Detección de episodios de baja calidad del agua mediante redes de medida en continuo y aplicación de sistemas expertos

Para impedir y reducir la contaminación del agua, promover un uso sostenible, proteger el medio ambiente y mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos, en este artículo se presenta la aplicación de avanzadas técnicas matemáticas diseñadas para ayudar a la gestión de registros de diferentes redes de observación de calidad del agua.

Cecilio Angulo[1], Pablo Rodríguez[2], Montserrat Batlle[3], Antonio González[4] y Sergio de Campos[5]

[1] Subdirector de Investigación. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universitat Politècnica de Catalunya; [2] Technical Leader. División de Sistemas de Información. Adasa Sistemas, S.A.U.; [3] Responsable Área Analítica. División de Product Innovation. Adasa Sistemas, S.A.U.; [4] Jefe de Proyectos. División Calidad del Medio. Adasa Sistemas, S.A.U.; [5] Gerente de Área. División de Sistemas de Información. Adasa Sistemas, S.A.U.

Introducción y aproximación al problema

La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 [1,2], establece un marco comunitario de actuación en política de aguas sobre la organización de su gestión, con las finalidades principales de prevenir y reducir su contaminación, fomentar su uso sostenible, proteger el medio y mejorar la situación de los ecosistemas acuáticos.

Como punto de partida en la práctica de la directiva se llevaron a cabo tareas de caracterización de incidencias antrópicas sobre las aguas, así como diagnósticos de su estado. En base a los resultados de dichos análisis y a factores determinantes como el análisis de coste-beneficio y la participación ciudadana, cada demarcación debería encontrarse en situación de desarrollar un plan de gestión y un programa de medidas, con los objetivos de prevenir el deterioro, mejorar y restaurar el estado de las masas de agua superficiales.

Por otro lado, el despliegue de las estaciones del sistema automático de información de calidad de las aguas (SAICA) [3] ha permitido la obtención de información del estado de los ríos de forma automatizada y en continuo. Si bien las medidas manuales son de carácter puntual y preciso, las medidas procedentes de las estaciones SAICA presentan las ventajas de la inmediatez y la continuidad, aunque implican la gestión de grandes cantidades de registros repartidos en múltiples variables menos precisas.

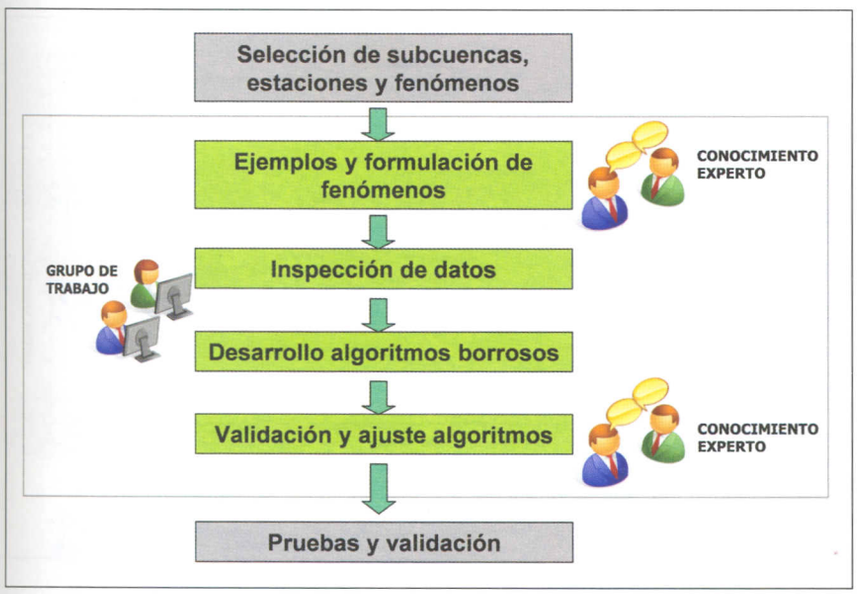


Figura 1. Proceso de desarrollo de los algoritmos de lógica borrosa

El objetivo del proyecto Ecowatch [4], en el contexto de la implantación de la Directiva Marco del Agua, es la aplicación de técnicas de estadística avanzada orientadas a la ayuda en la gestión de los registros procedentes de las diferentes redes de observación de la calidad del agua. Entre otros estudios y desarrollos realizados en el proyecto, cabe destacar el desarrollo de una herramienta *software* de ayuda a la decisión, basada en la aplicación de técnicas de lógica borrosa *(fuzzy logic)*, capaz de detectar episodios de calidad a partir del comportamiento de las variables continuas medidas en las estaciones SAICA.

