de las soluciones a plantear, pues es posible que condicionen la composición de la línea de tratamiento habitual para una tecnología concreta. En ocasiones pueden suponer unidades de proceso adicionales, como sería el caso de la

precipitación química en cola del tratamiento para la eliminación de fósforo o de los tratamientos de desinfección también en cola cuando los límites de coliformes fecales son restrictivos. En otras ocasiones los límites pueden también restringir la aplicabilidad de algunas tecnologías, por ejemplo unos límites restrictivos en cuanto a eliminación de nutrientes harían inviable la utilización de lagunas de estabilización.

Dado que lo habitual es considerar un único escenario en cuanto a límites de vertido, es importante que los límites se seleccionen cuidadosamente, asegurando que estos reflejen la realidad de los proyectos que se pretendan llevar a cabo en el plan de inversiones.

En ocasiones hay normas que marcan distintos límites en función del tamaño poblacional y en estos casos este aspecto debe tenerse en consideración la elaboración de los diseños tipo en distintos tamaños poblacionales. Un ejemplo podría ser el caso habitual en el que únicamente se exige tratamiento primario a poblaciones que están dentro de un determinado rango de población.

Los límites normativos pueden ser muy diferentes en los distintos países. A modo ilustrativo el box 9 muestra la variabilidad existente incluso en cuatro países muy cercanos y con un contexto climatológico y socioeconómico similar.

Box 9. Normativas en Latinoamérica

En Latinoamérica existe mucha variabilidad en cuanto a los límites específicos definidos por las distintas normas. La siguiente tabla expone los límites normativos de cuatro países con un contexto climatológico y socioeconómico bastante similar, evidenciando esta variabilidad.

Comparativa de niveles de calidad exigidos por las normas de diferentes países.

Parámetro	Cuba ⁽¹⁾	Honduras ⁽²⁾	El Salvador ⁽³⁾	Bolivia ⁽⁴⁾	Guatemala ⁽⁵⁾	Nicaragua ⁽⁶⁾
DBO ₅ (mg/L)	30-40-60	50	60	80	100	110
DQO (mg/L)	70-90-120	200	150	250 ⁽⁷⁾	---	220
SST (mg/L)	---	100	60	60	100	80
P total (mg/L)	2-4-10	5	---	---	10	10
N amoniacal (mg/L)	---	20	---	4	---	---
NTK (mg/L)	5-10-20	30	---	---	---	---
N total (mg/L)	---	---	---	---	20	30
CF (NMP/100mL)	--- ⁽⁸⁾	5x10 ³	--- ⁽⁹⁾	1x10 ³	1x10 ⁴	1x10 ³ ⁽¹⁰⁾

(1) NC 27:2012. Para ríos y embalses, dependiendo del tipo A-B-C

(2) Acuerdo N°058

(3) RTS 13.05.01:18

(4) Disposición transitoria. Decreto Supremo N° 24176

(5) A.G. N° 236-2006. Los límites establecidos en esta tabla corresponden con los límites impuestos para municipalidades que deberán ser alcanzados antes de 2032

(6) Decreto N°21-2017. Aguas de alcantarillado

(7) Aplicable a descargas de procesos mineros e industriales en genera

(8) La norma técnica de calidad del agua como medio receptor que se establezca, debe tomar de referencia un valor de 1.000 UFC/100mL

(9) En aguas superficiales terrestres se regula por norma de inmisión y solo para las clases A y B (200-1000, respectivamente para superficiales). En vertidos a zonas costeras, sin embargo, sí cuenta con límites de emisión, que varían entre 200 y 1000, dependiendo de la clasificación del medio.

(10) Para el periodo 2027-2030

Comparativamente, los límites establecidos para la DBO_5 en la norma nicaragüense y guatemalteca son mucho más laxos que en el caso de las normativas de El Salvador y Honduras. También es significativo que en el caso de El Salvador, se haya optado por no imponer límites para los nutrientes y que otros países, como Honduras fijen valores límites para nutrientes restrictivos y muy difíciles de alcanzar, como los 5 mg/L para el fósforo total.

Se observa también una heterogeneidad en la relación DQO/DBO_5 , parámetros que están íntimamente relacionados desde el punto de vista del tratamiento de las aguas residuales. En las aguas brutas dicha relación se encuentra en el orden de 1,2 a 2, pero tras el tratamiento de las aguas residuales, el efluente consigue una reducción de la DBO_5 con un rendimiento del 90% aproximadamente, y la relación DQO/DBO se dispara pudiendo llegar a 5. En el caso de Nicaragua se puede observar que esta relación DQO/DBO es excesivamente baja, por lo que realmente el límite lo determinará la DQO y no la DBO .

Respecto a los coliformes fecales, El Salvador ha optado por no imponer un límite específico, mientras que el resto lo limitan de manera importante. Imponer límites de coliformes fecales por debajo de 1×10^4 implica que vaya a ser necesario un tratamiento de desinfección, y que por tanto los rendimientos de reducción de la DBO_5 y SS en etapas de tratamiento previas deben ser elevados, lo que puede condicionar el tren de tratamiento a considerar.

Es importante comentar que, aunque los distintos límites normativos aparentemente supongan un aspecto esencial a la hora de comparar curvas de costos de distintos países, la incidencia de los mismos sobre los costos es relativa, pues lo verdaderamente relevante a estos efectos es la composición del tren de tratamiento necesario para llegar a los límites normativos. La gran mayoría de procesos se dimensionan a partir de la carga superficial/volumétrica o del tiempo de retención hidráulica, por lo que la concentración de salida, que será la magnitud relevante a efectos normativos, no suele resultar decisiva. Lo que sí que puede resultar muy relevante a efectos de costos es cuando la normativa es tan laxa o tan exigente que hace necesario un tren de tratamiento distinto al habitual. Un ejemplo paradigmático al respecto sería una norma que hiciese viable tratar el agua residual doméstica únicamente con un pretratamiento y un RAFA, obviando el post-tratamiento de afino del efluente del RAFA al que obliga la gran mayoría de las normas. También puede resultar relevante el hecho de que la normativa considere parámetros adicionales a la materia orgánica, como por ejemplo la eliminación de nutrientes o desinfección, ya que los parámetros de diseño de los procesos pueden variar o podría ser necesaria la inclusión de procesos adicionales en el tren de tratamiento.

Variables a considerar en los diseños tipo

Para la elaboración de estos diseños básicos será también necesario contar con información específica del estrato concreto que se esté analizando, que serán los parámetros de entrada a los modelos. Aunque los parámetros concretos dependerán de los procesos que se seleccionen para conformar las líneas de tratamiento predominantes, a continuación, se exponen los generales, requeridos en casi todos los casos, y siempre hablando desde la perspectiva de PTAR puramente domésticas:

- La temperatura media del agua residual en el mes más frío del año (si no es posible disponer de este dato directamente se recurriría a su cálculo a partir del de la temperatura del aire)
- La dotación y las cargas contaminantes unitarias

- Infiltración promedio, referida al caudal medio doméstico.
- Coeficientes de caudal máximo diario y máximo horario, referidos al caudal medio doméstico.
- La naturaleza de las redes: separativa o unitaria. En el caso de redes separativas será requerido un coeficiente, referido al caudal medio o máximo, asociado a las conexiones erradas y en el caso de red unitaria otro coeficiente, también referido a caudal medio o máximo, de la aportación a la red en el episodio de lluvia promedio considerado.
- Unos precios unitarios de las mediciones de obra y equipos determinados en los diseños, representativos del país de estudio.

Otras variables más específicas requeridas en procesos concretos serán, por ejemplo, la altitud en los lodos activos, la precipitación en los lechos de secado, la temperatura del aire promedio del mes más frío en lagunas de estabilización o el tipo de material de relleno en filtros percoladores.

Partidas a considerar

En el análisis de presupuestos se puede observar que hay una serie de partidas en la obra civil y los equipos electromecánicos que suponen un gran porcentaje del monto total, dependiendo las mismas del tipo de tratamiento. Son estas partidas las que deberán ser cuantificadas en los diseños realizados.

Posteriormente sería necesario aplicar unos coeficientes a aplicar sobre el costo correspondiente a las partidas principales para cubrir el resto de las partidas más diversas, de menor cuantía y más difíciles de estimar de manera precisa en diseños básicos, como pueden ser conducciones, valvulería, pequeñas cámaras, compuertas, instrumentación, urbanización o instalación eléctrica.

A continuación se nombran las principales partidas de costos que, al menos, se deberían considerar:

En obra civil:

- Desbroce
- Excavaciones
- Excavación en zanja
- Hormigón
 - Cimentaciones
 - Muros
- Acero
- Viales
- Cerramiento
- Membrana de impermeabilización en lagunas y otros
- Rellenos de piedra en humedales
- Edificio de control

En equipos electromecánicos

- Bombas
- Equipos de aireación en lodos activos
- Rellenos plásticos en filtros percoladores

Una vez determinadas las partidas principales, en forma de mediciones de obra y equipos, se aplicarían a los mismos unos precios unitarios actualizados, para lo que es habitual recurrir a las

bases de datos oficiales que se suelen tomar como referencia en la definición del costo en licitaciones. Finalmente se obtendría un costo que, como se ha comentado, debería incrementarse con coeficientes, dependientes de cada tecnología, para que cubrieran las partidas no consideradas.

Los costos finalmente definidos deberían ser contemplados sin impuestos ni otras variables típicas (gastos generales, beneficio industrial...) porque frecuentemente estos porcentajes han ido modificándose a lo largo de los años e introducirían ruido si posteriormente se desea comparar las curvas resultado con otras.

8 RELACIÓN CURVAS TEÓRICAS Y CURVAS REALES

Es importante conocer las ventajas de las curvas teóricas y las reales para saber cuándo será adecuado utilizar unas u otras, o cuando apoyarse en unas para la elaboración de las otras. Las curvas realizadas con datos reales proporcionarán una información más aproximada de dónde puede encontrarse el orden de magnitud de los costos pero, probablemente, las curvas teóricas podrán aportar información más aproximada de cuál es la variación relativa de costos según cambia el tamaño de población. Del análisis de estas ventajas se obtiene el árbol de decisión orientativo del camino más adecuado a seguir para cada estrato, expuesto en la figura 7.

También resulta interesante conocer la relación existente entre curvas teóricas y reales, con objeto de poder utilizar las curvas teóricas para obtener costos reales. En este capítulo se analiza la relación existente entre una serie de curvas teóricas y reales para una misma línea de tratamiento, en un mismo país y en un rango poblacional similar. Los casos que se abordan corresponden a las situaciones donde se contaba con ambas curvas teniendo un rango poblacional similar y donde el número de datos reales disponible era significativo, y por tanto era razonable realizar la comparación.

Dado que las curvas de costo se calculan generalmente mediante un ajuste de tipo potencial, la mejor manera de evaluar si existe un paralelismo en valor relativo entre las dos curvas consiste en representarlas en doble escala logarítmica. Una eventual relación de paralelismo perfecta indicaría que la variación relativa de los costos según varía la población es la misma, es decir el factor asociado a la economía de escala sería igual. Este tipo de representación ha sido utilizada en este capítulo por el motivo expuesto.

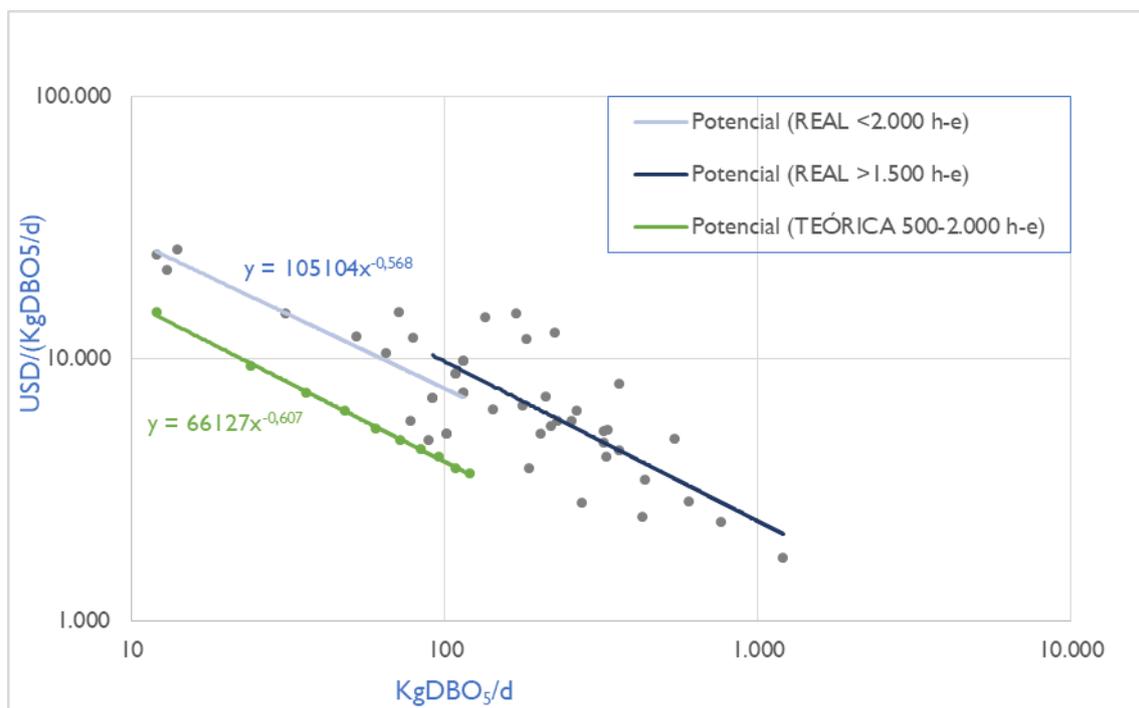


Figura 12. Curvas real y teórica de procesos de filtros percoladores en España

La figura 12 representa la estimación de costos para PTAR de filtros percoladores en España. Si bien los costos estimados por la curva teórica son sustancialmente menores que con la real, se puede ver que la relación de paralelismo que se obtiene entre las curvas teórica y real para un rango poblacional similar es bastante obvia. La curva real resulta entre un 95% y un 114% mayor que la

teórica. La pendiente en esta representación viene determinada por el exponente de la relación potencial. Por tanto, quiere decir que la curva teórica y la real están mostrando la misma evolución con el tamaño de población y, en definitiva, que ambas curvas estarían mostrando la misma evolución de la economía de escala.

En otros casos, sin embargo, esta representación mostraría que aparentemente las curvas reales y teóricas difieren de manera significativa. Este podría ser el caso que se refleja en la figura siguiente que muestra la relación entre la estimación teórica y la real de fangos activos realizada para España.

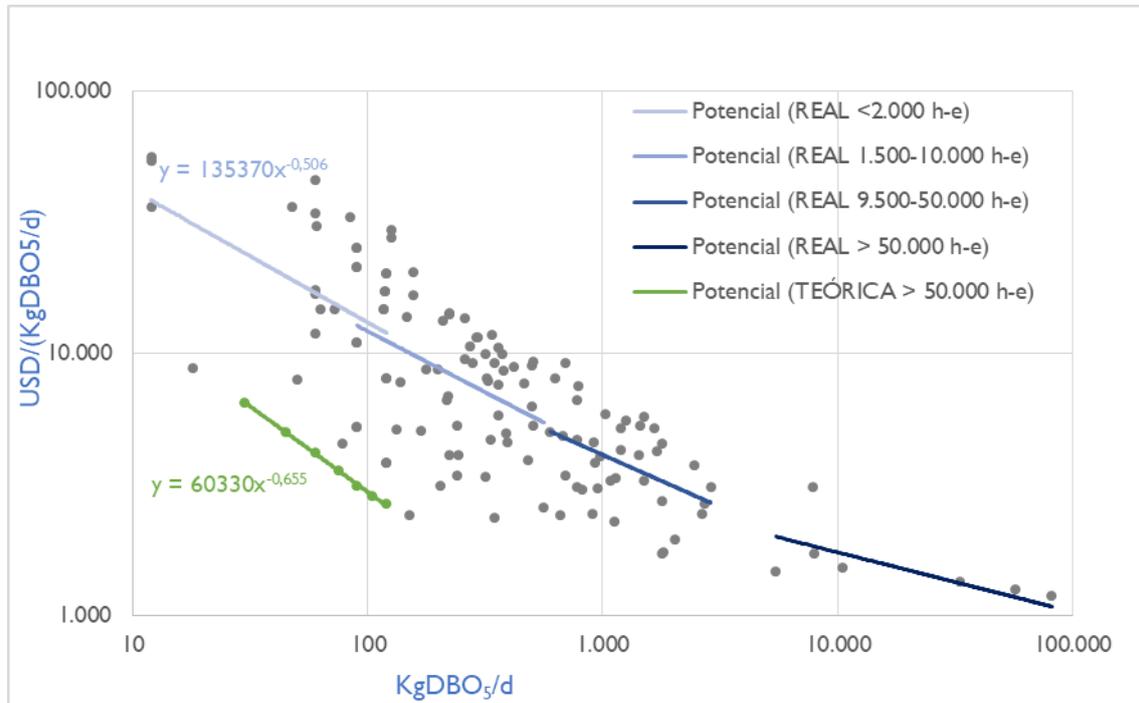


Figura 13. Curvas real y teórica de procesos de fangos activos en España

Sin embargo, como se puede apreciar, la estimación teórica solo está evaluada para el rango de las pequeñas poblaciones y, consecuentemente, solo para un tipo de proceso de fango activo (la aireación extendida). Esto introduce dos diferencias que deberían ser tenidas en cuenta al comparar curvas y que son debidas al diferente rango poblacional en el que son desarrolladas: es probable que haya cambios en las tecnologías que determinen la curva y la forma de la curva en curvas reales va a estar condicionada por la disponibilidad de datos de que se disponga en cada franja de población.

Esta última diferencia es importante destacarla: mientras una curva teórica se construye con un resultado de un escenario a intervalos de población, una curva real se construye con todos los datos de que se disponga. En España, la mayor parte de los datos de plantas de fangos activos se localizan en ciudades de tamaño intermedio y como se puede intuir esta franja de datos va a tener mucha incidencia en el valor medio y en la forma de la curva.

Siguiendo con el ejemplo, si se desglosa la curva por rangos de población, tal como se muestra en la figura 13, se podría apreciar que la relación existente en el rango concreto en el que los datos son comparables sí mostraría ese paralelismo.

La relación de paralelismo que se obtiene es también bastante obvia en este caso. No obstante es importante tener en consideración que el número de PTAR con costos disponibles era bastante bajo para el rango poblacional correspondientes a la curva teórica. En este caso la curva real es

entre un 465 y un 595% mayor que la teórica. Estos porcentajes resultan excesivamente elevados, lo que pone en cuestión la calidad de los diseños básicos realizados para la elaboración de la curva teórica y aconseja revisar los métodos de diseño adoptados, las partidas consideradas y los coeficientes utilizados para cubrir el resto de las partidas más diversas.

En otros tipos de tecnología, sin embargo, puede resultar que las estimaciones teóricas estén mucho más próximas a las estimaciones reales. En la figura siguiente se puede ver un ejemplo de esta situación. Se trata de la comparación entre las curvas reales y teóricas para humedales artificiales subsuperficiales en España. La mayor coincidencia en este caso se podría explicar por diferentes circunstancias: los técnicos que han realizado las curvas tiene un conocimiento mayor de aplicación de estas tecnologías para pequeñas poblaciones que de las tecnologías intensivas, con lo que se obtiene una mejor aproximación; estas tecnologías son mucho más sencillas en los elementos que incluye, por lo que tiene menos partidas presupuestarias diferentes y es menos propensa a la aparición de costos no estimados, lo que genera una variabilidad mucho menor; como en España se implantan normalmente solo allí donde las circunstancias locales son especialmente favorables para ello, van a estar siempre más cerca de unas condiciones ideales; etc.

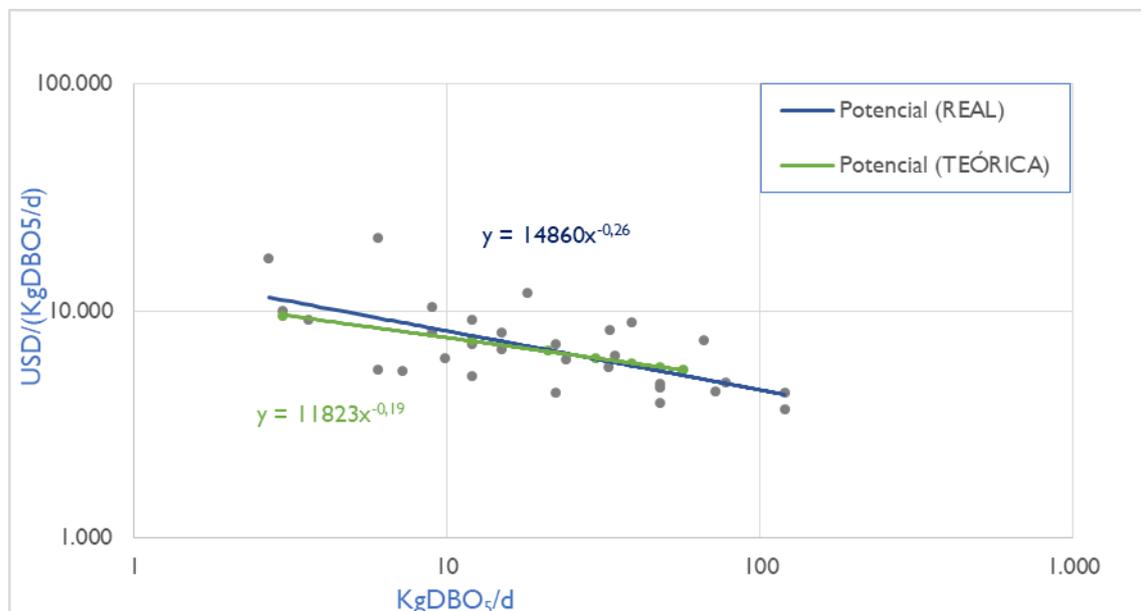


Figura 14. Curvas real y teórica de procesos de humedales artificiales en España

Del análisis realizado en este capítulo se desprenden dos conclusiones relevantes:

- El diferente comportamiento de las curvas obtenidas de forma teórica frente a los datos reales evidencia la necesidad de que se realice un ajuste posterior a las curvas teóricas cuando sean estas últimas las que se utilicen para la estimación de costos.
- La relación de paralelismo entre curvas teóricas y reales resulta bastante obvia cuando ambas están calculadas para un mismo rango de tamaño de PTAR y por tanto es perfectamente viable la utilización de curvas teóricas para la determinación de la curva resultado tras ajustarla con datos reales. Además, en el caso de proceder de este modo, la curva resultado contaría tanto con la principal ventaja de las curvas reales (el orden de magnitud de los costos) como con la de las curvas teóricas (reflejan mejor la variación relativa de los costos conforme crece el tamaño de la PTAR).

