

MODELACION HIDROECONOMICA Y ANALISIS COSTE EFICACIA DE MEDIDAS PARA ALCANZAR OBJETIVOS MEDIOAMBIENTALES EN UNA CUENCA HIDROGRAFICA.

Contribución a la Directiva Marco europea del Agua

Gabriel Lozano Sandoval

Resumen

Los recursos naturales, en especial los recursos hídricos, son un bien escaso el cual debe ser usado eficientemente. Dicha escasez es un factor limitante en el desarrollo económico, social y medioambiental en una cuenca hidrográfica. Los diferentes usos y actividades humanas en una cuenca generan una serie de presiones e impactos sobre su estado ecológico, que normalmente contribuyen al deterioro de la calidad de sus aguas y su ecosistema fluvial, tomados como efectos directos sobre las masas de agua en una cuenca. Durante los últimos años ha habido una creciente toma de conciencia y preocupación por la contaminación del agua en todo el mundo, y los nuevos enfoques hacia el logro de la explotación sostenible de los recursos hídricos se han desarrollado a nivel internacional, en especial, en los estados miembros de la Unión Europea.

El enfoque de la calidad del agua basado en el control de la contaminación proporciona un mecanismo mediante el cual la cantidad de contaminación que entra en una masa de agua es controlada en función de las condiciones de dicha masa de agua y los objetivos medioambientales para su recuperación y protección, establecidos por la Directiva Marco europea del Agua (DMA), la cual establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas en los países miembros de la Unión Europea. El principal propósito de la misma es alcanzar el buen estado de las masas de agua continentales, de transición y costeras. En el caso de masas de aguas superficiales, el "buen estado" supone alcanzar el buen estado químico y, además, el buen estado ecológico.

El propender por el buen estado de las masas de agua en una cuenca hidrográfica es un proyecto ambicioso que requiere de decisiones que seguramente conlleven grandes inversiones financieras, técnicas y operativas, las cuales han de estar soportadas en herramientas y estudios para lograr su diseño óptimo. Por lo anterior, un análisis

económico a escala de cuenca mediante herramientas económicas de medidas que permiten lograr los objetivos medioambientales (OMA), como el Análisis Coste-Eficacia -ACE- y Modelos Hidro-Económicos –MHE-, permitiría seleccionar la combinación de medidas para alcanzar los OMA propuestos por la Directiva Marco europea del Agua (DMA) al menor coste.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es desarrollar una metodología y las herramientas hidro-económicas necesarias para facilitar a los tomadores de decisión la selección y combinación de medidas que permitan alcanzar los OMA en una cuenca hidrográfica. El enfoque de la investigación incluye una gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) considerando la cantidad, la calidad y la optimización económica de las medidas para alcanzar los objetivos medioambientales, entre ellos los correspondientes a constituyentes no conservativos como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y conservativos como el fósforo. Previo a la modelación hidro-económica, se hace un estudio detallado de las presiones e impactos de las masas de agua en la cuenca, donde se identifican las masas más contaminadas y que deban de aplicarse diferentes medidas tales como: Medidas Básicas (MB), Medidas de Reutilización para atender Demandas Consuntivas (MRDC) y Medidas Complementarias (MC), esto con el fin de que dichas masas alcancen OMA fijados por la DMA.

En los modelos hidro-económicos se utiliza la programación matemática no lineal para determinar la combinación de medidas óptima para alcanzar los OMA (DBO), incorporando la variabilidad temporal para un periodo dado; mientras que para alcanzar el OMA relacionado con el fósforo (P) se utiliza programación matemática entera mixta y programación matemática “semiblanda” entera mixta y no lineal, utilizando variables de activación y de holgura para la selección óptima de la combinación de medidas. Las herramientas de programación matemática usadas han sido GAMS® (General Algebraic Modeling System), y la hoja de cálculo EXCEL®. El ACE integrado con objetivos múltiples, incluye medidas de control de contaminación puntual (Depuradoras) y reutilización de aguas regeneradas. Paralelamente a los modelos hidro-económicos, se utiliza Sistema de Apoyo a la Decisión AQUATOOL® (Andreu et al, 1996), el cual permite conocer detalladamente el comportamiento de caudales circulantes para realizar las ecuaciones de equilibrio y concentraciones en las masas de agua de una cuenca ante cualquier combinación de medidas.

