

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

A pesar de los avances científicos en áreas como la biotecnología, la ingeniería o la ciencia de los materiales, la reutilización de las aguas regeneradas no es todavía una práctica común. Hasta el momento las soluciones a los problemas de suministro de agua dentro del sector hidráulico han recaído básicamente en áreas del conocimiento como la ingeniería civil o la ingeniería agrícola, donde las soluciones están enfocadas hacia la explotación de fuentes convencionales. La participación de otras corrientes del conocimiento permitirán, mediante un trabajo multidisciplinario e interdisciplinario, un cambio en los paradigmas para incorporar la práctica de regenerar y reutilizar las aguas residuales dentro de la gestión integral del agua.

Por su parte, los modelos económicos presentan a menudo dificultades para incorporar en modelos formales, necesariamente simplificadores de la realidad, toda la complejidad tecnológica, social y ambiental asociada a la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

Esta tesis constituye un intento por modificar el actual paradigma en el análisis técnico-económico de los Sistemas de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales (SRRAR). Se pretende mediante una visión multidisciplinaria e interdisciplinaria evaluar económicamente los SRRAR. Este análisis técnico-económico no solo considera los impactos privados, que básicamente tienen que ver con el aspecto técnico. Se busca ir más allá, incorporando al modelo de evaluación todos aquellos impactos externos (ambientales, sociales y económicos) que se obtienen al realizar la implantación y explotación de un SRRAR.

La práctica de reutilizar las aguas residuales tiene un origen ancestral que data desde la época Minoica (Asano, 2001). Se identifican tres períodos claves en el terreno de la regeneración y reutilización de las aguas residuales. En la primera época surgen los sistemas de suministro de agua e infraestructuras para el saneamiento, comprendiendo este periodo desde el 3,000 a.C. hasta 1850. En un principio las aguas residuales eran reutilizadas sin ningún tratamiento, vertiéndose directamente sobre campos agrícolas en las antiguas granjas de Alemania e Inglaterra, lo que originó graves problemas de salud pública.

El segundo periodo comprendido entre 1850 a 1950 se presenta el gran avance sanitario. El control de la epidemia del cólera en Londres; el desarrollo de la teoría sobre la prevención de la fiebre tifoidea; así como los avances de la microbiología, el uso del cloro como desinfectante y el conocimiento de la cinética de la desinfección, marca un punto de inflexión en la ingeniería sanitaria. En esta época se desarrollan en Inglaterra los primeros procesos biológicos para la

depuración de las aguas residuales, mientras que en California surgen las primeras regulaciones para el uso de las aguas residuales en la agricultura.

La tercera etapa que corresponde desde 1960 hasta nuestros días es considerada como la época de la regeneración, reciclaje y reutilización de las aguas residuales. La reutilización planificada de las aguas regeneradas empezó a principios de los años 20 en los Estados Unidos de Norteamérica. Actualmente la experiencia internacional sobre la regeneración y reutilización de aguas residuales es muy amplia; existe una veintena de países que realizan de alguna manera esta práctica. Existen evidencias en la literatura que documentan el uso del agua regenerada en todos los usos para los cuales se destina el recurso hídrico, incluido el suministro de agua potable.

Es importante resaltar que esta evolución se ha dado particularmente en los países desarrollados, pues en la actualidad muchos países en vías de desarrollo, como por ejemplo la India, China, así como muchos de los países latinoamericanos y africanos, siguen reutilizando las aguas residuales sin ningún tratamiento.

En este momento, la regeneración y reutilización de las aguas residuales cobran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua. En concreto, la reutilización de agua regenerada dentro de una cuenca hidrográfica es una de las prácticas que mejor concuerda con los preceptos de un desarrollo sostenible.

Actualmente existen tecnologías que permiten alcanzar el nivel de calidad de agua adecuado para cualquier uso al que se piense destinar el agua regenerada. La literatura demuestra que a medida que los requisitos de calidad del agua son más exigentes, el proceso de tratamiento se hace más complejo y costoso. Así mismo, es importante considerar que cualquier proceso de regeneración requiere tener en cuenta también la línea de tratamiento y estabilización de los subproductos obtenidos.