9 UTILIZACIÓN DE CURVAS DE APOYO ELABORADAS PARA OTRAS SITUACIONES

En los casos en que no se disponga de curvas para la línea de tratamiento seleccionada, ni sea viable elaborar curvas reales ni teóricas, puede optarse por tomar otras curvas de referencia para la determinación de las curvas de costos.

Estas curvas de referencia podrán ser curvas teóricas o reales elaboradas en el país para otras líneas de tratamiento y/o para otros estratos o, incluso, curvas elaboradas en otros países para la línea de tratamiento seleccionada.

La utilización de unas u otras curvas, se decidirá tras analizar cuál es más adecuada para el caso concreto. Para ello será necesario evaluar las variables que tengan una influencia notoria en la forma de la curva y posteriormente tratar de seleccionar la/s curva/s de referencia elaboradas en un contexto similar o con una línea de tratamiento similar al caso de estudio concreto.

Este capítulo se centra en la utilización de curvas de referencias procedentes de otros países para el estrato de estudio, que sería el caso más complejo y al mismo tiempo más habitual. Para el caso de la utilización de curvas de referencia otras líneas de tratamiento consideradas en otros estratos, pero del mismo país, se podrían seguir los mismos planteamientos que se exponen aquí.

En el primer apartado se muestran a modo de ejemplo una serie de curvas que podrían ser utilizadas de referencia y que han sido obtenidas en trabajos donde el CEDEX ha participado. En el segundo apartado se detallan los factores principales a tener en cuenta en la valoración de qué curvas del abanico disponible sería más adecuado utilizar. Al final de este capítulo se expone un ejemplo de selección de curvas de referencia.

Como es obvio la utilización de estas curvas de referencia en un plan de inversiones requerirá de un ajuste posterior, que podrá realizarse o bien por medio de datos reales o bien por evaluación teórica de diferencias entre el caso de estudio y el considerado para la elaboración de la curva de referencia seleccionada, que habitualmente implicarán la aplicación de un factor de mayoración o de minoración sobre la curva de referencia. En el capítulo 10 se exponen los distintos caminos que es posible seguir para la realización de este ajuste, así como detalles del método a tener en cuenta en cada uno de ellos.

9.1 IDENTIFICACIÓN DE CURVAS DE REFERENCIA

Cuando sea necesario contar con curvas de referencia puede ser interesante realizar una búsqueda en manuales y planes de saneamiento publicados en países del entorno. En el Anexo I se muestran una serie de ejemplos de estas curvas, tanto teóricas como reales, elaboradas en diferentes trabajos en los que el CEDEX ha estado involucrado. Estos trabajos han sido los siguientes:

- *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España en 2010 (MARM, 2010).
- *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca*, de España, elaborada por el CEDEX en el año 2011 (CEDEX, 2011).
- *Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales en la República de El Salvador*, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno de la República de El Salvador en el año 2016 (MARN, 2016).

- *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamientos de aguas residuales*, publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia en 2021 (MMAyA, 2021).
- Estudios para el plan de inversión en tratamientos de aguas residuales, dentro de la *Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR)* de Bolivia, en el año 2019.
- Estudios para el plan de inversiones del *Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PNTAR)* de Argentina, en el año 2020.

En el futuro, según se vayan realizando nuevos estudios en diferentes países podría constituirse un repositorio donde poder disponer de este tipo de curvas que se puedan utilizar de referencia.

En la información recogida en el Anexo I se ha hecho un esfuerzo por homogeneizar la información referente a los tratamientos y por actualizar los datos de costos.

A continuación, se exponen las cinco líneas de tratamiento en las que, por considerarse las más habituales en Latinoamérica, se basa la exposición realizada en el Anexo I.

- Línea 1 RAFA+FP: Reactor anaerobio de flujo ascendente + Filtro percolador
- Línea 2 FP: Tratamiento primario + Filtro percolador
- Línea 3 AE: Aireación extendida
- Línea 4 LAG: Lagunas de estabilización
- Línea 5 HUM: Tanque Imhoff + Humedales artificiales de flujo subsuperficial

En todos los casos las líneas de tratamiento se han configurado para lograr un efluente donde se haya reducido una gran parte de la materia orgánica y se obtenga un lodo estabilizado, por lo que las líneas de tratamiento cuentan con: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento de lodo. De este modo, y aunque no venga detallado en su descripción, en todas las líneas se considera un pretratamiento consistente en rejillas de desbaste y desarenador. También se considera un tratamiento de lodos consistente en lechos de secado, contando adicionalmente con espesado de lodos en la línea 3 y con digestión anaerobia a temperatura ambiente en los casos que se considera decantación primaria como tratamiento primario en la línea 2.

Las curvas en todos los casos se han convertido a USD y actualizado para el año 2019 para que pudiesen ser comparables, incluyéndose en el Anexo I la información de detalle sobre los procedimientos y ratios de conversión aplicados al respecto.

En las siguientes figuras se muestran a modo de ejemplo, una comparativa de una selección de curvas teóricas y reales disponibles para las cinco líneas consideradas. El detalle de cada una de estas curvas se puede ver en el Anexo I.

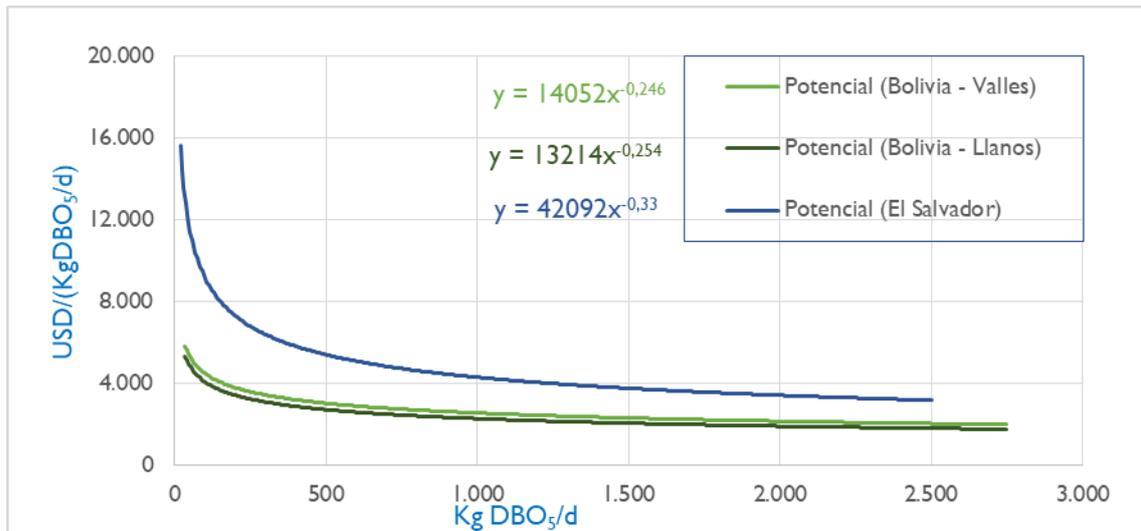


Figura 15. Comparativa de las curvas teóricas disponibles para la “Línea 1 RAFA+FP”

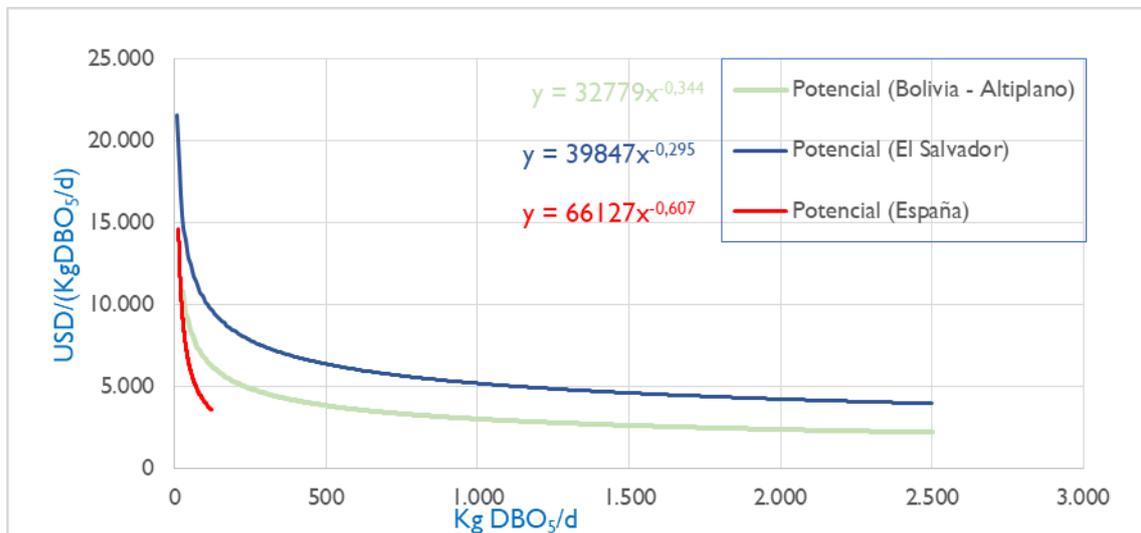


Figura 16. Comparativa de las curvas teóricas disponibles para la “Línea 2 FP”

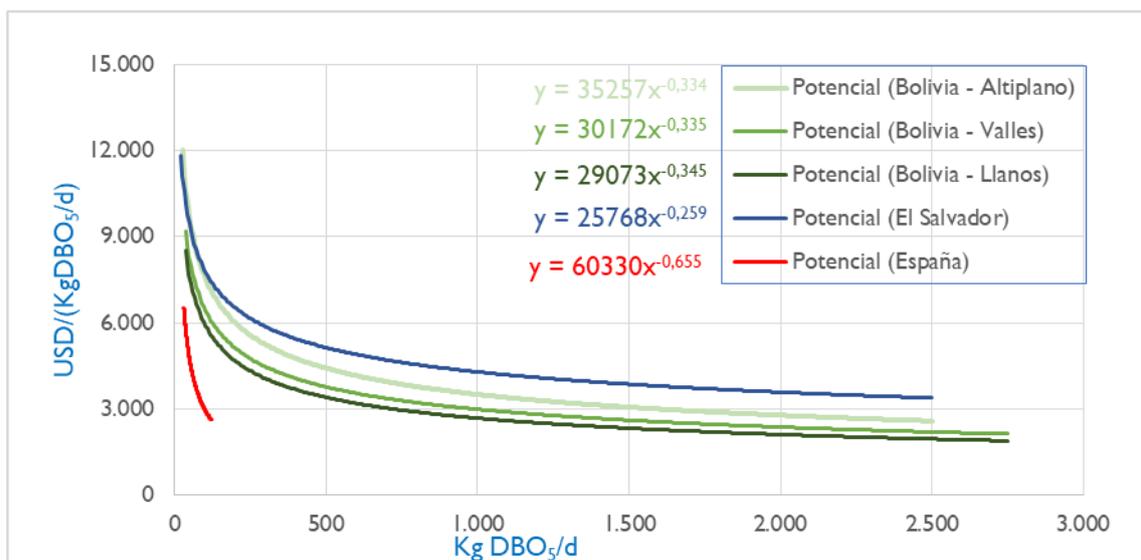


Figura 17. Comparativa de las curvas teóricas disponibles para la “Línea 3 AE”

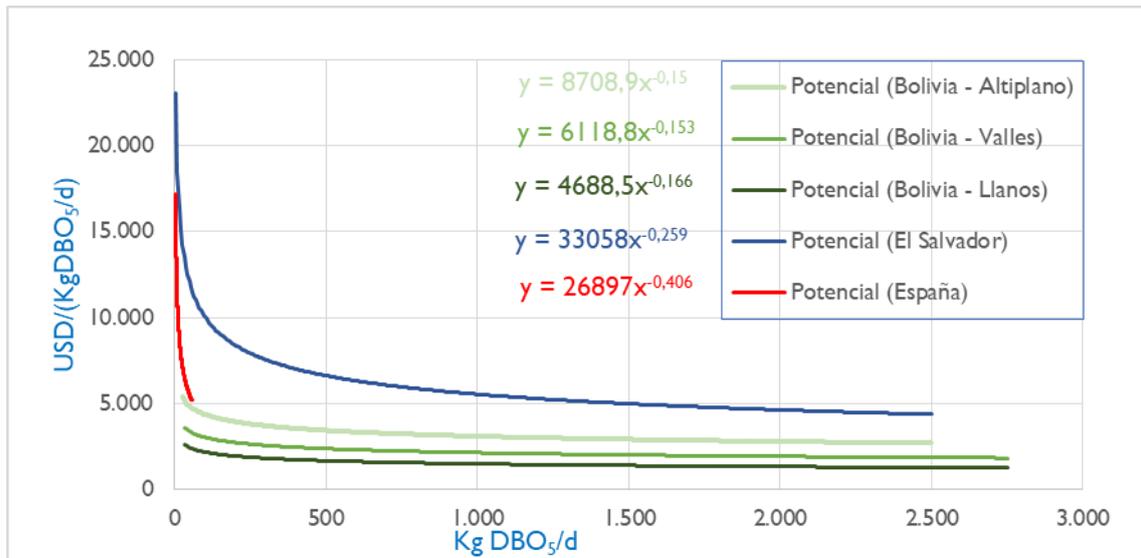


Figura 18. Comparativa de las curvas teóricas disponibles para la “Línea 4 LAG”

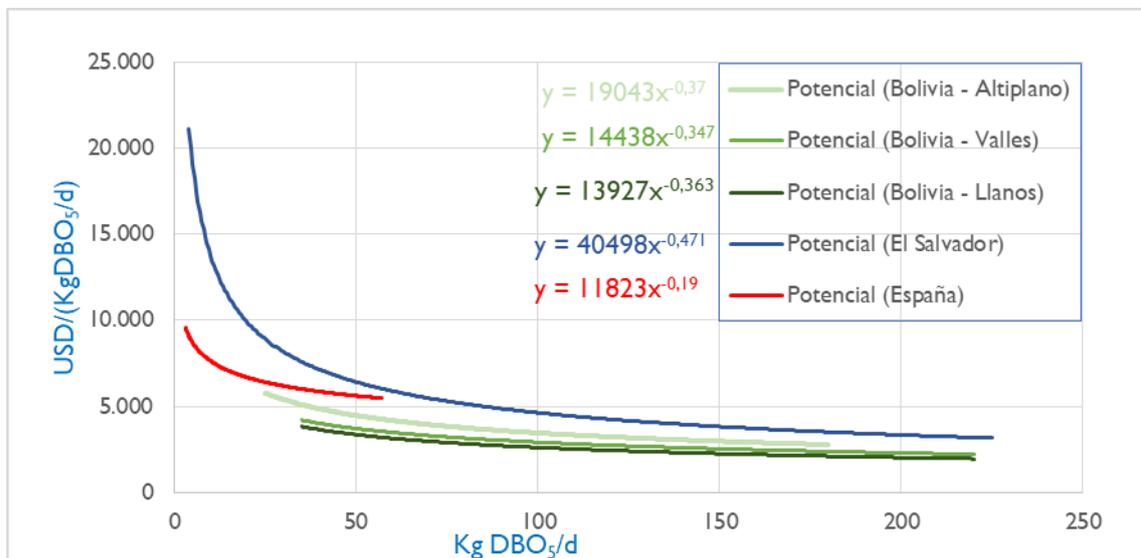


Figura 19. Comparativa de las curvas teóricas disponibles para la “Línea 5 HUM”

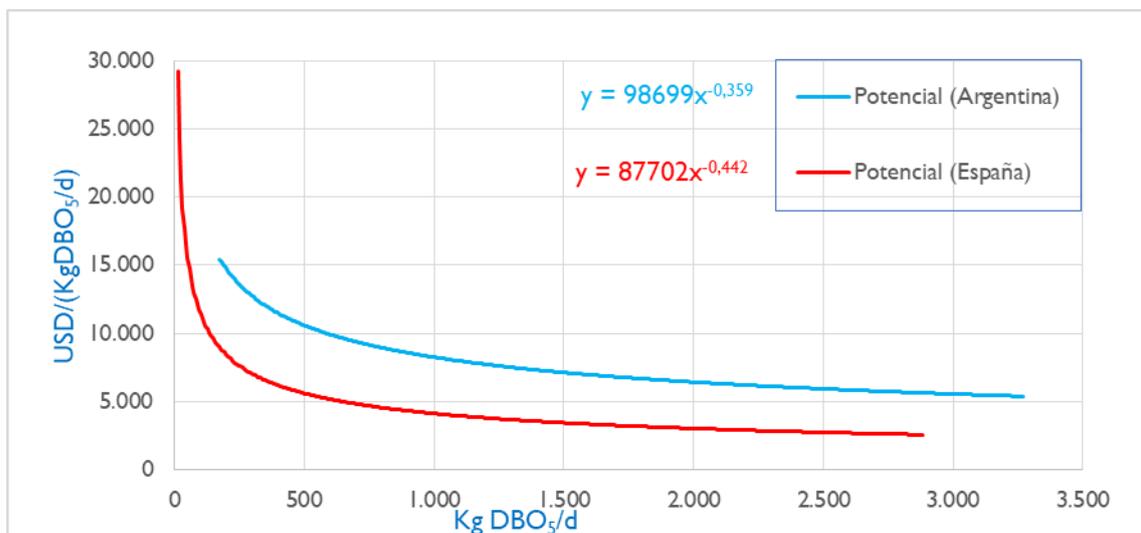


Figura 20. Comparativa de las curvas reales disponibles para la “Línea 3 AE”

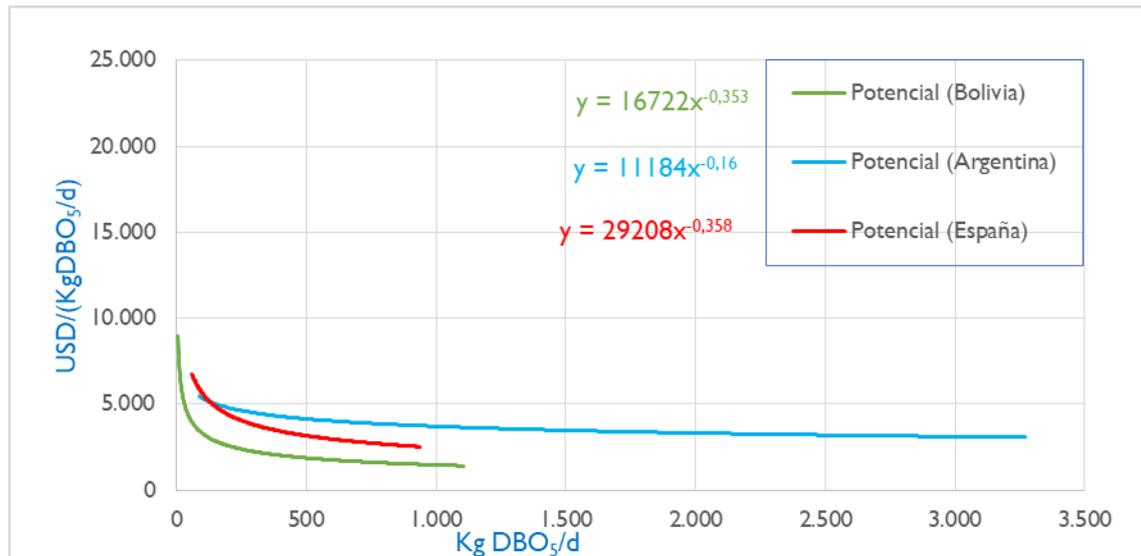


Figura 21. Comparativa de las curvas reales disponibles para la “Línea 4 LAG”

Se debe hacer notar que hay curvas que son puramente reales, como las obtenidas para España pero otras son generadas a partir del ajuste de curvas de referencia con datos reales del país, como es el caso de Argentina.

9.2 FACTORES A TENER EN CUENTA PARA LA SELECCIÓN DE LA CURVA DE REFERENCIA

Para seleccionar la curva de referencia más adecuada a aplicar en un país de estudio será necesario evaluar la semejanza de una serie de factores entre el país del que se quiere obtener la curva costos y los países para los que se cuenta con curvas de referencia.

En este apartado se exponen estos factores y posteriormente se realiza una comparativa de los mismos en los países y estratos para los que se dispone de curvas de referencia, con el objetivo de facilitar la decisión de determinar cuál o cuáles son las curvas que es más adecuado tomar como referencia para un caso concreto de estudio. En este análisis no se han incluido las curvas de Argentina por haberse obtenido las mismas a partir de otras curvas de referencia.

Los factores que condicionan en mayor medida los costos, y que serán analizados en los siguientes epígrafes, son:

- El rango poblacional (plasmado como carga de DBO₅ tratada en los gráficos anteriores)
- Las condiciones ambientales
- Los precios unitarios de las partidas de obra civil y equipos más significativos

Aunque no sean tan determinantes, y por esto no se ha realizado un análisis pormenorizado de los mismos, habría otros factores como los límites normativos, las cargas unitarias o las dotaciones consideradas, que también podrían implicar ligeras diferencias en las curvas.

Rangos poblacionales

La siguiente tabla muestra los rangos poblacionales de las curvas disponibles.

Tabla 2. Rangos poblacionales de las curvas disponibles

	RAFA+FP	FP	AE	LAG	HUM
España (T)	---	500-2.000	500-2.000	50-950	50-950
El Salvador (T)	500-50.000	200-50.000	500-50.000	100-50.000	100-5.000
Bolivia Altiplano (T)	---	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-5.000
Bolivia Valles (T)	1.000-50.000	---	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-5.000
Bolivia Llanos (T)	1.000-50.000	---	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-5.000
España ⁽¹⁾ (R)	---	200-20.000	200-50.000	1300-15.600	100-2.000
Bolivia general (R)	---	---	---	150-22.500	---

⁽¹⁾ Habitantes equivalentes

(T): Teóricas. (R): Reales

Condiciones ambientales

En cuanto a condiciones ambientales se evalúan los dos aspectos que se ha considerado que pueden tener una mayor importancia en el dimensionamiento, la temperatura y la altitud, y por tanto una influencia notoria en los costos de inversión. En el caso de la temperatura se analiza la media del mes más frío, tanto para el aire como para el agua, siendo esta última la que se adopta generalmente a efectos de diseño.

La siguiente tabla muestra una comparativa de estas tres variables para las distintas curvas teóricas disponibles. Para las curvas reales, al existir una importante variabilidad en las condiciones de los diferentes proyectos, no se ha evaluado, aunque se pueden tomar como referencia los datos correspondientes a las curvas teóricas ya que sería el contexto climatológico y ambiental más habitual.