El sistema experto desarrollado es capaz de generar en tiempo real un conjunto de indicadores combinados de calidad de las aguas basados en los datos de las estaciones automáticas y el conocimiento experto sobre anomalías expresado en forma de reglas.

El objetivo es detectar dos tipos de sucesos: vertidos urbanos o causados por una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), de carácter puntual y espontáneo; y episodios de eutrofia y, experimentalmente, riesgo piscícola, de carácter prolongado y acumulativo en el tiempo.

La hipótesis de trabajo en el proyecto es que la definición experta de estos indicadores continuos aporta información sobre la evolución de la calidad de las aguas de una demarcación hidrográfica y permite detectar posibles

anomalías de forma temprana, anticipándose y complementando los resultados que se obtienen con los muestreos programados. Además, esta forma de gestión:

- permite aumentar el conocimiento sobre la demarcación hidrográfica, al resumir la información contenida en un conjunto de variables complejas
- justifica los costes de operación y mantenimiento de las redes automáticas de vigilancia en continuo, ya que cobran un valor añadido como generadores de conocimiento sobre el medio
- posibilita valorar la efectividad e idoneidad de las actuaciones que se realicen sobre la demarcación, tales como la implantación de un sistema de gestión, la realización de infraestructuras de depuración u otras.

Basándose en la hipótesis de trabajo y con el objetivo de aunar el conocimiento de los expertos con la explotación de la información recogida por la red SAICA, se ha aplicado como metodología de desarrollo la representada en la figura 1, que sirve de guión del presente artículo.

Ejemplos y formulación de los fenómenos

Se ha seleccionado la parte española de la demarcación hidrográfica del río Guadiana como zona de estudio para este proyecto, debido a la disponibilidad de registros de información recogidos por toda una serie de estaciones automáticas de medida del SAICA pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG).

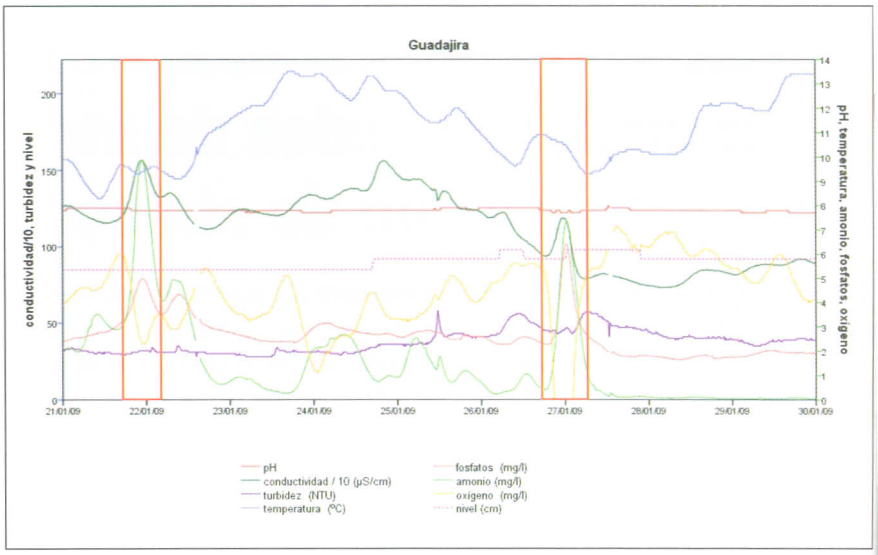
Episodios a detectar y variables a utilizar