En la literatura especializada con el campo de la regeneración y reutilización de las aguas residuales existen muy pocos trabajos económicos. En general la mayoría de los estudios solamente enuncian y justifican técnicamente las ventajas e inconvenientes de la implantación del SRRAR. Las metodologías consultadas sobre la planificación de los SRRAR reconocen la necesidad de efectuar un análisis económico. Sin embargo, ninguna detalla como debe realizarse.

Las escasas evaluaciones económicas realizadas a los SRRAR se centran en su gran mayoría, en determinar los costes privados del sistema. Los expertos aplican en general un análisis coste eficiencia con el fin de justificar la selección de una determinada tecnología.

En las metodologías para la planificación de los SRRAR consultadas, las variables económicas se comportan de una forma exógena al sistema. Es decir, las variables económicas inciden de manera significativa en el modelo de planificación, pero el modelo no incide sobre estas variables.

Los expertos en los SRRAR tienen muy claras las ventajas e inconvenientes del sistema, pero con frecuencia en los análisis técnicos es difícil encontrar una valoración económica de los impactos del sistema.

De manera análoga, los expertos en el área de la economía tienen un amplio dominio sobre las técnicas económicas que pueden ser utilizadas para convertir los impactos biofísicos en unidades monetarias. Sin embargo, los modelos económicos adolecen, casi siempre por falta de la información necesaria, de una base empírico-técnica más sólida.

En la actualidad, y en el ámbito de la regeneración y reutilización de las aguas residuales, todavía no se ha llevado a cabo desde un punto de vista metodológico una identificación, cuantificación y valoración económica de los impactos relacionados con la implantación y explotación de un SRRAR.

Esta tesis persigue aportar al campo de la regeneración y reutilización de las aguas residuales, una metodología para el análisis técnico-económico para los SRRAR, basado en un trabajo multidisciplinario e interdisciplinario. Esta metodología permitirá a los expertos en esta área del conocimiento tener una herramienta con la cual evaluar económicamente los SRRAR considerando los principales impactos, tanto privados como externos del sistema.

1.2 Objetivo

El objetivo general de esta tesis es desarrollar una metodología para el análisis técnico-económico de los SRRAR. La metodología se fundamenta en la aplicación de técnicas para la evaluación de proyectos, adaptadas particularmente a los SRRAR. Para lograr esta adaptación ha sido necesario buscar un nuevo paradigma que permita relacionar el área tecnológica con el área económica. La metodología propuesta pretende ser una herramienta para los tomadores de decisión en el sector hidráulico, soportada tecnológicamente y económicamente, que permita decidir sobre las políticas necesarias en la implantación y/o el buen funcionamiento de los SRRAR.

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- a) Revisar y documentar el estado actual de los avances internacionales en materia de regeneración y reutilización de aguas residuales.
- b) Identificar, documentar y discutir las diversas metodologías para la planificación de los sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales.
- c) Desarrollar una metodología para el análisis técnico-económico que considere todos los impactos relevantes relacionados con la práctica de la regeneración y reutilización de las aguas residuales, con el fin de que profesionales vinculados con el sector hidráulico cuenten con una herramienta que, de manera sencilla, les permita evaluar la viabilidad económica de la implantación de este tipo de proyectos.
- d) Aplicar y documentar la metodología propuesta a varios casos de estudio donde se considera la regeneración y reutilización de las aguas residuales como una fuente alternativa de suministro.

Esta tesis se compone de 8 capítulos recoge la situación actual en el ámbito internacional de la práctica de regenerar y reutilizar aguas residuales, las principales metodologías para la planificación de los SRRAR, una propuesta metodológica para el análisis técnico-económico de estos sistemas y finalmente, la aplicación de esta metodología a varios casos de estudio.

En el capítulo 2 de esta tesis se presenta una revisión bibliográfica sobre las experiencias internacionales en la regeneración y reutilización de aguas residuales. En este capítulo se reflexiona sobre las bases teóricas que sustentan la actual gestión integral del agua. Asimismo se presenta una discusión sobre las diferentes definiciones relacionadas con la regeneración, la reutilización y el reciclaje de aguas residuales.