Tabla 3. Condiciones ambientales consideradas en la elaboración de las curvas teóricas disponibles

	Temperatura media del aire del mes más frío (°C)	Temperatura media del agua del mes más frío (°C)	Altitud (m.s.n.m.)
España	7-8 ⁽¹⁾	10	660 ⁽²⁾
El Salvador	19	22	500 ⁽³⁾
Bolivia – Altiplano	5	9	3.800
Bolivia – Valles	13	17	1.650
Bolivia – Llanos	20	25	325

⁽¹⁾ Temperatura media del mes más frío en la zona central más fría de España

⁽²⁾ Altitud media en España

⁽³⁾ Altitud media de las zonas más pobladas de El Salvador

Precios unitarios de obra y equipos

Para analizar este último factor se comparan los costos unitarios de una selección de partidas de obra, consideradas representativas de las cinco líneas de tratamiento seleccionadas, para cada uno de los países de los que se tienen datos teóricos. Las partidas de obra seleccionadas se han escogido por un lado teniendo en cuenta el desglose existente de la información disponible para los países analizados y por otro lado considerando las más relevantes a efectos comparativos.

Para la recopilación de los precios unitarios concretos para el caso de Bolivia y de El Salvador se ha recurrido a los cuadros de precios incluidos como anexo en las correspondientes guías de las que se ha obtenido la información. En el caso español se han obtenido los datos de una recopilación de precios unitarios de referencia para el año 2019.

Para poder comparar los costos unitarios de los tres países se han actualizado todos a 2019 y se han convertido a dólares, tal y como se hizo con los costos de implantación para la actualización de las curvas de costos, y que se expone en el apartado I.I.I del Anexo I.

En la tabla siguiente se muestran los datos recopilados de cada país, ya convertidos y actualizados.

Tabla 4. Comparativa de precios de diferentes unidades de obra y equipos en España, El Salvador y Bolivia (USD actualizados a 2019)

Partida considerada	Unidad	Valor (USD/Unidad)			Descripción
		España	El Salvador	Bolivia	
1. Excavación	m ³	1	12	7	Excavación mecánica a cielo abierto
2. Malla impermeabilizante	m ²	---	14	4	Lámina de PEAD de 1-1,5 mm de espesor
3. Cerramiento perimetral	ml	9	---	32	Vallado metálico perimetral
4. Relleno (específico HUM)	m ³	---	36	29	Relleno material árido
5. Hormigón en masa	m ³	77	230	524	Hormigón en masa
6. Hormigón para armar	m ³	90	257	541	Hormigón armado para cimentación
7. Acero	Kg	1	2	3	Acero en barras corrugadas
8. Encofrado	m ²	24	50	72	Encofrado vertical
9. Puente móvil decantadores	m	---	79.720	26.053	Puente móvil decantadores de longitud ≈ 15 m
10. Bomba	Ud	3.298	7.224	2.879	Bomba sumergible. Características próximas a 25 m ³ /h, 6,5 m.c.a, 2,8 Kw
11. Brazo distribución	Ud	---	52.934	20.230	Brazo distribuidor para lecho percolador de diámetro ≈ 15m
12. Soplante desarenador	Ud	---	9.270	5.768	Soplante capaz de suministrar 86-144 Nm ³ /h aire

La información recopilada muestra que en España los costos unitarios asociados a la obra civil son notablemente menores, siendo especialmente significativa la diferencia existente en los costos de excavación. Una posible explicación a esto es la accesibilidad de la maquinaria necesaria en uno u otros países.

Otro aspecto a destacar es la considerable diferencia existente entre el costo de equipos electromecánicos en El Salvador con los de Bolivia, sobre todo en el caso del puente móvil de decantador y el brazo distribuidor de lecho percolador.

Box 10. Ejemplo de selección de curvas de referencia

Con el objetivo de ilustrar cómo se seleccionarían las curvas de referencia más adecuadas, se expone a continuación un estudio concreto de aplicación basado en los trabajos que el CEDEX realizó de apoyo a la Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento (DNAPYS) de Argentina para el *Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales* (CEDEX, 2020a).

En este caso se vio que lo más conveniente era tratar de obtener una aproximación a las curvas de costos para las tres líneas de tratamiento predominantes en el país: aireación extendida, filtros percoladores y lagunas de estabilización. Dado que no se contaba con curvas teóricas ni estaba en las previsiones del trabajo desarrollarlas por el elevado tiempo que requieren y que la información fiable sobre costos PTAR era muy limitada, se decidió abordar el trabajo apoyándose en las curvas obtenidas en otros países para posteriormente ajustarlas con los datos de costos reales de PTAR disponibles.

La selección de las curvas de referencias se basó en un análisis los factores más determinantes que podrían marcar las diferencias entre la situación esperada en Argentina y las curvas disponibles, tal como se describe en los epígrafes siguientes.

Rango poblacional

El rango poblacional donde se orientaba inicialmente el PNTAR era a poblaciones mayores a 10.000 habitantes, por lo que, a la vista de lo expuesto en la tabla 2 en este rango de aplicación podrían emplearse de referencia las curvas teóricas de El Salvador y Bolivia¹ o las curvas reales de España.

Condiciones ambientales

La siguiente tabla muestra la temperatura media del mes más frío y altitud, que como se ha comentado son las variables ambientales más relevantes a efectos de diseño, para varias ciudades argentinas representativas de los distintos tipos de clima presente en Argentina.

Si se comparan la tabla anterior con la tabla 3, respecto a la temperatura, se aprecia claramente que los escenarios de El Salvador y de la zona ecológica de los Llanos bolivianos quedan lejos de la diversidad de climas que tienen lugar en Argentina, al tratarse de climas tropicales. Sin embargo, las temperaturas tanto de los Valles y Altiplano bolivianos como de España sí son más similares a las que tienen lugar en Argentina.

En cuanto a la altitud, si bien es un aspecto que solo se tiene en cuenta en el diseño de los procesos de aireación extendida, se puede apreciar que la altitud del Altiplano boliviano está muy alejada de la altitud argentina. Aunque también la altitud en los Valles bolivianos es mayor que los valores típicos argentinos, se considera que su influencia en los requerimientos de aireación del reactor de lodo activos no es tan relevante como para descartarlo.

¹ En ese momento no se contaba con las curvas reales de Bolivia.

Temperatura y altitud de ciudades de referencia argentinas (Fuente Wikipedia)

Tipo clima	Ciudad	Temperatura aire del mes más frío (°C)	Altitud (m.s.n.m.)
Tropical serrano	Salta	11	1.187
Subtropical sin estación seca	Posadas	16	124
Subtropical con estación seca	Resistencia	15	50
Árido de sierras y bolsones	La Rioja	12	515
Semiárido	Mendoza	8	769
Templado pampeano húmedo	Buenos Aires	11	25
Templado mediterráneo	Bariloche	2	893
Templado oceánico	Mar de Plata	8	38
Árido patagónico	Trelew	6	11
Frío húmedo	Ushuaia	1	58

Precios unitarios

Comparativa de precios unitarios de referencia

Partida considerada	Unidad	Valor (\$/USD)				Descripción (caso argentino)
		España	El Salvador	Bolivia	Argentina	
1. Excavación	m ³	1	12	7	12	Excavación de sótanos a máquina
2. Malla impermeabilizante	m ²	---	14	4	---	
3. Cerramiento perimetral	ml	9	---	32	---	
4. Relleno (específico HUM)	m ³	---	36	29	---	
5. Hormigón en masa	m ³	77	230	524	---	
6. Hormigón para armar	m ³	90	257	541	273	Losa H°A° macizas H21/60kg
7. Acero	Kg	1	2	3	1	Acero ADN420 en barra ⁽¹⁾
8. Encofrado	m ²	24	50	72	200	Encofrado metálico pesado
9. Puente móvil decantadores	m	---	79.720	26.053	---	
10. Bomba	Ud	3.298	7.224	2.879	---	
11. Brazo distribución	Ud	---	52.934	20.230	---	
12. Soplante desarenador	Ud	---	9.270	5.768	---	

⁽¹⁾ Costo de material entregado en obra, sin incluir flete ni impuestos

En la tabla anterior se muestra la comparativa realizada para los precios unitarios de las partidas más representativas expuesta en la tabla 4, junto a unos costos de referencia recopilados para el caso argentino. Los costos argentinos provienen de diferentes fuentes bibliográficas consultadas por internet y correspondientes a los años 2019 y 2020.

Aunque es complicado extraer una lectura concluyente de esta comparativa, se puede observar que los precios unitarios de la obra civil en España son en general bastante más bajos que para el resto de países, llamando la atención que el costo de la excavación mecánica en España es un orden de magnitud inferior que para el resto de casos. Con respecto a los equipos electromecánicos, al tratarse de partidas muy específicas, no fue posible recopilar costos de equipos electromecánicos de referencia para el caso argentino, por lo que no se pudo realizar esta comparativa.

En función de la información disponible se concluye que los precios argentinos son más similares a los salvadoreños y bolivianos que a los españoles, lo que podría tener sentido por la cercanía geográfica.

Elección de posibles curvas de referencia

A la vista de lo expuesto anteriormente la selección de curvas teóricas que sería más razonables tomar como referencia para las tres líneas de tratamiento predominantes sería:

- Para la aireación extendida el escenario boliviano de Los Valles.
- Para el filtro percolador un promedio entre los escenarios bolivianos de Los Valles y Altiplano.
- Para lagunas de estabilización un promedio entre los escenarios bolivianos de Los Valles y Altiplano.

10 AJUSTE DE CURVAS

Cuando se recurre a curvas teóricas o a curvas de referencia para la determinación de costos de un plan de inversión, se debe proceder al ajuste de las aquellas con datos reales, puesto que las curvas teóricas se han elaborado considerando condiciones favorables (las mediciones y los precios unitarios se definen teniendo en cuenta un contexto propicio, tanto en lo referente a los aspectos constructivos como en la accesibilidad) y que las curvas de referencia se han desarrollado en otros contextos. Si hay datos suficientes de costos de instalaciones de PTAR reales sin duda es más deseable realizar este ajuste a partir de ellos. En caso negativo será necesario razonar el ajuste de la curva en base a coeficientes de mayoración o minoración razonados.

En el primer apartado se explica cómo proceder al ajuste de las curvas teóricas/de referencia a partir de datos reales y en el segundo se hace lo propio a partir de coeficientes de mayoración/minoración razonados. Al final del capítulo se incluye un ejemplo, realizado en los trabajos del Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PNTAR) en Argentina, sobre el ajuste de curvas de referencia a partir de datos reales.

10.1 AJUSTE A PARTIR DE DATOS REALES

Como ya se ha comentado, la forma más adecuada de ajustar curvas, ya sean teóricas u otras de referencia, es a partir de datos de costos reales de proyectos de PTAR. Para ello será necesario recopilar para cada PTAR la información requerida y posteriormente proceder con su análisis, actualización y validación, según se detalló en los apartados 6.1, 6.2 y 6.3.

Una metodología sencilla que se puede utilizar para el ajuste curvas potenciales se basa en dar por bueno el exponente de la curva teórica/de referencia, que representará la evolución relativa del costo con el tamaño de la PTAR, y modificar la constante de proporcionalidad de la curva de modo que la curva resultante minimice los errores (considerando como error el cuadrado de las diferencias relativas entre los datos reales y los que corresponden a la curva ajustada resultante), de un modo análogo a como se realizan los ajustes por mínimos cuadrados. De este modo la curva teórica/de referencia y la curva resultante mantienen invarianza de escala.

Las siguientes figuras muestran un ejemplo gráfico de cómo se determinaría la curva real resultante según lo expuesto, para un caso tipo, tanto en escala normal (Figura 22) como en doble escala logarítmica (Figura 23). En esta última se puede apreciar el desplazamiento en paralelo que se produce mediante el ajuste de la curva.

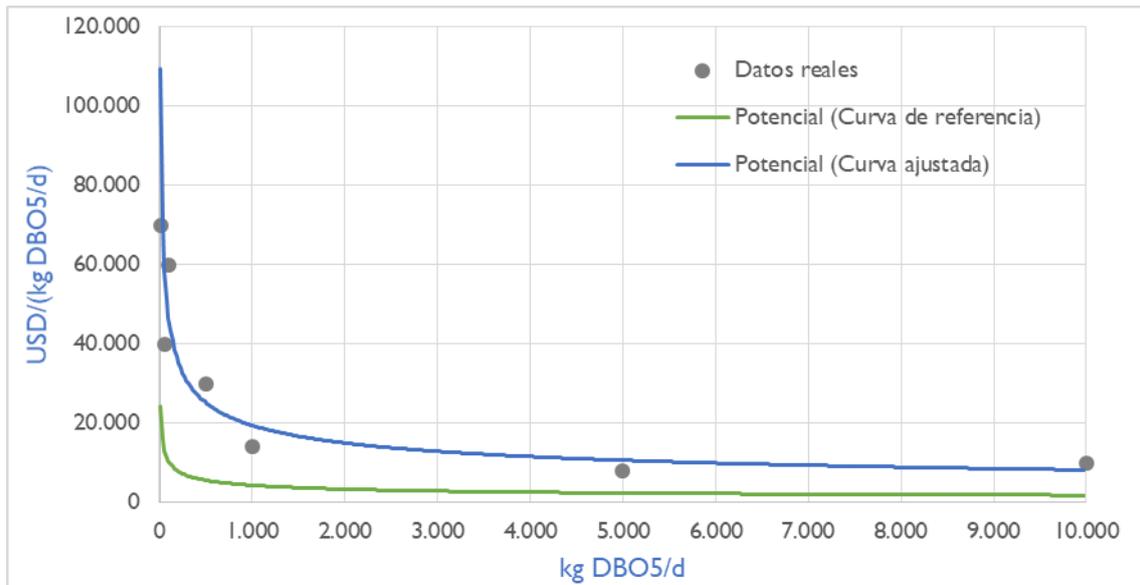


Figura 22. Ajuste de curva de referencia a partir de datos reales en escala normal

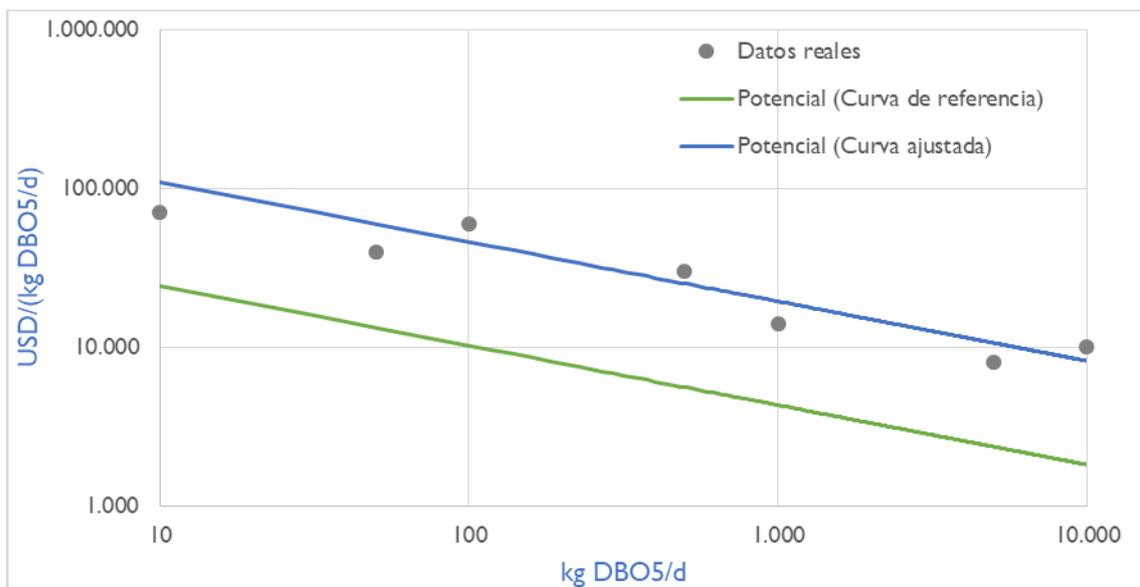


Figura 23. Ajuste de curva de referencia a partir de datos reales en doble escala logarítmica

Como es lógico, para poder aplicar esta metodología será necesario disponer de suficientes datos de costos de proyectos de PTAR. Se recomienda contar el mayor número de datos posible para realizar el ajuste con las mayores garantías. A este respecto se deberá tener en cuenta no solamente el número de datos, sino también la calidad de los mismos, ya que la calidad de la curva resultante dependerá principalmente de estas dos variables, además de como es obvio de lo adecuada que resulte la curva tomada como referencia.

10.2 AJUSTE CON COEFICIENTES RAZONADOS

En el caso de no disponer de datos de costos reales de PTAR suficientes para realizar el ajuste de la curva teórica/de referencia a partir de aquellos, se podría recurrir a un ajuste alternativo a partir de coeficientes de mayoración/minoración razonados, también mediante la modificación de la constante de proporcionalidad de la curva, mediante la aplicación de un porcentaje de variación con respecto a la curva teórica/de referencia.

A continuación se plantean tres casos diferentes: cuando la curva a ajustar sea una curva teórica del país de estudio, cuando sea una curva real de otro país similar y cuando sea la curva teórica de otro país similar. Por último se plantean otros aspectos a tener en cuenta en el caso de que se realice el ajuste mediante la aplicación e coeficientes razonados.

Caso 1: Ajuste de curva teórica del mismo país

En el caso que la curva a desplazar sea la curva teórica del país de estudio habrá que tener en cuenta que la curva teórica, además de representar solo los costos de ejecución material y no costos totales del proyecto, está calculada a partir de unos diseños teóricos en condiciones favorables, motivo por el que sea de esperar que haya que mayorar el costo.

En este caso la precisión de la estimación viene determinada por lo aceptables que sean los criterios considerados en los diseños y en la determinación de mediciones en los supuesto teóricos realizados, por si las variables de contexto consideradas y los cuadros de precios utilizados responden a la realidad del país, por si el ajuste realizado a la curva teórica fue el apropiado y por si las estimaciones se realizan dentro del rango poblacional para el que se definió la curva.

Como se pudo ver en el apartado 8, la variación de la constante de proporcionalidad entre curvas teóricas y reales puede oscilar dentro de un mismo país para distintas líneas de tratamiento, por lo que utilizar un mismo coeficiente de mayoración para las distintas líneas podría no ser adecuado. La siguiente tabla ilustra dichas diferencias.

Tabla 5. Porcentaje de variación de las constantes de proporcionalidad entre curvas teóricas y reales

Caso	Porcentaje de variación real/teórica
“Línea 2 FP” (España)	95-115%
“Línea 3 AE” (España)	465-595% ⁽¹⁾
“Línea 5 HUM” (España)	No requiere ajuste

⁽¹⁾ Este valor resulta excesivamente elevado, lo que cuestionaría la calidad de las curvas teóricas elaboradas

La recomendación que se hace al respecto es que, si los procedimientos de cálculo de las curvas teóricas han sido similares a los empleados en otro país, cuyas diferencias entre curvas reales y teóricas se conocen, se empleen los mismos coeficientes de mayoración. Si no se puede contrastar este aspecto por seguridad debería, aplicarse un coeficiente mayorador mínimo del 20% de aumento sobre los costos teóricos para el cálculo de costos reales. Incluso superior en el caso de las tecnologías más complejas, como lodos activados.

Caso 2: Ajuste a partir de curva real de otro país

En el caso que la curva a ajustar sea la curva real de un país similar al país de estudio se debería hacer una estimación de la variación relativa de costos de construcción a partir del conocimiento de los precios unitarios de los dos países y de una ponderación de la relevancia que tendrían estas partidas en el presupuesto total, y a partir de este análisis, aplicar un/os coeficiente/s de mayoración/minoración razonados. También pueden considerarse mayoraciones/minoraciones específicas en el caso de que concurran contextos hidrogeológicos muy diferentes en ambos países, debidos por ejemplo a la existencia recurrente en alguno de ellos de terrenos rocosos, nivel freático alto o pendientes acusadas (siempre, por supuesto, hablando desde una perspectiva general). Es

importante destacar que los coeficientes de mayoración/minoración podrán variar dependiendo de las tecnologías utilizadas.

Por último se deberán de tener en cuenta otros aspectos relevantes a efectos de elaboración de presupuestos como son el porcentaje de beneficio industrial, de gastos generales o de impuestos, que es posible que difieran en los dos países.

En este caso la precisión de la estimación viene determinada por la profundidad y rigurosidad con que se haya realizado la evaluación teórica de las diferencias en ambos casos.

Caso 3: Ajuste a partir de curva teórica de otro país

En el caso que la curva a ajustar sea la curva teórica de un país similar al país de estudio, se deberán aplicar tanto las prevenciones expuestas en el caso I, diferencias entre curva teórica y real reflejadas en el coeficiente de proporcionalidad a utilizar, así como las expuestas en el caso II, aplicación de coeficientes de mayoración/minoración en función de evaluación teórica de las diferencias de ambos casos.

En este caso la precisión de la estimación viene determinada por un mezcla de factores, expuestos en los dos epígrafes anteriores.

Otros aspectos

En el caso de recurrir al método de ajuste mediante coeficientes de mayoración-minoración razonados, para comprobar lo adecuada que resulta la curva resultante, debería chequearse con los datos disponibles por escasos que fueran.

En el caso de disponer de insuficientes datos de costos reales de PTAR también se podría evaluar la opción de plantear tanto la metodología de ajuste a partir de datos reales como la expuesta en este subapartado y decantarse por la que, a la vista de los resultados, pareciese más adecuada desde un juicio de experto, o incluso la curva promedio de las curvas resultantes con ambas metodologías.

Puesto que la diferencia entre las curvas teóricas y reales varía con el tamaño de la instalación, sería recomendable también tratar de reproducir esa variación en la medida que se pueda y se disponga de conocimiento.

Finalmente y ante la falta de información, sería muy importante someter estas curvas obtenidas por ajuste a juicio de expertos en construcción de instalaciones.

Box 11. Ejemplo de ajuste de curva de referencia

Con el objetivo de ilustrar cómo se ajustarían curvas de referencia se expone a continuación un estudio concreto, realizado por el CEDEX en los trabajos del *Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales* de Argentina (CEDEX, 2020b), sobre el que ya se ha contextualizado en el ejemplo expuesto en el capítulo 9. En ese mismo ejemplo se ha expuesto que finalmente se seleccionaron tres curvas de referencia, una para aireación extendida, otra para filtro percolador y otra para lagunas de estabilización.

Una vez hecha esta selección se procedió al ajuste de dichas curvas a partir de datos de costos reales de PTAR argentinas. Para ello primero se sistematizó, actualizó y procesó la información disponible y posteriormente se ajustaron las curvas y, en este orden se expondrá en los siguientes epígrafes.