Esta metodología con un enfoque de análisis integral que incluye modelos hidro-económicos, ACE y SADs, ha sido implementada en diferentes cuencas y subcuencas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (Serpis, Albaida, Arquillo, Magro), y los resultados

permiten matemáticamente alcanzar los objetivos medioambientales al menor coste posible de las diferentes masas de agua en una cuenca hidrográfica. Además, permite realizar análisis económicos que pueden incluir el estudio de precios sombra, objetivos múltiples, análisis de bondad de las restricciones de calidad, análisis de incertidumbre con múltiples escenarios hidrológicos equiprobables, y estudiar las externalidades aguas abajo que se presentan en las diferentes masas en una cuenca, entre otros; fortaleciendo el enfoque de una metodología de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, contribuyendo a la implementación de la DMA. Previo a la modelación hidro-económica, se hace un estudio detallado de las presiones e impactos y esquemas de temas importante (ETI) de las masas de agua en la cuenca, donde se identifican las masas más contaminadas y que deban de aplicarse diferentes medidas tales como: Medidas Básicas (MB), Medidas de Reutilización para atender Demandas Consuntivas (MRDC) y Medidas Complementarias (MC), esto con el fin de que dichas masas alcancen OMA fijados por la DMA.

El primer MHE implementado en las cuencas estudiadas es un modelo general para la remoción de materia orgánica (DBO), en este, se obtiene para los Escenarios Hidrológicos Equiprobables (EHE) los resultados donde se presentan las medidas que deben ser activadas y el coste mínimo de activación de la medida representado en el Coste Anual Equivalente (CAE), para alcanzar el objetivo medioambiental (OMA). El segundo MHE implementado especialmente en la cuenca del río Serpis permite realizar una post-optimización, para lo cual se emplea un MHE con reutilización de aguas regeneradas para la remoción de materia orgánica (DBO), el cual garantiza el cumplimiento del OMA en $DBO = 6.0 \text{ mg/l}$, fijado para las diferentes masas en la cuenca. El tercer MHE implementado se centra en la remoción de nutrientes, específicamente de Fósforo (P), de igual forma alcanzando el OMA de $P = 0.4 \text{ mg/l}$, fijados por la autoridad ambiental. De los resultados encontrados, se tiene que estos MHEs, permiten alcanzar los OMA fijados por las Autoridades Ambientales (CHJ) o gestores de recursos hídricos en las cuencas mencionadas, mientras que no se encuentra una variación significativo en el Coste anual Equivalente (CAE) para los diferentes Escenarios Hidrológicos Equiprobables (EHE) analizados. Además, la medida básica (MB) de reutilización de aguas regeneradas, se convierte en una buena estrategia para la adecuada gestión de los recursos hídricos en la cuenca, en términos de calidad y cantidad.

Respecto a la metodología y la implementación de los MHEs, estos tienen una aplicación secuencial desde la optimización de medidas básicas incluidas la reutilización de aguas regeneradas, hasta una nueva optimización y post-optimización con medidas complementarias (MC) en aquellas masas de agua en la cuenca que no alcanzan los OMA

con las medidas básicas (MB). La principal fortaleza de estos MHEs y el ACE es que permiten identificar las medidas prioritarias que se deben activar en la cuenca para alcanzar los OMA, optimizando los recursos en los programas de descontaminación en cuencas. La principal debilidad de estos MHE y ACE es precisamente la robustez en sus procesos para alcanzar los OMA en DBO y Fósforo, mediante la selección de un programa de medidas a escala de cuenca incluida la variabilidad espacial y temporal. Esta metodología y sus herramientas también pueden ser potencialmente aplicables a otros países diferentes a la Unión Europea, siendo especialmente útil en países en vía de desarrollo donde los recursos financieros son muy limitados e igualmente se requiere recuperar el buen estado ecológico de sus cuencas hidrográficas.