De este capítulo se concluye que el término aguas regeneradas, que cada día cobra mayor fuerza, tiene que ver simplemente con la búsqueda de la aceptación social de estas aguas, pues desde el punto de vista técnico, y siempre desde el ámbito de las aguas residuales, efluente tratado, aguas tratadas y aguas regeneradas son sinónimos. Además, producto de la investigación realizada se deduce que existen básicamente dos zonas donde se realiza esta práctica: 1) aquellas zonas continentales donde la precipitación es escasa y 2) las islas, donde debido a la falta de infraestructura para la captación, la práctica de reutilización se convierte en una opción para el suministro de agua. El único caso documentado donde se realiza la reutilización potable directa es en Namibia; para todos los demás usos existen evidencias de la reutilización de las aguas regeneradas por varias partes del mundo.

Las metodologías para la planificación de los SRRAR son abordadas en el capítulo 3, en el cual se revisan las principales aportaciones sobre el tema de la planificación en los SRRAR en el contexto internacional. El análisis comprende la revisión de las diferentes metodologías

aplicadas en la planificación de estos sistemas. Así mismo, se realiza una disertación más detallada de los avances desarrollados en los últimos años sobre 5 aspectos básicos para la planificación de los SRRAR: 1) legales, 2) técnicos, 3) sociales, 4) ambientales y 5) económicos.

Del análisis del capítulo 3 se concluye que los aspectos técnicos y legales gozan de un desarrollo importante y de una metodología generalmente bien estructurada. Mientras que, los aspectos ambientales, sociales y económicos presentan un enorme rezago por lo que es necesario reforzarlos metodológicamente. Particularmente, el análisis económico actualmente se centra en un análisis coste-eficiencia con el cual se selecciona el SRRAR de menor coste. La dificultad de realizar un análisis coste-beneficio obedece a la falta metodológica para identificar, cuantificar y valorar monetariamente los impactos privados y externos, producto de la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

En el capítulo 4 se expone la propuesta metodológica para el análisis técnico-económico de los SRRAR. Actualmente en el ámbito de la regeneración y reutilización de las aguas residuales no existe un procedimiento metodológico que permita evaluar económicamente los SRRAR. La finalidad de este capítulo es generar una herramienta que permita a los responsables de la toma de decisión, en el ámbito del sector hidráulico, emitir un juicio soportado tecnológica y económicamente para invertir o no en estos sistemas. Esta metodología evalúa los SRRAR, desde una perspectiva multidisciplinaria e interdisciplinaria.

El objetivo principal es determinar la maximización de los beneficios del SRRAR, tomando como base económica las técnicas del Valor Actual Neto (VAN) y el Análisis Coste-Beneficio (ACB). Entre las aportaciones a destacar en esta metodología está la recolección y discusión de los impactos que se pueden presentar al implantar y explotar un SRRAR. Con base en la experiencia profesional, la consulta a expertos y la información científica reciente se han identificado y descrito los impactos más relevantes. El identificar, periodificar, cuantificar y valorar económicamente los distintos impactos, tanto privados como externos, que pueden existir al implantar y explotar un SRRAR, es fundamental para determinar la viabilidad económica de los SRRAR.

La propuesta metodológica esta conformada por 7 etapas que deberán realizarse para su aplicación, las cuales son: 1) Definición de objetivos, 2) Definición del ámbito de estudio, 3) los impactos del proyecto, 4) Identificación de los agentes implicados, 5) Estudio de las necesidades y posibilidades financieras, 6) Agregación de costes e ingresos y 7) Análisis de sensibilidad.