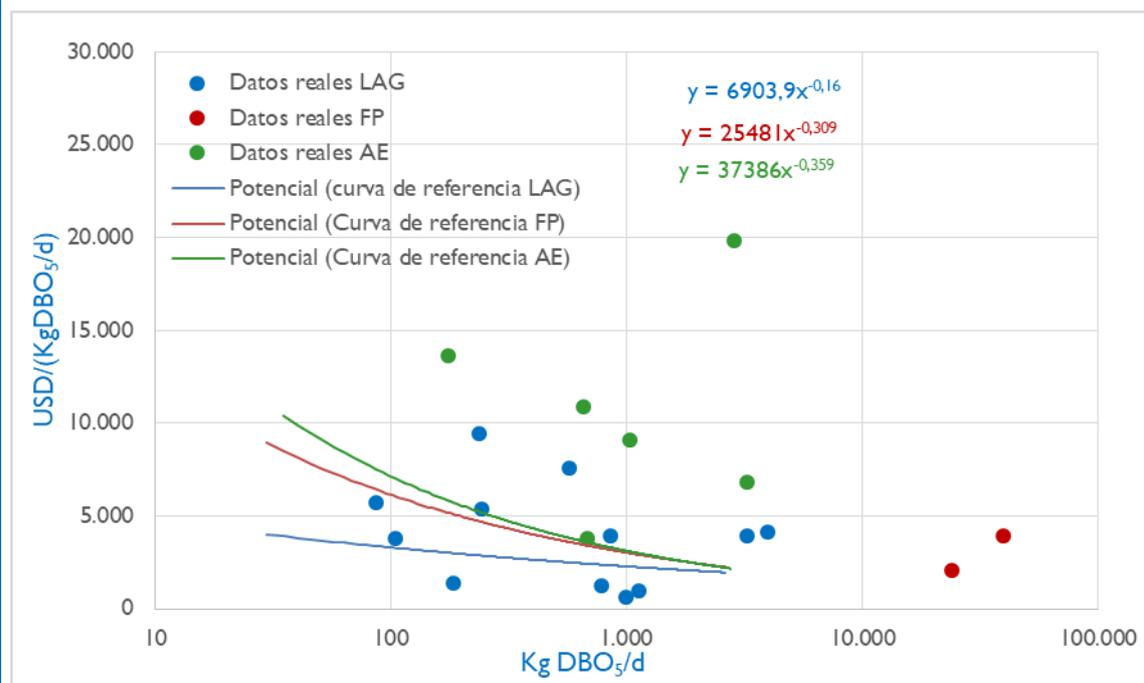
Sistematización, actualización y validación de información disponible

El equipo coordinador de los trabajos del plan nacional recopiló una batería de información de costos de PTAR argentinas para poder aplicar la metodología óptima para obtención de curvas de costos.

La información se sistematizó y actualizó teniendo en cuenta las siguientes acciones:

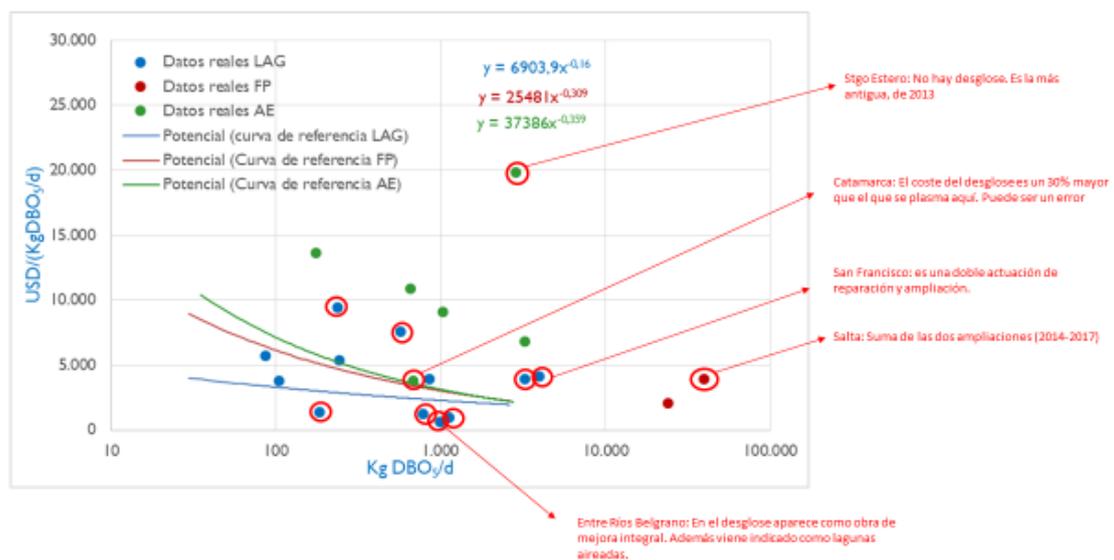
- Se descartaron las PTAR con tecnologías diferentes a las consideradas (las consideradas eran aireación extendida, filtro percolador y lagunas de estabilización)
- Se descartaron las PTAR que no contaban con la información mínima necesaria
- Se identificaron los nombres y las ubicaciones de las PTAR restantes tras los descartes cruzando esta información con la de otras fuentes.
- Se contrastó el costo de las PTAR disponibles en la relación principal facilitada con el de otras fuentes de información también facilitada en las que se tenía el costo desglosado por unidad de proceso
- Se actualizó el costo de las instalaciones a 2019, mediante IPC según se especifica en el box 8.
- Se diferenciaron las actuaciones que correspondían a ampliaciones o modificaciones de PTAR de primera construcción.
- Se consideró una carga unitaria de 50 g DBO₅/(hab d) para realizar la conversión de habitantes a carga tratada.
- Se generó un documento en Microsoft Excel donde se presentaba la información de partida considerada, así como los cálculos realizados.

La siguiente figura muestra la representación gráfica del costo de las PTAR, tras el procesado de información realizado, diferenciando por tecnología. También se muestran las curvas de referencia consideradas (en el ejemplo del capítulo 9 se justifica la elección de estas curvas), en el rango de 1.000 a 50.000 habitantes.



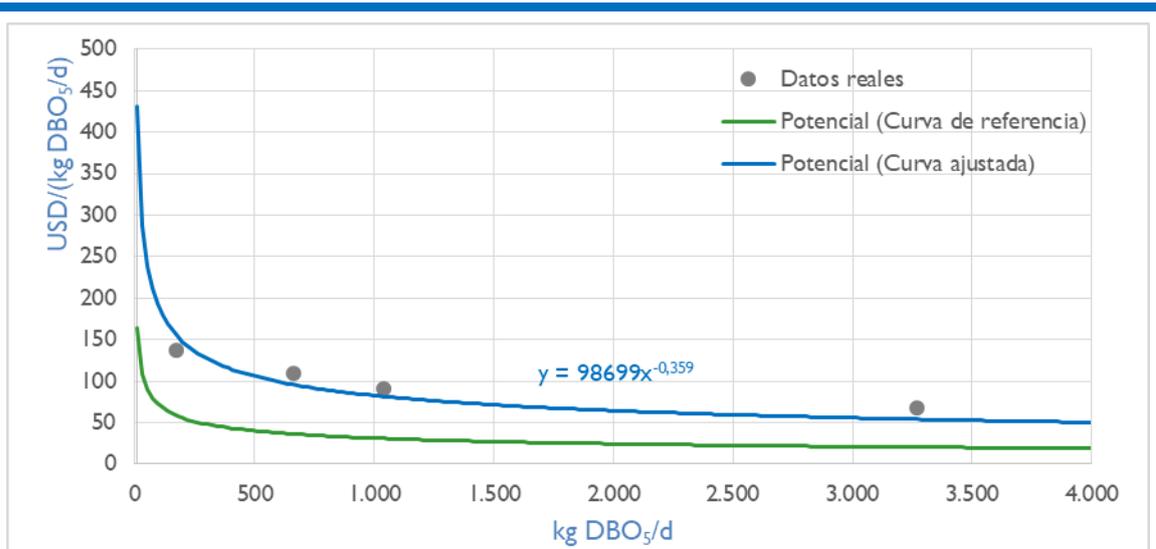
A continuación, se procedió a la validación de la información mediante el análisis de “outliers” a la vista de la representación gráfica anterior. La siguiente figura representa el estudio realizado al respecto. En concreto se analizó con un grado de detalle mayor la información disponible para las PTAR señaladas con una circunferencia roja, con el objetivo de identificar las razones de su valor anómalo. Tras el análisis, algunos de los datos se consideró adecuado descartarlos debido a diferentes razones: porque la información era demasiado antigua, porque se identificaron inconsistencias importantes entre las distintas fuentes de información o bien porque las actuaciones concretas no correspondían a construcción de una PTAR, sino a ampliaciones o remodelaciones. En la figura se identifican estas actuaciones descartadas con la explicación asociada en texto rojo.

Tras este análisis de “outliers”, para el caso de filtros percoladores quedó un único punto, por lo que se consideró adecuado limitar el número de curvas a dos, una para lagunas de estabilización y otro para aireación extendida.

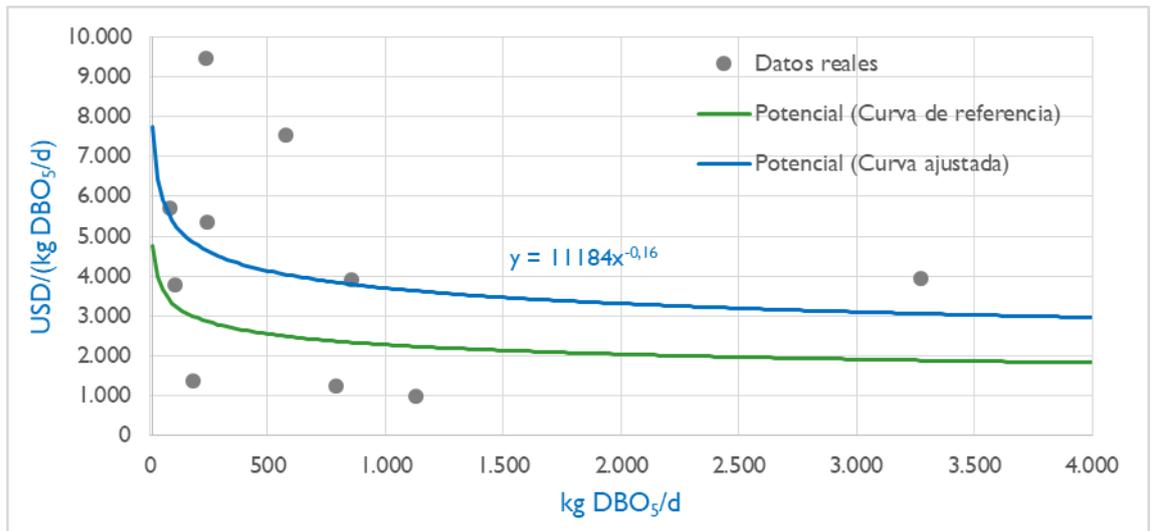


Ajuste de las curvas de referencia

A partir de los datos de costos de proyectos disponibles para las dos líneas de tratamiento consideradas finalmente (aireación extendida y lagunas de estabilización), se ajustaron las curvas de referencia seleccionadas. En las siguientes figuras se muestra la curva de referencia en color verde, la curva ajustada en azul y los datos disponibles de PTAR reales en gris, junto a la fórmula resultante tras el ajuste.

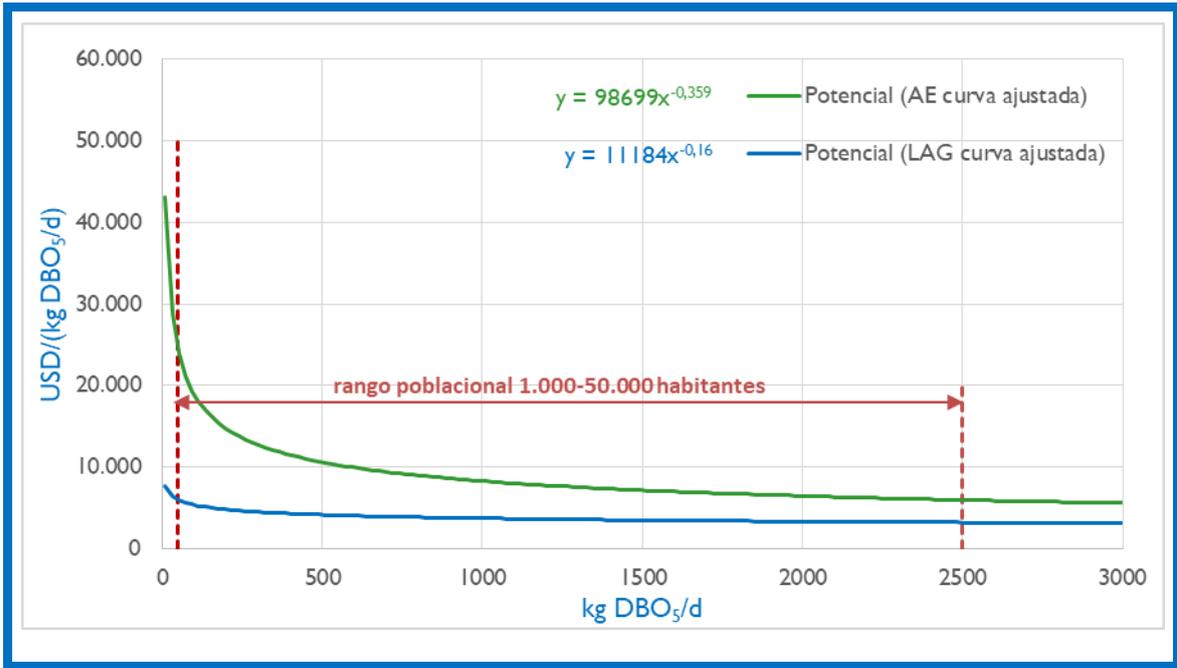


1234Ajuste curva de aireación extendida



Ajuste curva de lagunas de estabilización

La siguiente figura muestra en el mismo gráfico las dos curvas ajustadas para lagunas de estabilización y para aireación extendida, así como el rango poblacional aproximado para el que se consideró adecuado su uso, ya que era el rango de población de las curvas teóricas que se utilizaron como base para su obtención.



II ESTIMACIÓN FINAL DE COSTOS Y CONTRASTE DE CURVAS

Los últimos pasos metodológicos, necesarios para poder establecer las fórmulas finales de estimación de costos para el plan de inversiones en cuestión, serán la aplicación de coeficientes para adaptar las curvas definidas al alcance pretendido y, en el caso de que se estime adecuado, la consideración de subestratos que contemplen la variabilidad debida a algunas variables clave que por algún motivo no se pudo tener en cuenta en la determinación de estratos finalmente considerados. En este capítulo se abordan estos aspectos, así como el desarrollo comunitario y de operadores, aspecto crucial en todos los proyectos, la extrapolación de curvas más allá del rango para el que fueron construidas y el contraste de las curvas resultado.

Costos adicionales no considerados

A efectos de planificación puede ser deseable interiorizar en las curvas definidas otros costos asociados que no se suelen contemplar en la elaboración de curvas de costos como son:

- Gastos generales, impuestos o beneficio industrial del contrato de construcción (todas las curvas expuestas en el Anexo I se corresponden con costos de ejecución material).
- Preinversión (estudios previos, análisis de alternativas y factibilidad del proyecto y elaboración del proyecto constructivo)
- Supervisión de la obra
- Puesta en marcha
- Obras complementarias requeridas
- Gestión social (desarrollo comunitario)
- Gestión medioambiental
- Desarrollo de operadores

En el apartado 4.4 se expusieron ya algunas recomendaciones metodológicas para la interiorización de estos aspectos en las curvas de costos, mediante la aplicación de coeficientes.

Desarrollo comunitario y de operadores

Es bien sabido que la mera construcción de infraestructuras no asegura por sí sola el éxito de los proyectos de PTAR y, debido a esto, en la mayoría de los casos es requerida o bien la creación del servicio o bien un acompañamiento para adaptar los servicios existentes de abastecimiento y saneamiento, también para el tratamiento de las aguas residuales. El desarrollo comunitario y de los operadores, y más en una región como la latinoamericana en la que el sector de las aguas residuales está todavía en fase de desarrollo, es un aspecto clave para poder asegurar unas suficientes y adecuadas oferta y demanda del servicio. Esto implica una importante cantidad de recursos que debe complementar a todo plan de inversiones, o bien ir integrado en el mismo. A modo de ejemplo se expone en el box 2 la cantidad considerada para estos aspectos en las primeras versiones del plan de inversiones de la ENTAR, reservándose para la gestión social (y ambiental) de cada proyecto un 15% del costo de la PTAR y para la mejora de los operadores un 10% del costo de la PTAR.

En algunos países se dispone de programas específicos para el desarrollo de estos aspectos, como el DESCOM en Perú o Bolivia, e incluso de instituciones creadas, entre otros, con este objetivo, como sería el caso del SENASBA en Bolivia. En estos países suele existir una asignación presupuestaria específica para cubrir parcialmente estos aspectos. En cualquier caso resulta crucial hacer un análisis al respecto y asegurar que todo plan de inversiones cuente, por una vía u otra, con

apoyo económico suficiente para el desarrollo comunitario y de operadores, debiendo ser asumido este gasto, si no completamente, en gran medida, por la institución que construya la infraestructura.

Consideración de subestratos

Como se muestra muy claramente en el caso boliviano, las variables climáticas y ambientales, pueden tener una importante influencia en los diseños y por tanto en los costos de implantación de PTAR. Debido a esto, cuando el país de estudio presente una variabilidad importante al respecto, una vez determinadas las curvas de costos finales por estrato, podría ser adecuado que estas curvas se adaptaran a su vez a dos o tres escenarios climáticos o ambientales diferentes, teniendo que recurrir para ello a factores de mayoración o minoración razonados. Esta aproximación, que se podría considerar como la creación de subestratos dentro de un estrato definido en origen, puede resultar adecuada en determinados casos en los que no se dispone de información suficiente para dividir el estudio inicialmente en estratos diferenciados.

Extrapolación de curvas

Aunque lo más adecuado es siempre que la aplicación de las curvas tenga lugar en el rango poblacional para el que se elaboraron las curvas, en ocasiones puede darse la situación de que el rango poblacional definido para las curvas resultado no cuadre con el del Plan de Inversiones que se pretende abordar. En estos casos se podría plantear la prolongación de las curvas o bien a partir de datos reales con los que se cuente o bien a partir de la forma de la curva de otros países, aunque estas extrapolaciones deben realizarse con sumo cuidado y acudiendo siempre al juicio de expertos.

Contraste de las curvas a considerar

Es muy deseable someter a las curvas, sobre todo cuando se trate de curvas obtenidas por ajuste, a juicio de expertos en la materia, así como compararlas con otras curvas de costos reales de otros países, razonando las diferencias.

Adicionalmente, y aunque no sean oficiales, será necesario revisar si existen guías, manuales o publicaciones concretas sobre el análisis de costos de inversión en PTAR en el país de estudio y evaluar la calidad, así como la antigüedad de la información en que se basó cada estudio. De considerarse información adecuada, se pueden utilizar como herramienta para la validación de las curvas generadas y en el caso de que existan discrepancias significativas se debería también especificar los motivos.

En cualquier caso será necesario revisar la información oficial que disponga el país de estudio con respecto a costos de PTAR, ya que las curvas de costos generadas finalmente deben ser consistente e ir en línea con esta información oficial. De no ser así se deben especificar los motivos de las diferencias en los documentos oficiales que se generen.

12 REFERENCIAS

- AACE. (2020). *Cost Estimate Classification System - As Applied in Engineering, procurement, and Construction for the Process Industries*. Retrieved from https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf
- ANDA. (2017). *Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento de El Salvador*.
- CEDEX. (2011). *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los Planes Hidrológicos de Cuenca*.
- CEDEX. (2020a). *Asistencia Técnica para la Elaboración del Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Argentina. Resultados a Debate del Análisis de Costos de las Inversiones Necesarias*.
- CEDEX. (2020b). *Asistencia Técnica para la Elaboración del Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Argentina. Resultados Finales del Análisis de Costos de Inversiones Necesarias*.
- MARM. (2010). *Manual para la Implantación de Sistemas de Depuración en Pequeñas Poblaciones*.
- MARN. (2016). *Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador*.
- MMAyA. (2021). *Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales*.
- U.S. Department of Energy. (2018). *Cost Estimating Guide*. Retrieved from https://iberomasacyted.blogs.upv.es/files/2019/01/Cost_Estimating_G_413_3_21_final_050920111.pdf

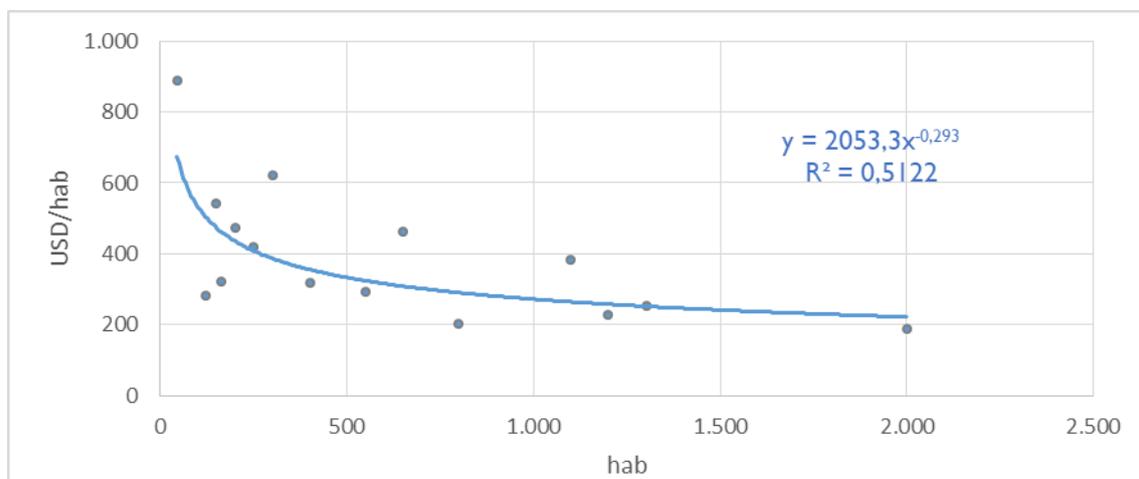
APÉNDICE I: AMPLIACIÓN DE CIFRAS SIGNIFICATIVAS EN LOS COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

Dada una serie de datos (hab y USD/hab), para obtener la ecuación de ajuste con los coeficientes con un número de cifras significativas mayor al que suministra el ajuste gráfico automático de datos en Microsoft Excel, un posible camino partiría primero de calcular a ambas variables (hab y USD/hab) el logaritmo según se muestra en la tabla ejemplo siguiente que simula una hoja de Excel.

	A	B	C	D
1	hab	USD/hab	Ln (hab)	Ln(USD/hab)
2	45	887	3,81	6,79
3	120	283	4,79	5,65
4	150	543	5,01	6,30
5	164	323	5,10	5,78
6	200	475	5,30	6,16
7	250	419	5,52	6,04
8	300	623	5,70	6,43
9	400	317	5,99	5,76
10	550	294	6,31	5,68
11	650	464	6,48	6,14
12	800	204	6,68	5,32
13	1.100	385	7,00	5,95
14	1.200	229	7,09	5,43
15	1.301	252	7,17	5,53
16	2.000	190	7,60	5,25

Posteriormente los coeficientes a y b de la fórmula potencial resultante ($y = a \cdot x^b$), con las cifras significativas ya deseadas, se calcularían mediante las siguientes fórmulas:

- $a = \text{PENDIENTE}(C2:C16;D2:D16) = -0,29254387$
- $b = \text{EXP(INTERESECCION.EJE}(C2:C16;D2:D16)) = 2.053,25288$



ANEXO I: CURVAS DE REFERENCIA DISPONIBLES

En este anexo se exponen algunas curvas de costos para las líneas de tratamiento seleccionadas, procedentes de diversos estudios donde ha participado muy activamente el CEDEX. Para el caso de curvas de costo teóricas los trabajos base son guías de tecnologías de tratamiento realizadas para varios países. Para el caso de curvas de costos reales se trata de trabajos de planificación, también realizados para distintos países.

Las líneas de tratamiento seleccionadas son:

- Línea 1: Reactor anaerobio de flujo ascendente + Filtro percolador (RAFA+FP)
- Línea 2: Tratamiento primario + Filtro percolador (FP)
- Línea 3: Aireación extendida (AE)
- Línea 4: Lagunas de estabilización (LAG)
- Línea 5: Tanque Imhoff + Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HUM)

CONTENIDOS DEL ANEXO I

I.1	CURVAS TEÓRICAS	78
I.1.1	CONSIDERACIONES GENERALES Y METODOLÓGICAS	78
I.1.2	ESPAÑA	80
I.1.3	EL SALVADOR	88
I.1.4	BOLIVIA	94
I.2	CURVAS OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS REALES	105
I.2.1	CONSIDERACIONES GENERALES Y METODOLÓGICAS	105
I.2.2	ESPAÑA	105
I.2.3	BOLIVIA	111
I.2.4	ARGENTINA	113

I.1 CURVAS TEÓRICAS

Las curvas o los datos de base para la elaboración de las curvas teóricas se han recopilado de manuales de tratamiento de aguas residuales de tres países: España, El Salvador y Bolivia. Los costos se obtuvieron a partir de una serie de dimensionamientos teóricos realizados en estos manuales para poblaciones de distintos tamaños y, en el caso de Bolivia, considerando diferentes estratos representativos del país.

En el primer subapartado se exponen algunas adaptaciones realizadas a las curvas originales de los distintos países en aras de que resultasen comparables, así como otras consideraciones relevantes sobre la metodología llevada a cabo en cada una de las guías. Posteriormente, en los tres últimos subapartados, se exponen las curvas teóricas de costos obtenidas en cada país para cada línea de tratamiento considerada.

I.1.1 Consideraciones generales y metodológicas

Los rangos poblacionales de las tres guías de tratamiento utilizadas son diferentes y, como se ha comentado, este es un aspecto crítico a tener en cuenta en el análisis, interpretación y potencial aplicación de las curvas de costo obtenidas. En la tabla siguiente se muestran los rangos de población considerados en estas guías para las líneas de tratamiento consideradas.

Tabla A1.1: Rangos de población de las curvas teóricas disponibles

	Línea 1 RAFA+FP	Línea 2 FP	Línea 3 AE	Línea 4 LAG	Línea 5 HUM
España	---	500-2.000	500-2.000	50-950	50-950
El Salvador	500-50.000	200-50.000	500-50.000	100-50.000	100-5.000
Bolivia	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-50.000	1.000-5.000

Dado que los datos de costos relativos disponibles estaban definidos por habitante servido y que en cada país se consideraron unas cargas contaminantes unitarias diferentes, en aras de poder comparar las curvas de cada uno, se realizó una transformación de estas curvas a un indicador equivalente. Se podría haber optado por caudales o por cargas tratadas, pero se consideró la carga de DBO₅ como magnitud de referencia comparativa porque la mayoría de procesos tecnológicos considerados se dimensionan principalmente a partir de la carga orgánica a tratar.

Además, para que los costos relativos fuesen comparables, se convirtieron a la misma moneda y se actualizaron para un mismo año. Para los casos de España² y El Salvador³, se realizó una actualización monetaria por IPC a enero de 2019, que era la fecha a la que estaban referenciados los datos de Bolivia. Posteriormente se convirtieron todas las magnitudes monetarias a USD aplicando los siguientes ratios de conversión correspondientes al 1 de enero de 2019⁴: 1€=1,1464USD para el

² Fuente: <https://www.ine.es/varipcc/index.do>

³ Fuente: <https://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl>

⁴ Fuente: <https://es.investing.com/currencies/eur-usd-converter>

caso español y $1Bs=0,1442USD$ para el caso boliviano. En el caso salvadoreño los costos ya se encontraban en USD por ser moneda oficial del país.

Las curvas de costos teóricas de cada línea de tratamiento considerada se obtuvieron mediante el ajuste potencial por mínimos cuadrados de los costos relativos de cada escenario poblacional considerado.

Un aspecto que es muy importante tener en cuenta a la hora de comparar curvas de distintas procedencias es el alcance incluido en la estimación de costos realizada para la PTAR. Al respecto se debe aclarar lo siguiente:

- Los siguientes costos no se incluían en el alcance de ninguna de las tres guías:
 - Gastos generales, beneficio industrial ni impuestos (se trataba por tanto de costos de ejecución material).
 - Colectores, bombeos necesarios para llevar el agua hasta la PTAR y el emisario de vertido del agua tratada al medio receptor.
 - La adquisición del terreno.
 - La acometida eléctrica.
- Los siguientes costos sí que se incluían para los tres casos:
 - La obra de llegada, construida en obra civil, con aliviadero y el by-pass general de la PTAR.
 - Los costos asociados a la urbanización de la parcela.
 - El cerramiento de las parcelas con materiales de naturaleza similar.
 - La caseta de mantenimiento.
- En cuanto a la medición del caudal, tanto en la guía boliviana como la salvadoreña, se consideró en todas las líneas de tratamiento medida de caudal por medio de canal Parshall y con medidor ultrasónico solo en PTAR que sirven a más de 20.000 habitantes. En la guía española se consideraron medidores electromagnéticos en todos los casos salvo para “línea 4 LAG” que se adoptaron caudalímetros de vertedero con reglilla.
- En cuanto al pretratamiento, en la guía salvadoreña y boliviana se consideró de limpieza manual en PTAR que sirven a menos de 20.000 habitantes y automático en las mayores. En la guía española se consideró pretratamiento automático en todos los casos, salvo en las lagunas de estabilización y los humedales de menor tamaño, donde se adoptó pretratamiento manual. Por otro lado, hay que tener en cuenta que en la guía española se consideró en todas las líneas un canal con limpieza manual, a modo de by-pass.
- En relación a la construcción de reactores y sedimentadores, en todas las guías se consideró la construcción en obra civil, con la salvedad de la guía española para los casos menores a 400 habitantes, donde todos los decantadores y los filtros percoladores se construyeron en PRFV.
- Los límites normativos considerados en los diseños en las tres guías se limitaron a la eliminación de materia orgánica hasta lo que marcaba la norma de cada país, sin considerar eliminación de nutrientes ni desinfección, con una única salvedad, la “línea 4 LAG” que para el caso salvadoreño cuyas lagunas se dimensionaron con el objetivo de obtener unos CF en salida de PTAR de 1.000 ufc/100mL, siendo el único caso donde el tren de tratamiento difería significativamente ya que incluía lagunas de maduración en cola.
- El alcance general de la línea de tratamiento se limitó a pretratamiento + tratamiento primario + tratamiento secundario + tratamiento de lodos en todas las líneas de

tratamiento de las tres guías, salvo para la “línea 4 LAG” en las guías española y salvadoreña donde se consideró además de las lagunas anaerobias y facultativas, lagunas de maduración.

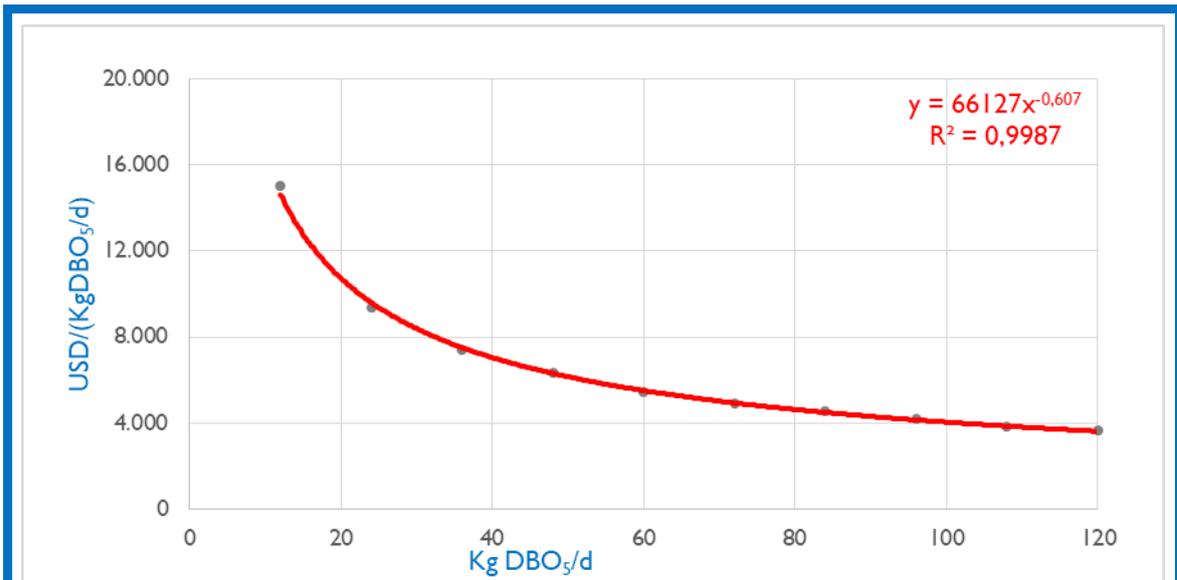
También a efectos de comprender el origen de las distintas curvas obtenidas se expone lo siguiente:

- En la guía española, en los dimensionamientos de filtros percoladores, se contempla exclusivamente la opción de relleno plástico, mientras que en las guías salvadoreña y boliviana se contemplan dos escenarios diferentes, uno con relleno plástico y otro con relleno árido. No obstante las curvas teóricas que se plasman en este anexo se muestra solo el escenario de relleno plástico con el objetivo de hacer comparables las curvas de los distintos países.
- En la “línea 5 HUM”, y en las tres guías, se han contemplado dos escenarios diferentes, uno con humedales horizontales y otro con humedales verticales. Las curvas que se plasman en este anexo son las curvas promedio de los escenarios con humedales horizontales y verticales.

I.1.2 España

Las curvas y los datos de base para la elaboración de las mismas que se presentan en este epígrafe se han recopilado del *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España en 2010 (MARM, 2010).

A continuación se muestran las fichas de las curvas teóricas obtenidas para las cinco líneas de tratamiento estudiadas, con la salvedad de la “línea I RAFA+FP”, ya que la climatología española en general no hace viable los tratamientos anaerobios en la línea de agua y por este motivo no fue considerada en la guía.



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 66.127

Exponente de la potencia = -0,607

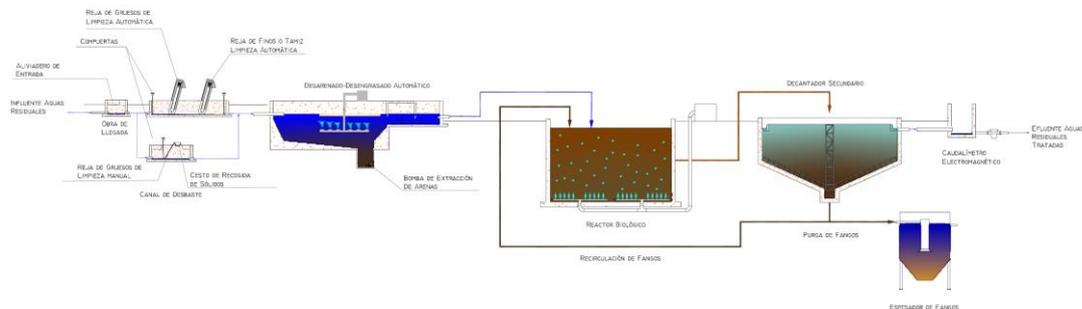
$R^2 = 0,9987$

Curva teórica. España. Línea 3 AE

País de origen: España

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



Origen datos: Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones

Rango aplicable: 500-2.000 habitantes (30-120 kg DBO₅/d)

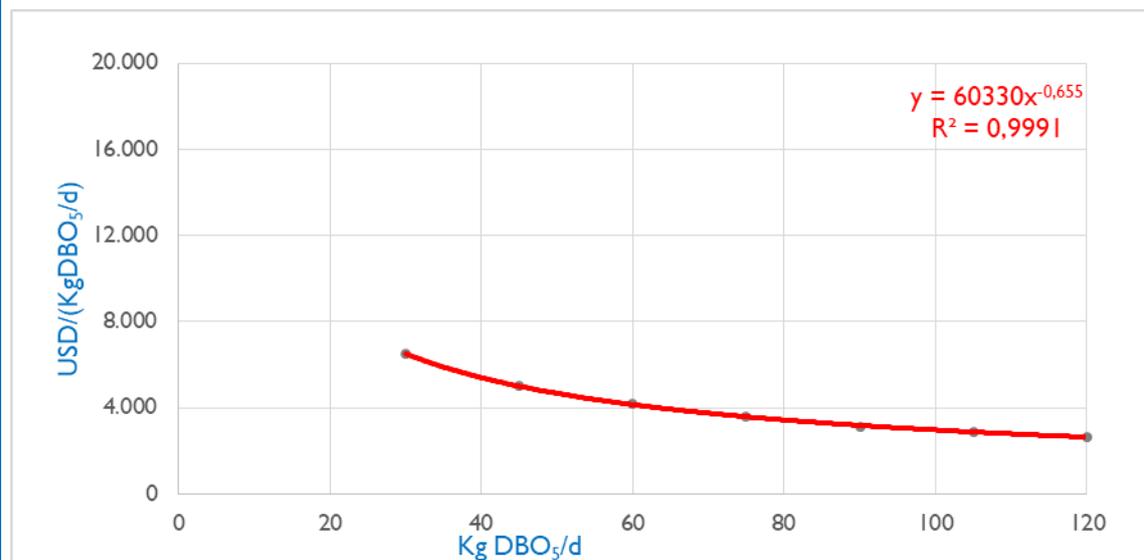
Año de referencia de los datos de origen: 2009

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 60.330

Exponente de la potencia = -0,655

$R^2 = 0,9991$

Nota: La relación de esta curva con la correspondiente real arroja valores mayores al 400%, lo que pone en entredicho la calidad de la misma, siendo recomendable su revisión.

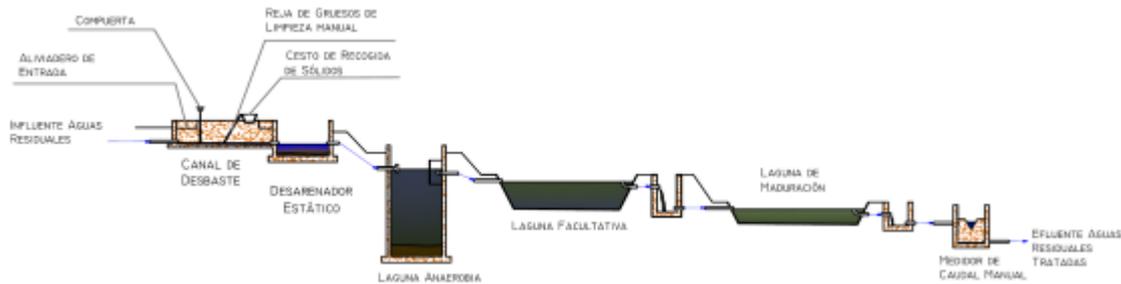
Curva teórica. España. Línea 4 LAG

País de origen: España

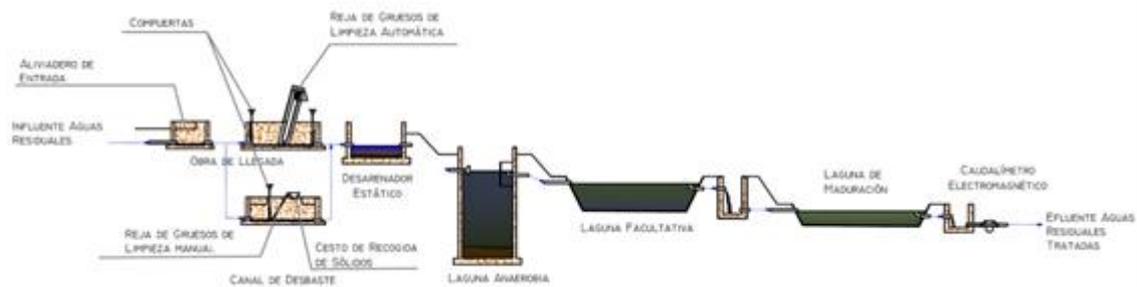
Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

50-200 habitantes (3-12 kg DBO₅/d)



200-950 habitantes (12-57 kg DBO₅/d)



Origen datos: Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones

Rango aplicable: 50-950 habitantes (3-57 kg DBO₅/d)

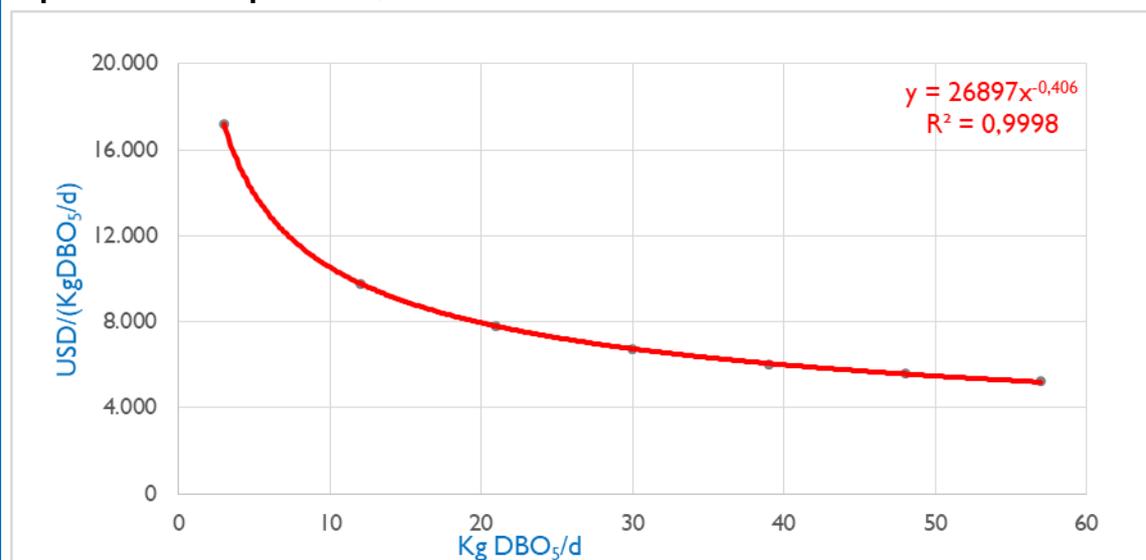
Año de referencia de los datos de origen: 2009

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: *Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)*

Constante de proporcionalidad = 26.897

Exponente de la potencia = -0,406

$R^2 = 0,9998$

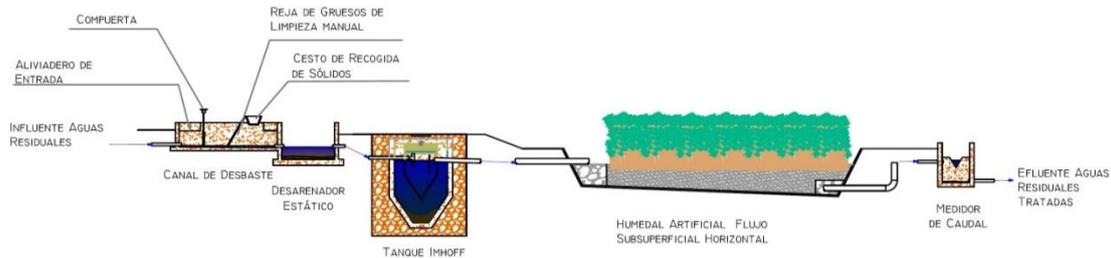
Curva teórica. España. Línea 5 HUM

País de origen: España

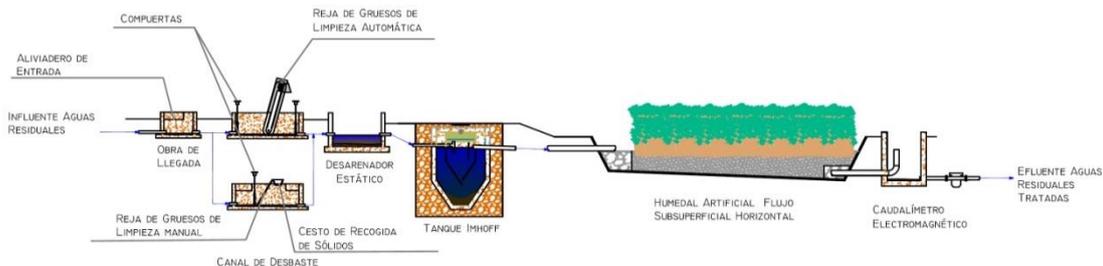
Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

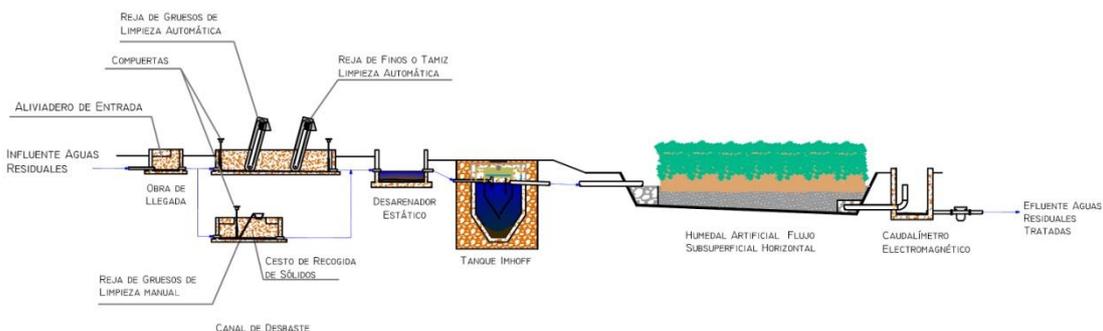
Humedales Flujo Horizontal y Vertical: 50-200 habitantes (3-12 kg DBO₅/d)



Humedales Flujo Horizontal y Vertical: 200-500 habitantes (12-30 kg DBO₅/d)



Humedales Flujo Horizontal y Vertical: 500-950 habitantes (30-57 kg DBO₅/d)



Origen datos: Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones

Rango aplicable: 50-950 habitantes (3-57 kg DBO₅/d)

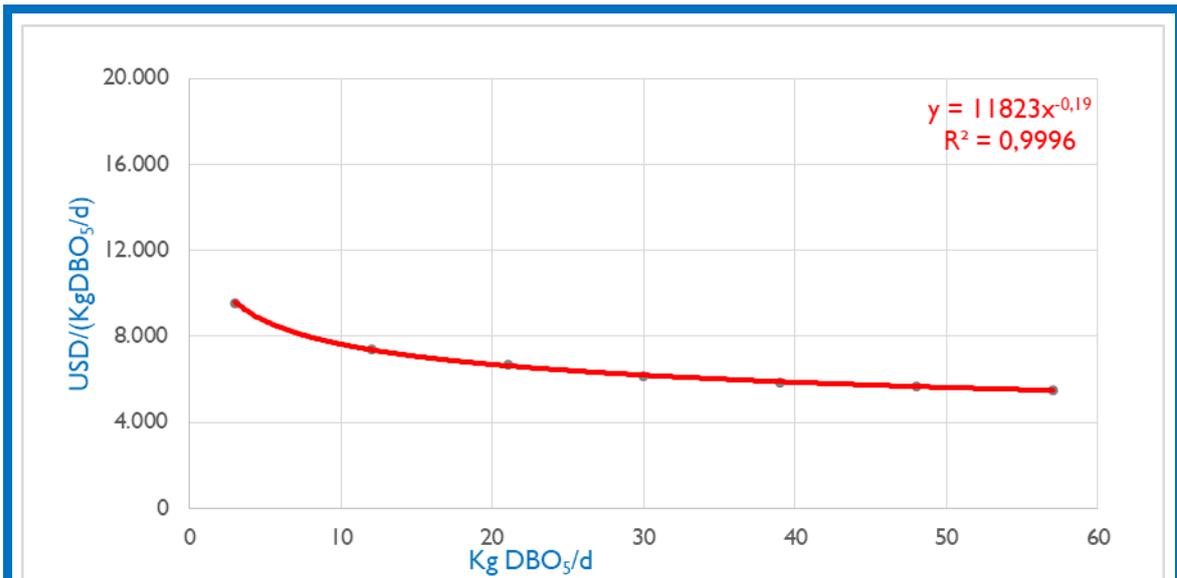
Año de referencia de los datos de origen: 2009

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel al promedio de los costos de humedales de flujo horizontal y de flujo vertical).