Una de las aportaciones más importantes de esta metodología es lo referente a la Identificación de los impactos del proyecto, pues en este punto se describen a detalle los impactos, tanto

positivos como negativos, relacionados con los SRRAR. Otra contribución importante es la concerniente a la agregación de los costes e ingresos, pues en este punto se establece que la maximización de los beneficios estará dada por la sumatoria de los beneficios privados y los beneficios de las externalidades. Esto permite visualizar por separado dos situaciones: 1) que el SRRAR sea viable económica y financieramente para su funcionamiento, lo cual está definido por la determinación del beneficio privado (situación que normalmente interesa a los técnicos y políticos); y 2) que el SRRAR sea viable económica, financiera y ambientalmente (lo cual interesa a los economistas y la sociedad).

El capítulo 5 se aplica la metodología propuesta al caso de estudio de la cuenca del río Apatlaco en el estado mexicano de Morelos. El objetivo de este análisis ex-ante es determinar la factibilidad técnico-económica de implantar diferentes SRRAR's que contribuyan al saneamiento de la cuenca. El estudio considera la regeneración y reutilización de las aguas provenientes de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR's) de "La Gachupina" y "Puente Blanco", ubicadas en la localidad de Jiutepec, así como, las EDAR's de las ciudades de Zacatepec y Emiliano Zapata. Los usos potenciales de reutilización de las aguas regeneradas son: 1) agrícola (tanto de terrenos de cultivo, como de riego de jardines, zonas ornamentales y viveros), 2) recreativo (balnearios y actividades acuáticas), 3) acuícola y 4) industriales (sector textil y azucarero).

Los impactos identificados, cuantificados y valorados económicamente en este caso de estudio son los relacionados con los grupos de: 1) la infraestructura hidráulica, 2) el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, 3) el uso del recurso (incluido el coste de oportunidad) y 4) el medio ambiente. Los impactos valorados son agregados a una evaluación que combina el análisis coste-eficiencia (ACE), el análisis coste-beneficio (ACB) y la técnica del Valor Actual Neto (VAN) con el fin de establecer la viabilidad económica de las 57 alternativas propuestas técnicamente, así como determinar las alternativas que proporcionen el máximo beneficio.

De este caso de estudio se concluye que las alternativas más rentables son la reutilización industrial con un beneficio máximo de 0.4591 USD/m³, la reutilización del agua regenerada en usos agrícola-recreativo que aporta un beneficio máximo de 0.5363 USD/m³ y la reutilización agrícola donde el beneficio máximo al que se puede llegar es de 0.3925 USD/m³. Además, con la finalidad de recobrar todos los costes correspondientes al SRRAR, el precio mínimo de venta del agua regenerada que garantizará su recuperación es de 0.2751 USD/m³ para la alternativa de reutilización industrial de Jiutepec, 0.1146 USD/m³ para la alternativa agrícola-recreativo de Zacatepec y de 0.1269 USD/m³ para la alternativa agrícola de Emiliano Zapata.

El capítulo 6 recoge el caso de estudio ex-post sobre la reutilización del agua regenerada con fines de producción vinícola en la finca Garbet de Colera, Girona España. En este caso se analiza el beneficio económico de una empresa vitivinícola que requiere de agua para poder

llevar a cabo su producción. Actualmente han realizado inversiones para captar y distribuir, mediante riego por goteo el agua regenerada en una superficie de 10 ha. Esta empresa cuenta con el suministro de agua regenerada por parte de la EDAR de Colera, siendo la única fuente de abastecimiento de agua.

Los impactos identificados y cuantificados en este capítulo son los relacionados con los grupos de: 1) la infraestructura hidráulica y 2) el uso del recurso (incluida la oportunidad de disponer de agua). Los impactos fueron valorados económicamente mediante los precios de mercado y la aproximación a la función de producción del viñedo. Una vez valorados estos impactos son agregados a una evaluación que combina el análisis coste-beneficio (ACB) y la técnica del Valor Actual Neto (VAN) con el fin de determinar el máximo beneficio que se puede obtener del sistema.

En este capítulo se concluye que el SRRAR de Colera es viable técnicamente y la calidad del agua producida cumple con los criterios para los usos a que se destina, así mismo es el sistema ha demostrado la confiabilidad a lo largo de los años en funcionamiento.