Constante de proporcionalidad = 11.823

Exponente de la potencia = -0,19

$R^2 = 0,9996$

I.1.3 El Salvador

Las curvas o los datos de base para la elaboración de las curvas que se presentan en este epígrafe se han recopilado de las *Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales en la República de El Salvador*, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno de la República de El Salvador en el año 2016 (MARN, 2016).

A continuación se muestran las fichas de las curvas teóricas obtenidas para las cinco líneas de tratamiento estudiadas.

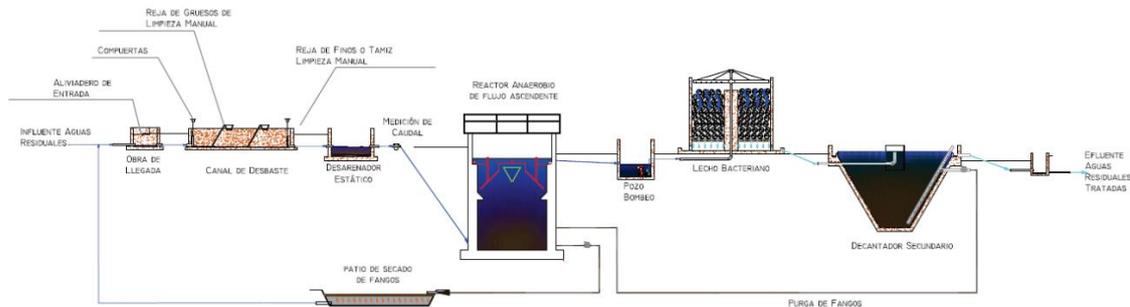
Curva teórica. El Salvador. Línea I RAFA+FP

País de origen: El Salvador

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

500-20.000 habitantes (20-1.000 kg DBO₅/d)



20.000-50.000 habitantes (1.000-2.500 kg DBO₅/d)

El mismo tren anterior, pero con el pretratamiento automatizado (desbaste, desarenador-desengrasador aireado y medidor de caudal)

Origen datos: Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador

Rango aplicable: 500-50.000 habitantes (20-2.500 kg DBO₅/d)

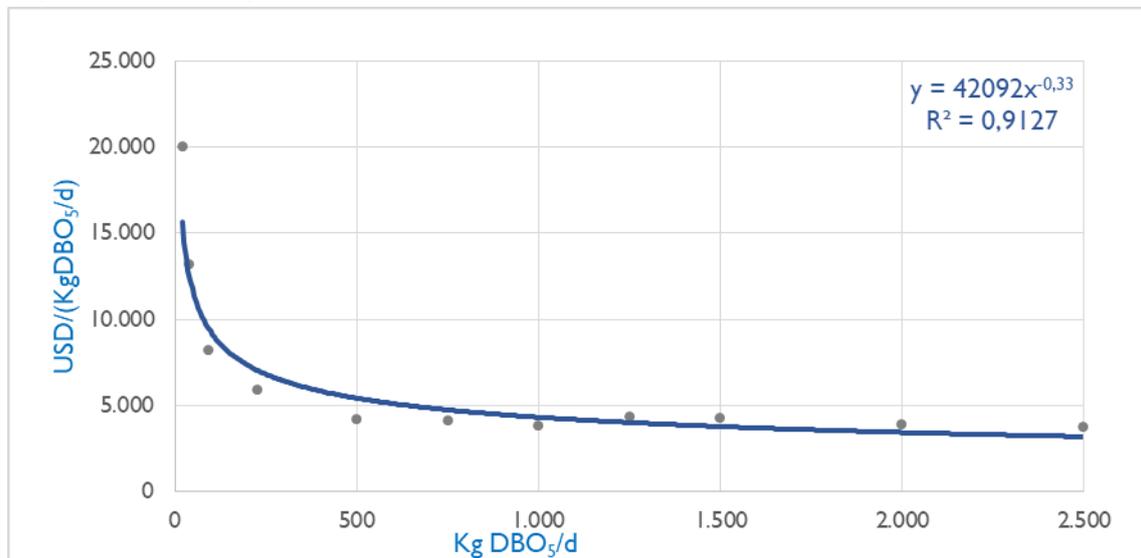
Año de referencia de los datos de origen: 2015

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 7,7%

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 42.092

Exponente de la potencia = -0,33

R² = 0,9127

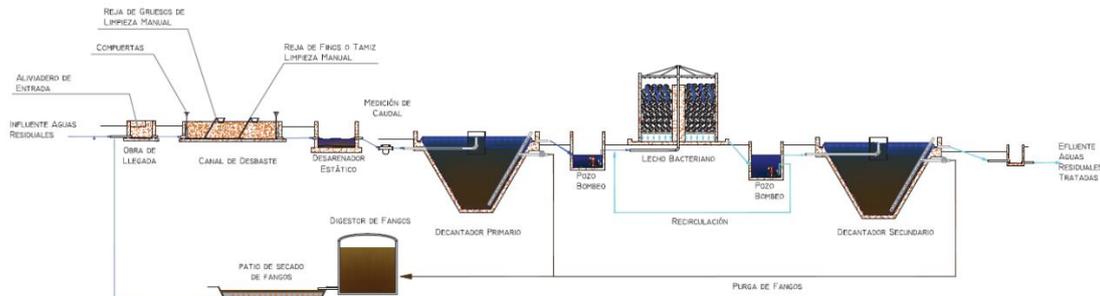
Curva teórica. El Salvador. Línea 2 FP

País de origen: El Salvador

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

200-20.000 habitantes (8-1.000 kg DBO₅/d)



Nota: En los diseños entre 200 y 5.000 habitantes se consideró Tanque Imhoff en lugar de Decantador Primario

20.000-50.000 habitantes (1.000-2.500 kg DBO₅/d)

El mismo tren anterior, pero con el pretratamiento automatizado (desbaste, desarenador-desengrasador aireado y medidor de caudal)

Origen datos: Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador

Rango aplicable: 200-50.000 habitantes (8-2.500 kg DBO₅/d)

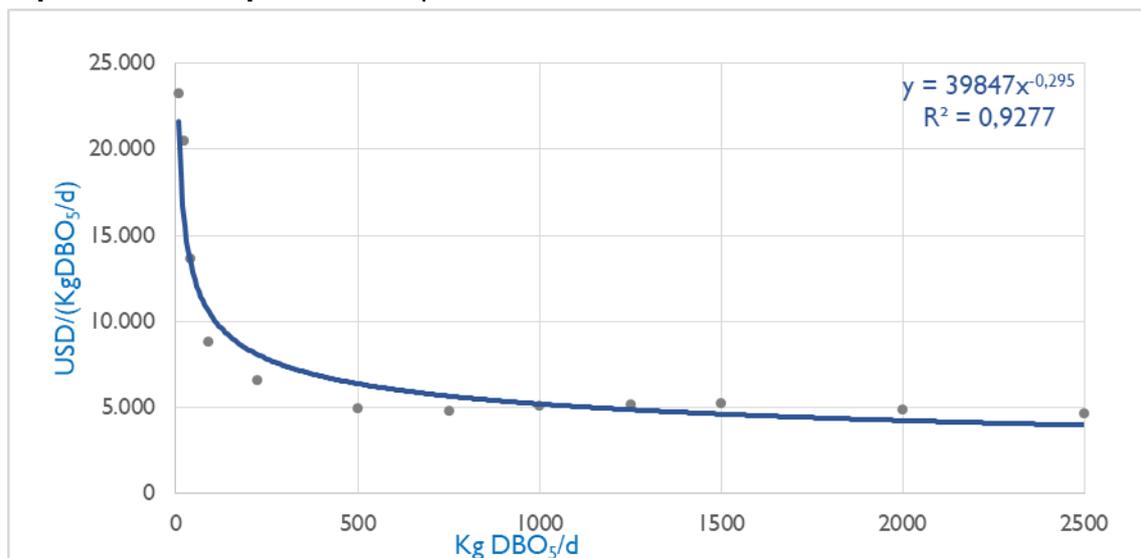
Año de referencia de los datos de origen: 2015

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 7,7%

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 39.847

Exponente de la potencia = -0,295

R² = 0,9277

Curva teórica. El Salvador. Línea 3 AE

País de origen: El Salvador

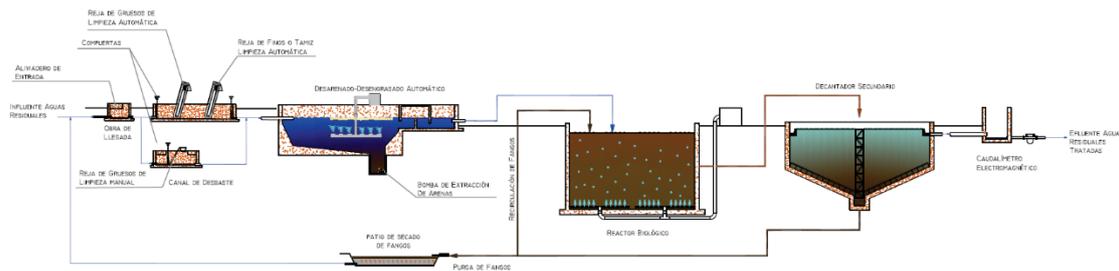
Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

500-20.000 habitantes (20-1.000 kg DBO₅/d)

El mismo tren de la siguiente figura, pero con el pretratamiento manual (desbaste, desarenador estático y medidor de caudal) y sin automatización de la regulación oxígeno (temporizadores programables y medidor de oxígeno portátil).

20.000-50.000 habitantes (1.000-2.500 kg DBO₅/d)



Origen datos: Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador

Rango aplicable: 500-50.000 habitantes (20-2.500 kg DBO₅/d)

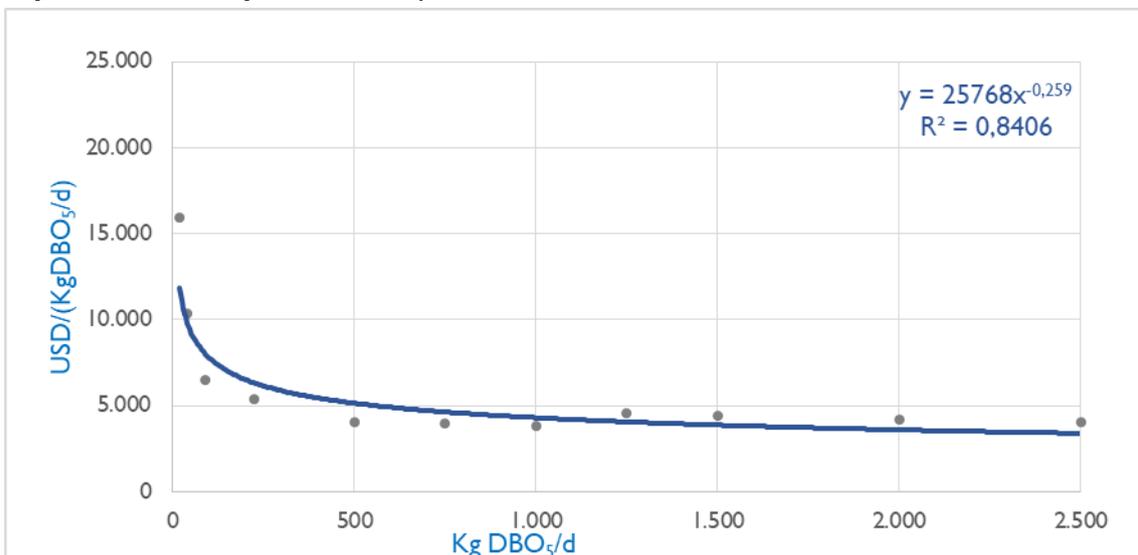
Año de referencia de los datos de origen: 2015

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 7,7%

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 25.768

Exponente de la potencia = -0,259

R² = 0,8406

Curva teórica. El Salvador. Línea 4 LAG

País de origen: El Salvador

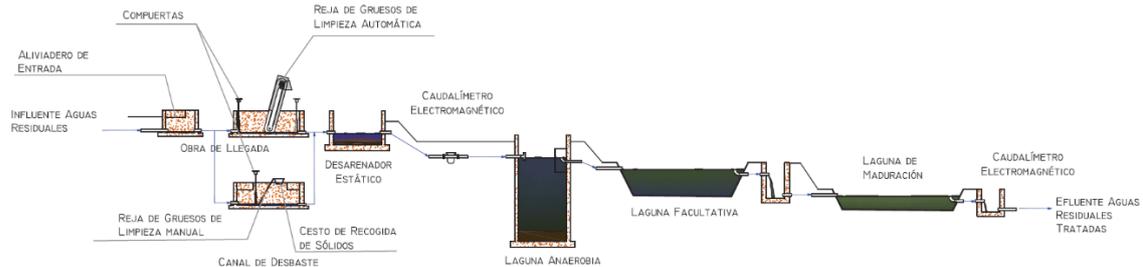
Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

100-20.000 habitantes (4-1.000 kg DBO₅/d)

El mismo tren de la siguiente figura, pero con el pretratamiento manual (desbaste, desarenador estático y medidor de caudal).

20.000-50.000 habitantes (1.000-2.500 kg DBO₅/d)



Origen datos: Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador

Rango aplicable: 100-50.000 habitantes (4-2.500 kg DBO₅/d)

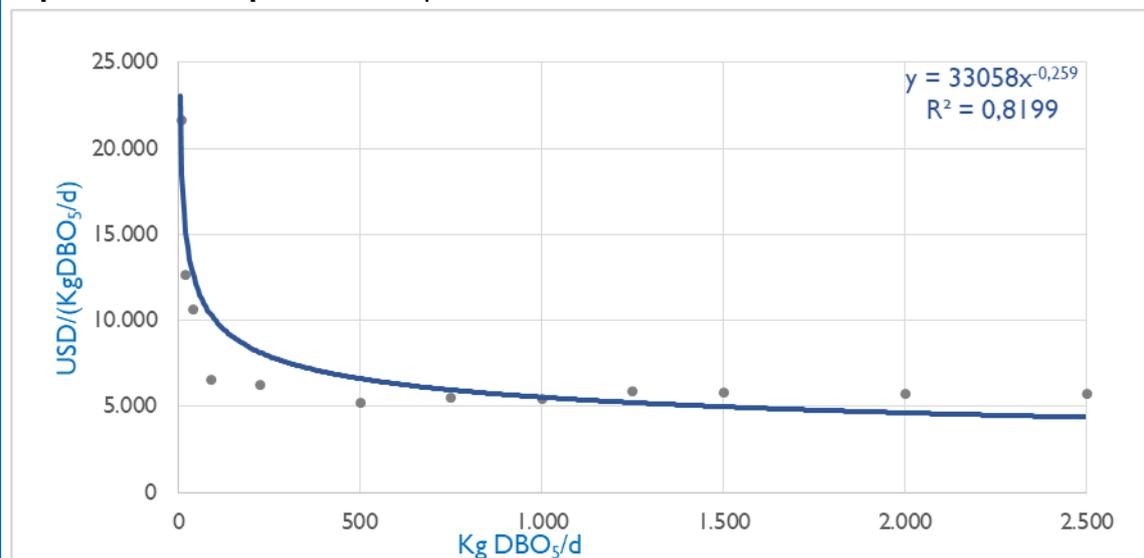
Año de referencia de los datos de origen: 2015

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 7,7%

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 33.058

Exponente de la potencia = -0,259

R² = 0,8199

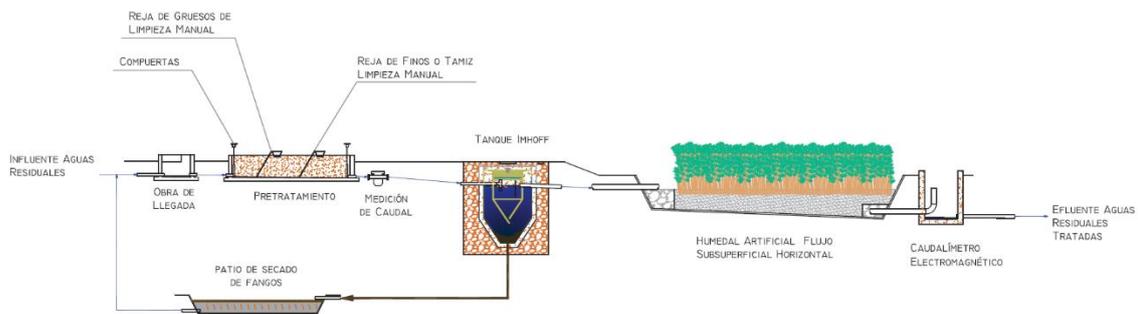
Curva teórica. El Salvador. Línea 5 HUM

País de origen: El Salvador

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:

Humedales Flujo Horizontal y Vertical:



Origen datos: Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador

Rango aplicable: 100-5.000 habitantes (4-225 kg DBO₅/d)

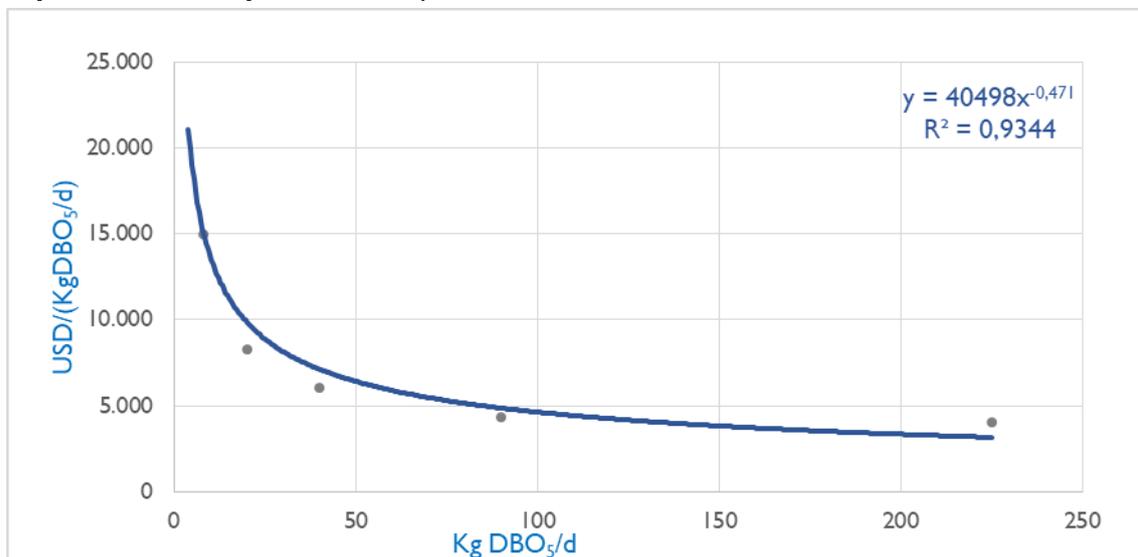
Año de referencia de los datos de origen: 2015

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: 7,7%

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel al promedio de los costos de humedales de flujo horizontal y de flujo vertical)

Constante de proporcionalidad = 40.498

Exponente de la potencia = -0,471

R² = 0,9344

I.1.4 Bolivia

Las curvas o los datos de base para la elaboración de las curvas que se presentan en este epígrafe se han recopilado de la *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamientos de aguas residuales*, publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia en 2021 (MMAyA, 2021).

Debido a las importantes diferencias tanto socioeconómicas como climáticas y ambientales que existían en el país se elaboraron tres juegos de curvas diferentes, uno para cada estrato considerado, correspondientes a las tres zonas ecológicas más importantes del país (Altiplano, Valles y Llanos).

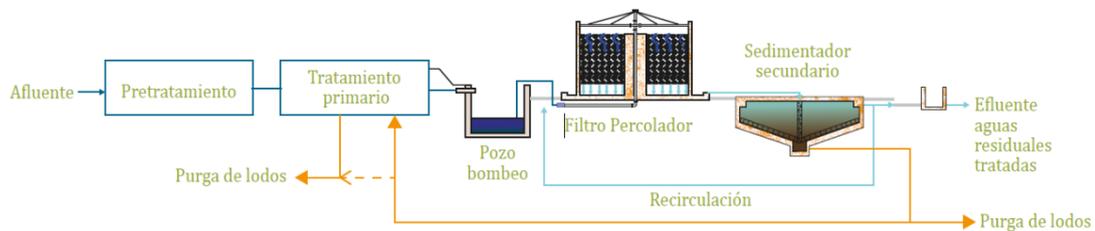
A continuación se muestran las fichas de las curvas teóricas obtenidas para las cinco líneas de tratamiento estudiadas, en las tres zonas ecológicas, con la salvedad de la “línea 1 RAFA+FP” en la zona ecológica del Altiplano, que no se consideró porque la climatología de esta zona ecológica hace inviable los tratamientos anaerobios en la línea de agua y de la “línea 2 FP” en las zonas ecológicas de Valles y Llanos, ya que se consideró que en estos contextos sería siempre preferible que los filtros percoladores contasen con un RAFA en cabecera.

Curva teórica. Bolivia. Línea I RAFA+FP

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



Por debajo de 20.000 habitantes se considera en el pretratamiento desbaste de limpieza manual, constando el mismo de dos rejillas de desbaste de 3 y de 1 cm de paso respectivamente, dispuestas en serie, a las que sigue un desarenador estático.

Por encima de 20.000 habitantes se considera un pretratamiento mecanizado, que consta de un desbaste dispuesto en doble canal, con rejillas mecanizadas en uno de ellos de 3 y 0,6 cm, dispuestas en serie, y con una rejilla de limpieza manual en el canal de by-pass, de 3 cm de paso y un desarenador-desengrasador, con extracción mecanizada de arenas y grasas. Para el tratamiento primario se considera Decantación Primaria con estabilización de lodos en Lagunas Anaerobias a temperatura ambiente. El tratamiento primario adoptado es RAFA, con la recirculación de los lodos producidos en el Filtro Percolador para su estabilización en el RAFA.

En todos los casos la deshidratación del lodo estabilizado tiene lugar en lechos de secado.

Origen datos: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (35-2.750 kg DBO₅/d)

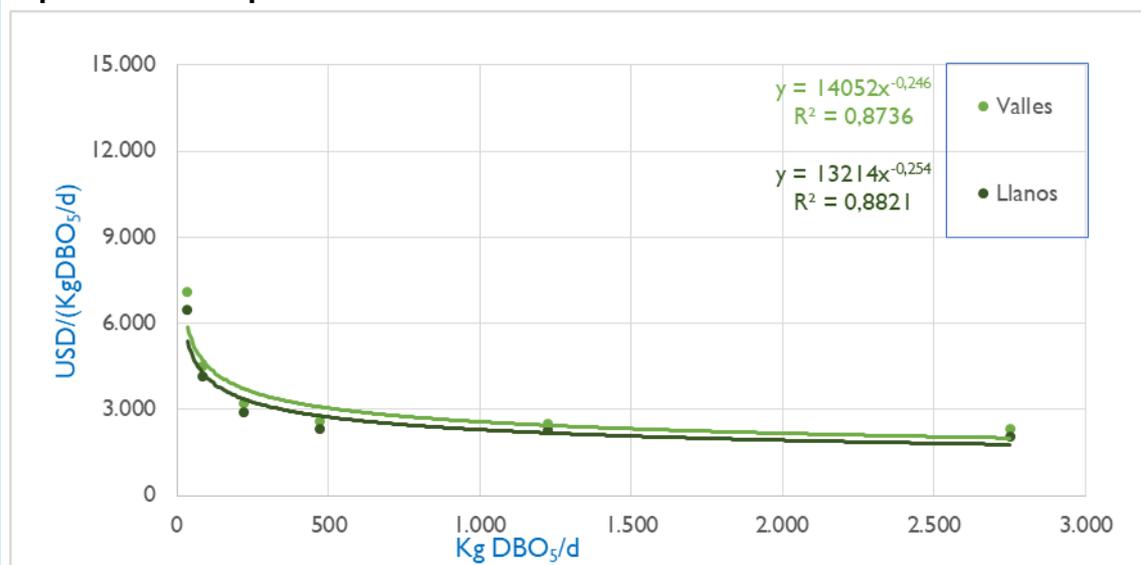
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB/USD



Tipo de ajuste aplicado: *Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)*

Valles Constante de proporcionalidad = 14.052

Exponente de la potencia= -0,246

R²= 0,8736

Llanos Constante de proporcionalidad = 13.214

Exponente de la potencia= -0,254

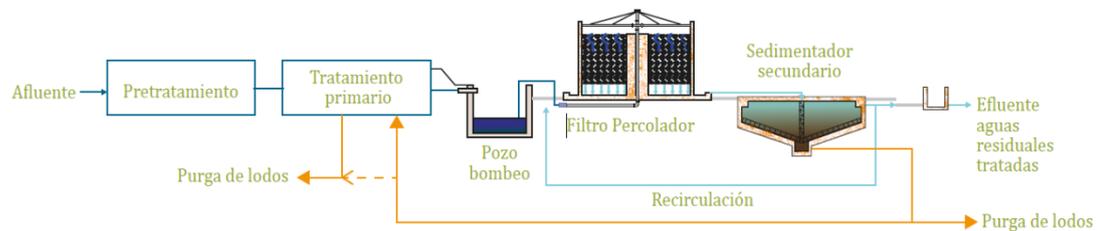
R²= 0,8821

Curva teórica. Bolivia. Línea 2 FP

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



Por debajo de 20.000 habitantes se considera en el pretratamiento desbaste de limpieza manual, constando de dos rejillas de desbaste de 3 y de 1 cm de paso respectivamente, dispuestas en serie, a las que sigue un desarenador estático. Para el tratamiento primario se considera Tanque Imhoff con recirculación de los lodos producidos en el Filtro Percolador para su estabilización en el Tanque Imhoff.

Por encima de 20.000 habitantes se considera un pretratamiento mecanizado, que consta de un desbaste dispuesto en doble canal, con rejillas mecanizadas en uno de ellos de 3 y 1 cm, dispuestas en serie, y con una rejilla de limpieza manual en el canal de by-pass, de 3 cm de paso y un desarenador-desengrasador, con extracción mecanizada de arenas y grasas. Para el tratamiento primario se considera Decantación Primaria con estabilización de lodos en Lagunas Anaerobias a temperatura ambiente.

En todos los casos la deshidratación del lodo estabilizado tiene lugar en lechos de secado.

Origen datos: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (25-2.500 kg DBO₅/d)

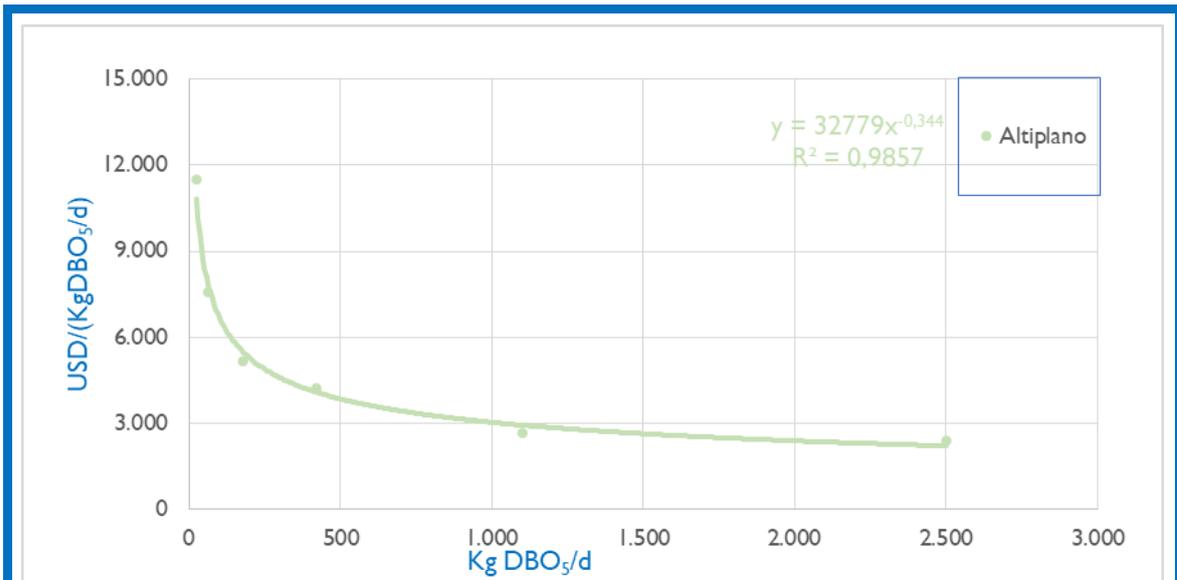
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

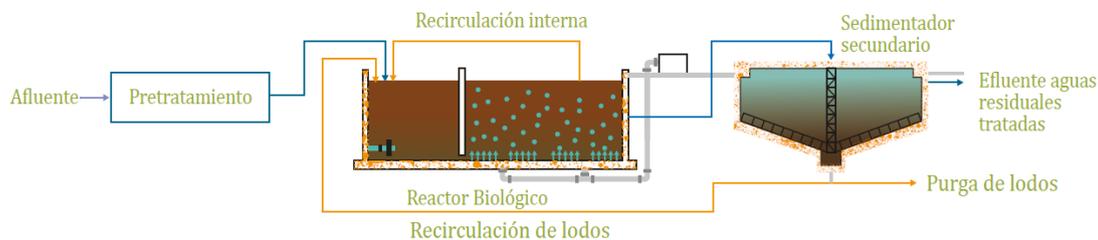
Altiplano Constante de proporcionalidad = 32.779
Exponente de la potencia = -0,344
R² = 0,9857

Curva teórica. Bolivia. Línea 3 AE

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



Por debajo de 20.000 habitantes se considera en el pretratamiento desbaste de limpieza manual, constando de una reja de 3 cm de paso a la que le sigue un desarenador estático. El tratamiento de los lodos producidos tiene lugar en lechos de secado

Por encima de 20.000 habitantes se considera un pretratamiento mecanizado, que consta de un desbaste dispuesto en doble canal, con rejas mecanizadas en uno de ellos de 3 y 1 cm, dispuestas en serie, y con una reja de limpieza manual en el canal de by-pass, de 3 cm de paso y un desarenador-desengrasador, con extracción mecanizada de arenas y grasas. El tratamiento de los lodos producidos tiene lugar primero con un espesador por gravedad y posteriormente en lechos de secado

Origen datos: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (25-2.500 kg DBO₅/d en Altiplano y 35-2.750 kg DBO₅/d en Valles y Llanos)

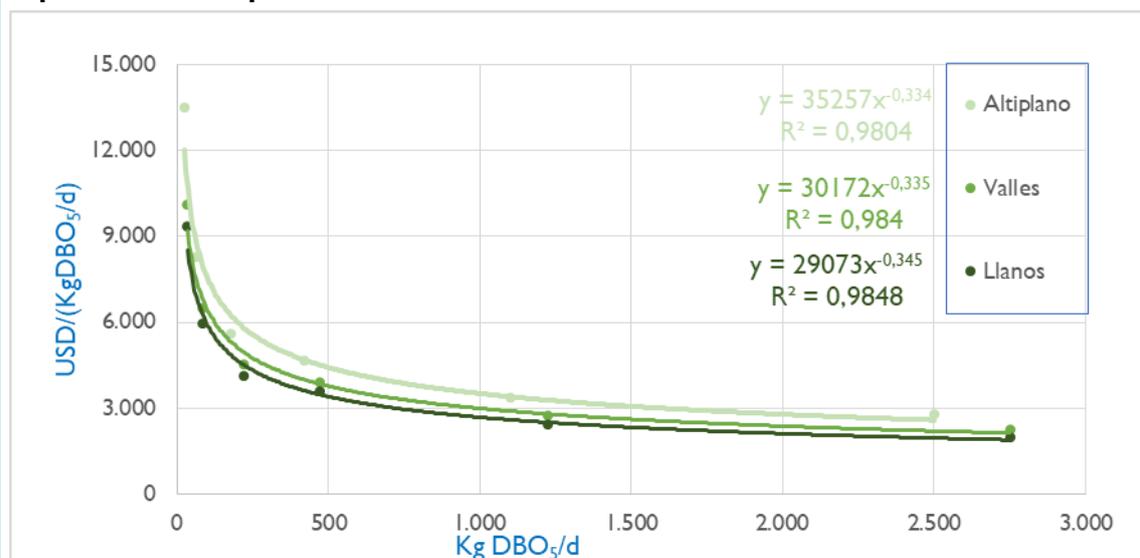
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

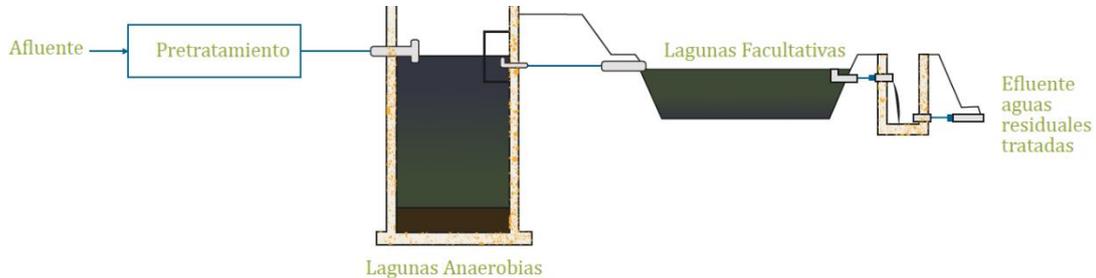
Altiplano	Constante de proporcionalidad = 35.257 Exponente de la potencia= -0,334 R ² = 0,9804
Valles	Constante de proporcionalidad = 30.172 Exponente de la potencia= -0,335 R ² = 0,984
Llanos	Constante de proporcionalidad = 29.073 Exponente de la potencia= -0,345 R ² = 0,9848

Curva teórica. Bolivia. Línea 4 LAG

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



Por debajo de 20.000 habitantes se considera en el pretratamiento desbaste de limpieza manual, constando de una reja de 3 cm de paso a la que le sigue un desarenador estático.

Por encima de 20.000 habitantes se considera un pretratamiento mecanizado, que consta de un desbaste dispuesto en doble canal, con rejillas mecanizadas en uno de ellos de 3 y 1 cm, dispuestas en serie, y con una reja de limpieza manual en el canal de by-pass, de 3 cm de paso y un desarenador-desengrasador, con extracción mecanizada de arenas y grasas.

En todos los casos la deshidratación del lodo estabilizado tiene lugar en lechos de secado.

Origen datos: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (25-2.500 kg DBO₅/d en Altiplano y 35-2.750 kg DBO₅/d en Valles y Llanos)

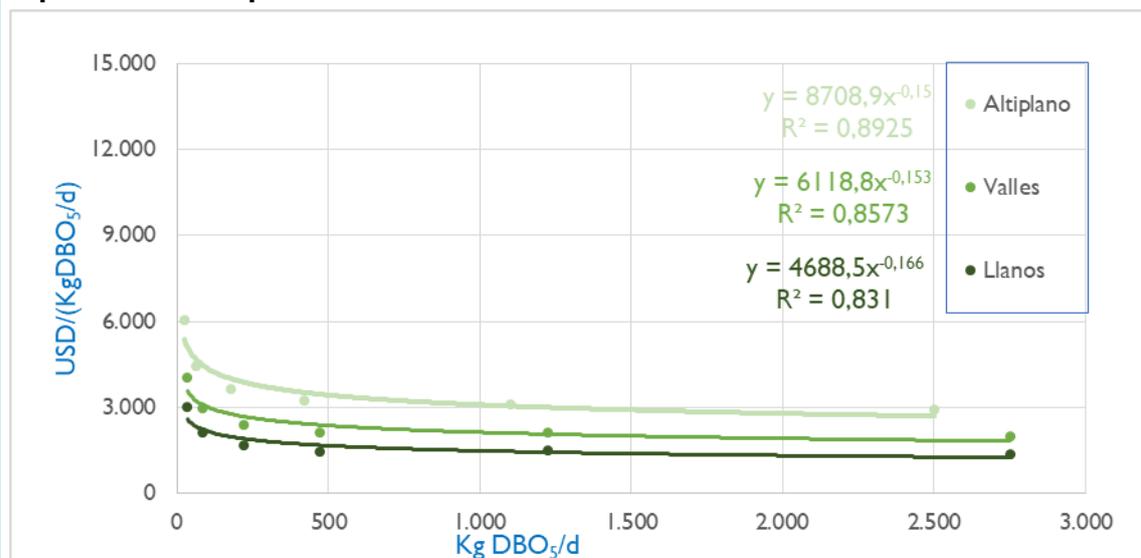
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

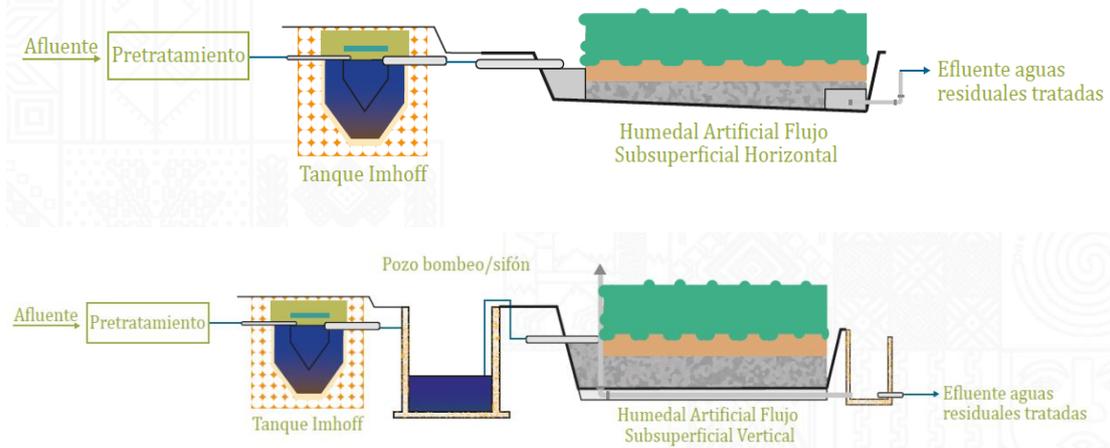
Altiplano	Constante de proporcionalidad = 8.708,9 Exponente de la potencia= -0,15 R ² = 0,8925
Valles	Constante de proporcionalidad = 6.118,8 Exponente de la potencia= -0,153 R ² = 0,8573
Llanos	Constante de proporcionalidad = 4.688,5 Exponente de la potencia= -0,166 R ² = 0,831

Curva teórica. Bolivia. Línea 5 HUM

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por estimación teórica

Tren de tratamiento considerado:



El pretratamiento consta en todos los casos de un canal de desbaste, de limpieza manual con rejillas de 3 y 1 cm, dispuestas en serie, seguidas de un desarenador estático.

En todos los casos la deshidratación del lodo estabilizado tiene lugar en lechos de secado.

Origen datos: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Rango aplicable: 1.000-5.000 habitantes (25-180 kg DBO₅/d en Altiplano y 35-220 kg DBO₅/d en Valles y Llanos)

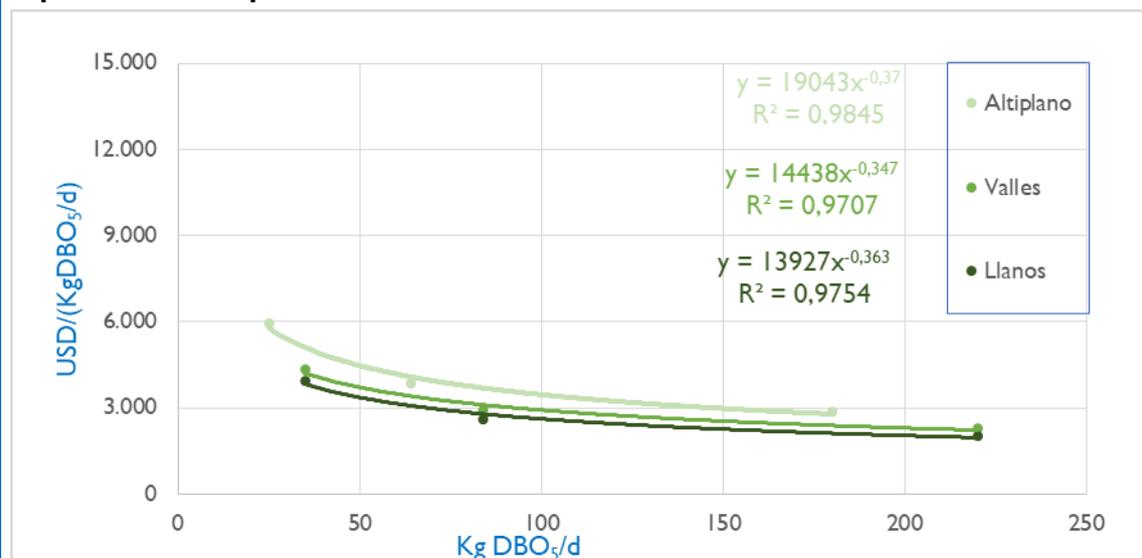
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Altiplano	Constante de proporcionalidad = 19.043 Exponente de la potencia= -0,37 R ² = 0,9845
Valles	Constante de proporcionalidad = 14.438 Exponente de la potencia= -0,347 R ² = 0,9707
Llanos	Constante de proporcionalidad = 13.927 Exponente de la potencia= -0,363 R ² = 0,9754

I.2 CURVAS OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS REALES

En este apartado se muestran las curvas de costos elaboradas a partir de datos reales de proyectos.

Las curvas de costos reales, o los datos brutos para su elaboración, que se muestran en este apartado, se han extraído de trabajos de planificación asociados a planes de inversión en PTAR realizados por el CEDEX para tres países: España, Bolivia y Argentina.

En el primer subapartado se exponen algunas consideraciones que es importante tener en cuenta para comparar las curvas obtenidas en los distintos países, así como otras consideraciones metodológicas de tipo general que se han seguido para la elaboración de las curvas. Posteriormente, en los tres últimos subapartados se expondrán las curvas teóricas de costos obtenidas en cada país para las líneas de tratamiento de las que se dispone de información, así como consideraciones metodológicas más específicas.

I.2.1 Consideraciones generales y metodológicas

Se dispone de datos reales o curvas en España para las líneas “2 FP”, “3 AE”, “4 LAG” y “5 HUM”, para Bolivia para la línea “4 LAG” y para Argentina para las líneas “3 AE” y “4 LAG”.

Dado que los rangos de población analizados son distintos para cada país y éste juega un papel crítico en el análisis, interpretación y potencial aplicación de las curvas de costo, en la tabla siguiente se muestran los rangos de población para los que se disponía de información para cada línea en cada país.

Tabla A1.1: Rangos poblacionales de las curvas de costos reales disponibles

	Línea 1 RAFA+FP	Línea 2 FP	Línea 3 AE	Línea 4 LAG	Línea 5 HUM
España (1)	---	200-20.000	200-50.000	1300-15.600	100-2.000
Bolivia	---	---	---	150-22.500	---
Argentina	---	---	1.000-50.000	1.000-50.000	---

(1) Habitantes equivalentes

Al igual que para las curvas teóricas, dado que las curvas venían definidas por habitante o por habitante equivalente tratado, fueron transformadas a costos relativos por carga de DBO₅ y actualizados los costos a USD de 2019 para poder realizar comparaciones.

Las curvas de costos finales se obtuvieron mediante ajuste potencial por mínimos cuadrados.

I.2.2 España

La información se ha obtenido de la *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca* publicada por el CEDEX en el año 2011 (CEDEX, 2011).