Por lo que a la viabilidad económica se refiere, el SRRAR de Colera es altamente rentable, incluso en un escenario pesimista, el aumentar el número de clientes que demanden agua regenerada hará que el sistema sea aun más rentable. Con el fin de recuperar todos los costes del SRRAR el agua regenerada debería venderse a un precio mínimo de 3.0136 €/m³ si el sistema se explota al 13% de su capacidad, y a un precio de 0.7033 €/m³ si el sistema funciona al 100% de su capacidad. Esta situación no debería generar ningún inconveniente para la empresa Castillo Perelada pues le reporta un margen de beneficio de 6.6322 €/m³, el cual es altamente rentable.

En el capítulo 7 se presenta un caso de estudio sobre la reutilización del agua regenerada para el mantenimiento de los humedales de l'Empordà. Este trabajo determina la viabilidad económica de la regeneración de las aguas residuales del municipio de Empuriabrava, y su posterior reutilización para el mantenimiento hidráulico de los humedales de l'Empordà.

La regeneración y reutilización de las aguas residuales de la localidad de Empuriabrava, generan una serie de impactos en los grupos de: 1) la infraestructura hidráulica, 2) el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, 3) el uso del recurso (incluido el coste de oportunidad), 4) la salud pública, 5) el medio ambiente y 6) la educación. Estos impactos han sido identificados y cuantificados.

Los impactos correspondientes a los grupos de la infraestructura hidráulica, el uso del recurso y el medio ambiente son valorados económicamente, utilizando los precios de mercado y la técnica del coste de viaje, estas valoraciones son agregadas al modelo de maximización con el

fin de determinar el beneficio que se obtiene con la producción de agua regenerada y su reutilización en el mantenimiento de los humedales de l'Empordà.

Las conclusiones de este capítulo son que el SRRAR cumple técnicamente con los objetivos para los cuales fue diseñado y puesto en operación. El SRRAR es viable económicamente, inclusive al no valorarse económicamente todos los impactos del sistema, pues los impactos no evaluados solo aumentarían la rentabilidad del sistema.

La recuperación y preservación de los humedales de l'Empordà mediante el suministro de agua regenerada produce un beneficio total de 0.1445 €/m³. Asimismo, con el fin de rescatar los costes totales del SRRAR de Empuriabrava el Precio Mínimo de Venta del agua regenerada que garantizará la recuperación es de 0.3596 €/m³.

Finalmente en el capítulo 8 se presentan las conclusiones de esta tesis.

Esta investigación presenta una evidencia empírica sobre la viabilidad técnico-económica de regenerar y reutilizar las aguas residuales, sobre todo en aquellas zonas donde la disponibilidad de agua es escasa. Una aportación metodológica es la incorporación y evaluación de externalidades en el análisis técnico-económico de los SRRAR. Los resultados son robustos y confirman la viabilidad de la implantación y explotación de los SRRAR, incluso en situaciones de escasez de agua y entornos ambientales críticos.

De lo anterior, los SRRAR no deben ser considerados una carga económica, al contrario, estos sistemas son generadores de riqueza. Las ventajas que se obtienen por la implantación de estos sistemas, al ser expresadas en un valor económico, superan con creces los costes que conlleva su implantación y explotación. El problema que se debe vencer es la búsqueda de los mecanismos para la internalización de estas ventajas. De esta manera el sistema recogerá estas ventajas, para posteriormente reflejarlas en el precio del agua regenerada, que a su vez contribuirá a fundamentar un precio más real del agua, ya sea de fuentes convencionales o alternativas.

En resumen, esta tesis intenta aportar una nueva visión para el análisis técnico-económico de los SRRAR. El objetivo fundamental ha sido que la metodología propuesta, soportada en un cambio del paradigma que incorpora un enfoque multidisciplinario e interdisciplinario, pueda servir a los especialistas en el ámbito de la regeneración y reutilización de las aguas residuales como herramienta para la toma de decisión. Además, los casos de estudio aquí presentados, exponen la aplicación de la metodología y dejan palpable que el considerar todos los impactos del sistema, tanto privados como externos, favorece la viabilidad económica de los SRRAR.