En la elaboración de esta guía técnica se realizó el filtrado y procesado de datos de costos de proyectos de modo que su alcance fuera lo más comparable posible, reflejando únicamente el costo de ejecución material de la instalación de las líneas de agua y de lodos de las PTAR, eliminando de

la muestra aquellas PTAR que presentaban singularidades especiales en cuanto al alcance de la línea de tratamiento. Sin embargo, en algunos casos los presupuestos analizados presentaban cierto rango de indefinición en lo referente a su alcance, optándose en estos casos por una estimación al alza del costo, lo que podría implicar que las curvas obtenidas puedan ser un poco superiores a las que se obtendrían realmente.

Las siguientes fichas muestran los datos reales y la curva de costos calculada a partir de ellos para las cinco líneas de tratamiento estudiadas, con la salvedad de la “Línea I RAFA+FP”, ya que en España no existe este tipo de tratamiento porque la climatología española en general no lo hace viable. Un aspecto importante a destacar al respecto es que en España el relleno que se utiliza para los filtros percoladores es en la práctica totalidad de los casos de tipo plástico.

Curva real. España. Línea 2 FP

País de origen: España

Tipo de curva: Obtenida por interpolación de datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por filtros percoladores en línea de agua (pretratamiento, decantación primaria, filtro percolador y decantación secundaria. La práctica totalidad contaba con relleno de tipo plástico. En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque el tren de tratamiento más probable es espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación mecánica de lodos en grandes instalaciones y depósito de lodos y transporte a planta de mayor tamaño en pequeñas instalaciones.

Origen datos: *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca*

Nº de datos de origen: 45

Rango aplicable: 200-20.000 habitantes (12-1.200 kg DBO₅/d)

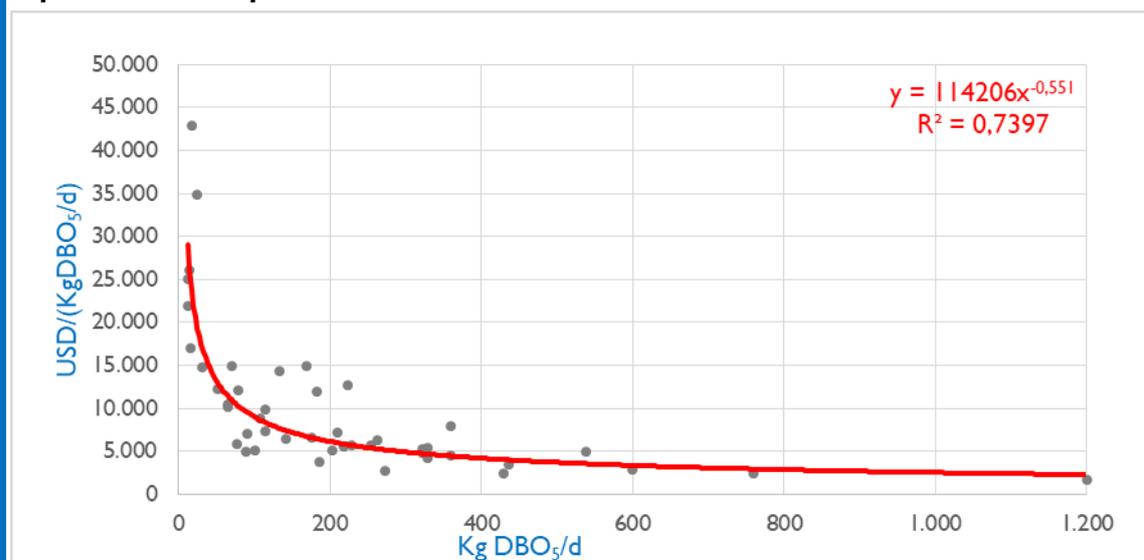
Año de referencia de los datos de origen: 2006 (diciembre)

Año de actualización de datos: 2019 (enero)

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: *Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)*

Constante de proporcionalidad = 114.206

Exponente de la potencia = - 0,551

$R^2 = 0,7397$

Curva real. España. Línea 3 AE

País de origen: España

Tipo de curva: Obtenida por interpolación de datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por aireación prolongada en línea de agua (pretratamiento, reactor biológico y decantación secundaria). En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque el tren de tratamiento más probable sería espesamiento y deshidratación mecánica.

Origen datos: *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca*

Nº de datos de origen: 117

Rango aplicable: 200-48.000 habitantes (12-2.880 kg DBO₅/d)

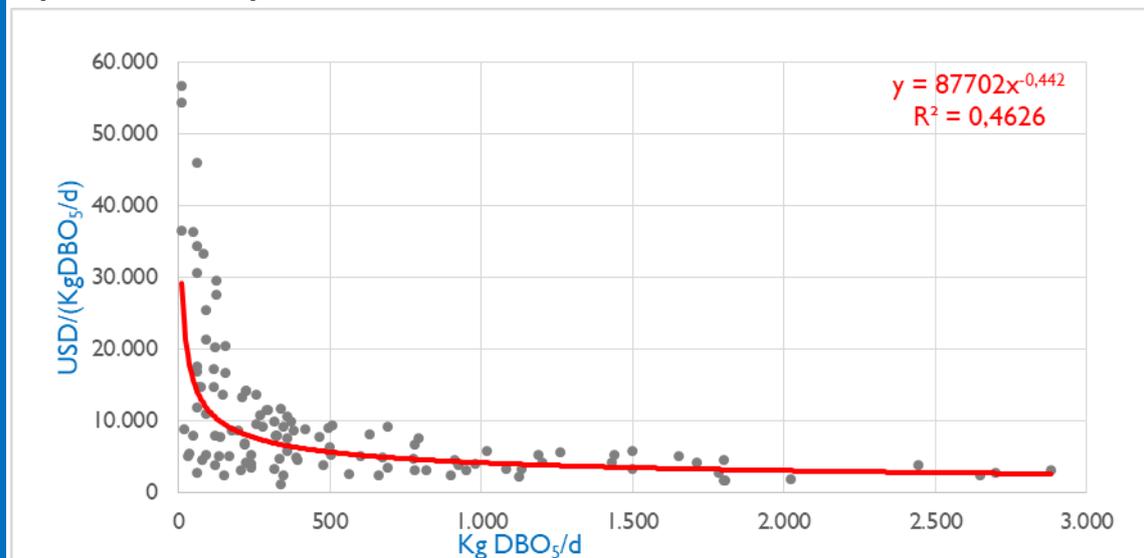
Año de referencia de los datos de origen: 2006 (diciembre)

Año de actualización de datos: 2019 (enero)

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: *Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)*

Constante de proporcionalidad = 87.702

Exponente de la potencia = - 0,442

R² = 0,4626

Curva real. España. Línea 4 LAG

País de origen: España

Tipo de curva: Obtenida por interpolación de datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por lagunas de estabilización en línea de agua (pretratamiento, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración). En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque probablemente no cuenten con ningún tratamiento de lodos.

Origen datos: *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca*

Nº de datos de origen: 20

Rango aplicable: 1.000-15.600 habitantes (60-936 kg DBO₅/d)

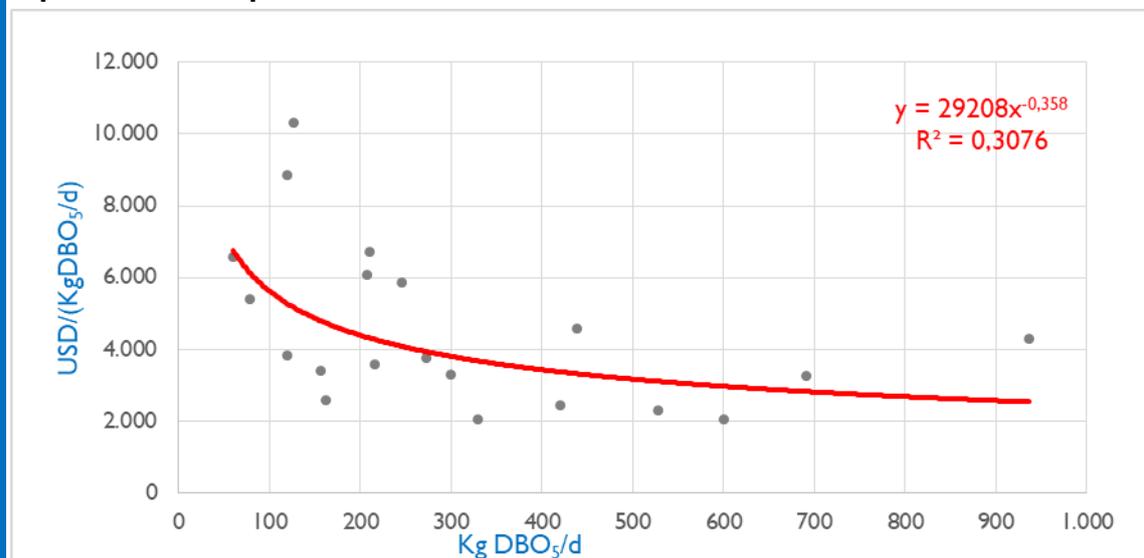
Año de referencia de los datos de origen: 2006 (diciembre)

Año de actualización de datos: 2019 (enero)

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: *Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)*

Constante de proporcionalidad = 29.208

Exponente de la potencia = - 0,358

$R^2 = 0,3076$

Curva real. España. Línea 5 HUM

País de origen: España

Tipo de curva: Obtenida por interpolación de datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por humedales artificiales de flujo tanto vertical como horizontal en línea de agua (pretratamiento, tratamiento primario probablemente Tanque Imhoff, y humedales). En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque probablemente se limitase a lechos de secado.

Origen datos: *Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca*

Nº de datos de origen: 30

Rango aplicable: 45-2.000 habitantes (3-120 kg DBO₅/d)

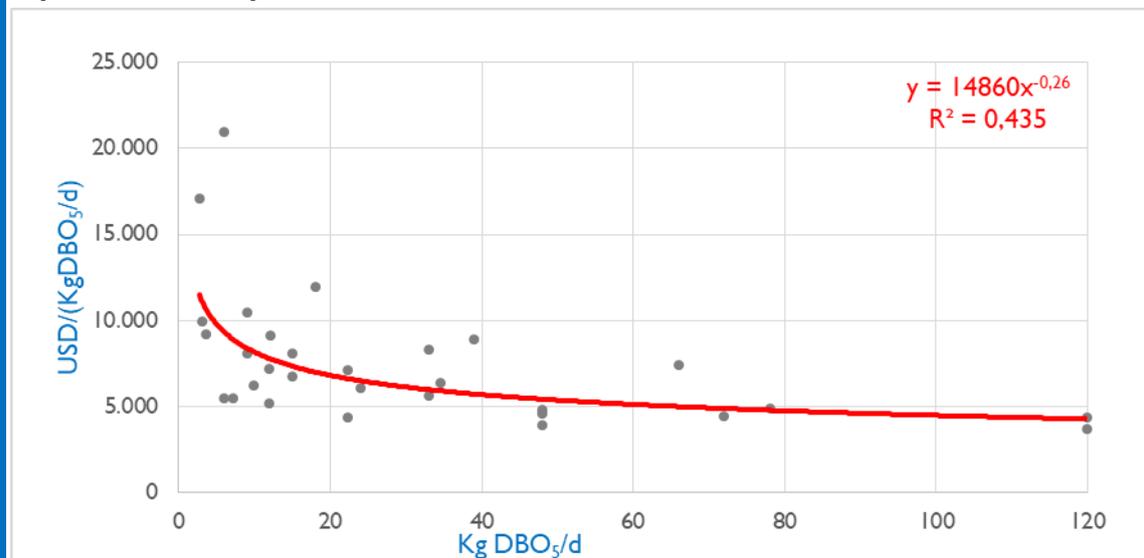
Año de referencia de los datos de origen: 2006 (diciembre)

Año de actualización de datos: 2019 (enero)

Tasa de variación de costos aplicada: 12,7%

Moneda de los datos de origen: EUR

Tipo de cambio aplicado: 0,87 EUR/USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 14.860

Exponente de la potencia = - 0,26

$R^2 = 0,435$

I.2.3 Bolivia

Los datos utilizados para la elaboración de la curva han sido los recopilados y procesados por técnicos del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) para el plan de inversión en tratamientos de aguas residuales, dentro de la *Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales* (ENTAR). Únicamente se recopilaron datos suficientemente numerosos para la línea de tratamiento correspondiente a lagunas de estabilización, por lo que es la única para la que se elaboró curva.

A continuación se muestra la ficha de la curva real obtenida. En el gráfico se muestran los datos utilizados, diferenciados en colores en función de su zona ecológica. Hay 4 datos de los que se desconoce su zona ecológica y que se han representado en gris en la serie denominada "desconocido". Debido a la escasez de datos disponibles para cada zona ecológica, se ha considerado más adecuado realizar una única curva en lugar una por cada zona ecológica. La siguiente figura muestra esta curva.

Curva real. Bolivia. Línea 4 LAG

País de origen: Bolivia

Tipo de curva: Obtenida por interpolación de datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por lagunas de estabilización en línea de agua (pretratamiento, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración). En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque probablemente no cuenten con ningún tratamiento de lodos.

Origen datos: Plan de inversiones de la ENTAR

N° de datos de origen: 26

Rango aplicable: 150-22.500 habitantes (6-1.100 kg DBO₅/d)

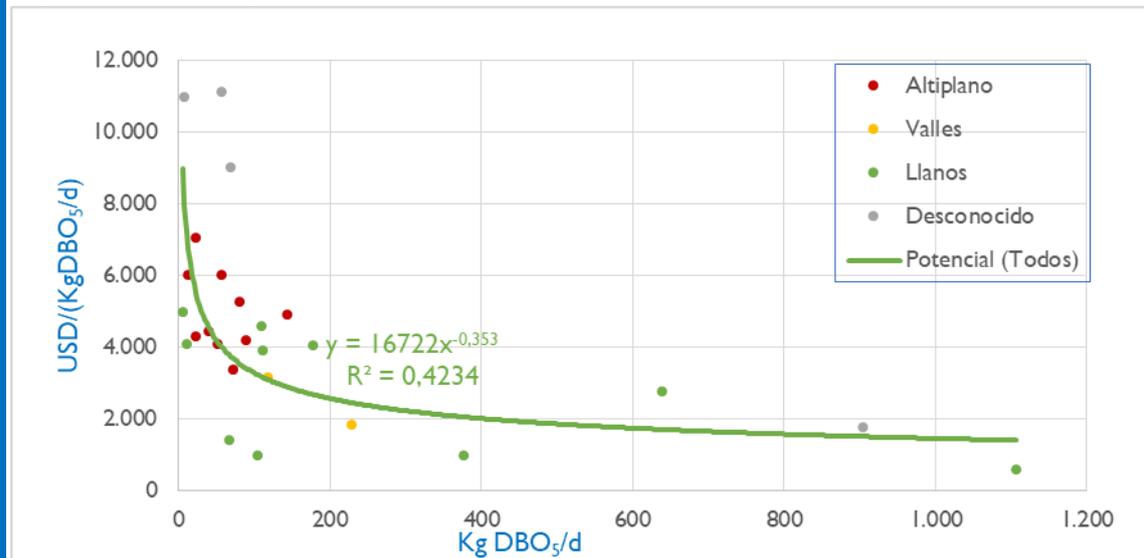
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: BOB

Tipo de cambio aplicado: 6,93 BOB//USD



Tipo de ajuste aplicado: Potencial (ajuste gráfico automático con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 16.722

Exponente de la potencia = - 0,353

R² = 0,4234

I.2.4 Argentina

Las curvas que se muestran a continuación se obtuvieron en los trabajos realizados para el Plan de Inversiones del *Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PNTAR)* de Argentina.

En este caso se obtuvieron curvas para dos líneas, la “línea 3 AE” y la “línea 4 LAG”.

La metodología seguida en este caso es particular, pues las curvas obtenidas no son realmente curvas reales, sino curvas de referencia ajustadas a partir de datos reales, mediante la metodología propuesta en esta monografía y cuyo detalle se puede consultar en los box 10 y 11. Para su obtención se utilizaron como curvas de referencia el promedio de las curvas teóricas del Altiplano y Los Valles bolivianos para la “línea 4 LAG” y la curva de Los Valles bolivianos para la “línea 3 AE”. Estas curvas se ajustaron a partir de datos de costos de inversión de PTAR reales, tras realizar un filtrado de los mismos.

Las siguientes fichas muestran los datos reales y la curva de costos ajustada para las líneas “3 AE” y “4 LAG”.

Curva real ajustada. Argentina. Línea 3 AE

País de origen: Argentina

Tipo de curva: Obtenida por ajuste de curva de referencia con datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por aireación prolongada en línea de agua (pretratamiento, reactor biológico y decantación secundaria). En línea de lodo se desconoce el detalle.

Origen datos: Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales

N° de datos de origen: 4

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (50-2.500 kg DBO₅/d)

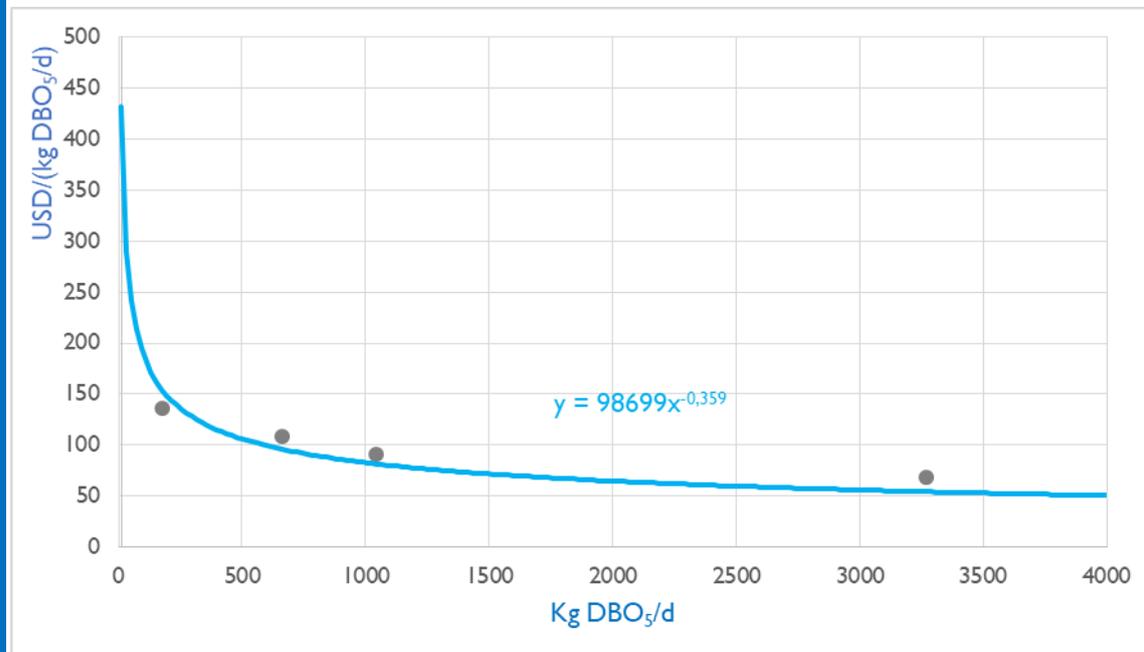
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Desplazamiento de curva de referencia a partir de los datos reales por mínimos cuadrados (ajuste gráfico realizado con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 98.699

Exponente de la potencia = - 0,359

R² = No aplica

Curva real ajustada. Argentina. Línea 4 LAG

País de origen: Argentina

Tipo de curva: Obtenida por ajuste de curva de referencia con datos reales

Instalaciones valoradas: PTAR con tratamiento por lagunas de estabilización en línea de agua (pretratamiento, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración). En línea de lodo se desconoce el detalle, aunque probablemente no cuenten con ningún tratamiento de lodos.

Origen datos: Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales

N° de datos de origen: 10

Rango aplicable: 1.000-50.000 habitantes (50-2.500 kg DBO₅/d)

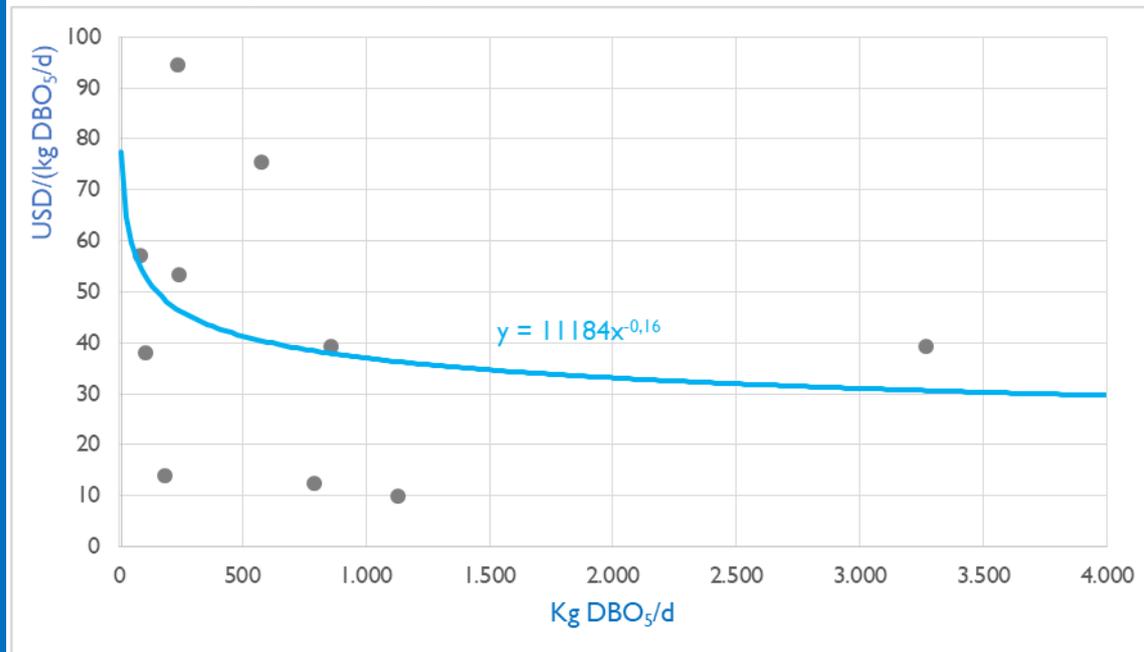
Año de referencia de los datos de origen: 2019

Año de actualización de datos: 2019

Tasa de variación de costos aplicada: No aplica

Moneda de los datos de origen: USD

Tipo de cambio aplicado: No aplica



Tipo de ajuste aplicado: Desplazamiento de curva de referencia a partir de los datos reales por mínimos cuadrados (ajuste gráfico realizado con Microsoft Excel)

Constante de proporcionalidad = 11.184

Exponente de la potencia = - 0,16

R² = No aplica



MINISTERIO
DE ASUNTOS EXTERIORES, UNIÓN EUROPEA
Y COOPERACIÓN