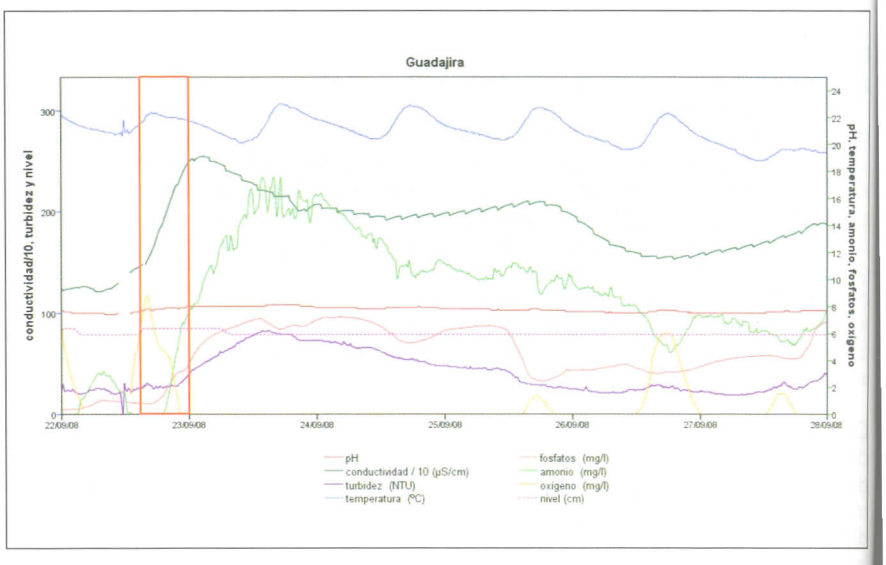
El sistema experto a desarrollar se centra en la detección de episodios de vertido al medio, eutrofización del mismo y, de forma experimental, riesgo piscícola.

La determinación de las variables de calidad a utilizar como entradas para cada tipo de fenómeno se ha realizado contando con la colaboración de personas expertas, quienes han caracterizado una serie de episodios destacables.

Las variables seleccionadas han sido: pH, conductividad, turbidez, concentración de amonio y concentración de oxígeno disuelto.

En los siguientes apartados se discuten episodios característicos para cada tipo de evento analizado.





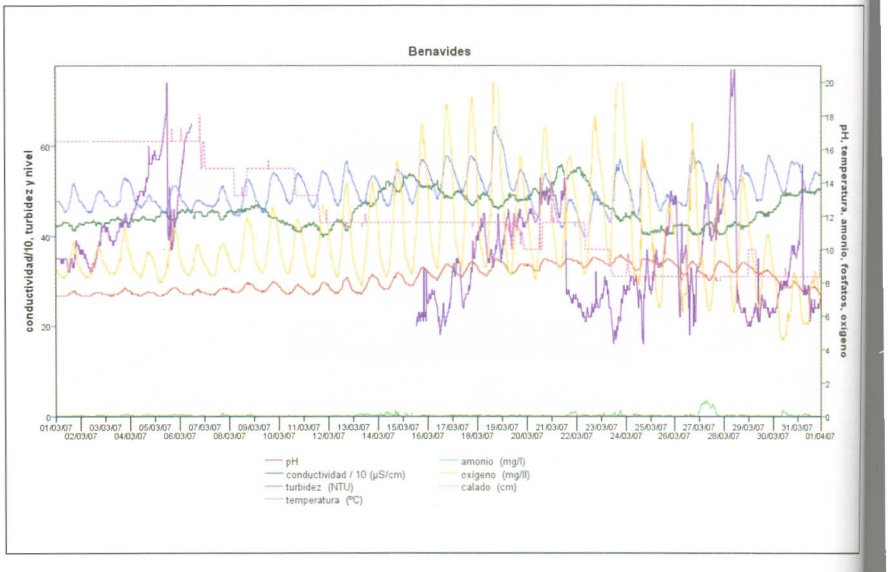


Figura 2. Variables medidas para el episodio 1, 2 (vertido) y 3 (eutrofia y riesgo piscícola)

Vertido urbano o de depuradoras

Los dos episodios de vertido que se muestran a continuación corresponden a la estación automática de Guadajira, ubicada aguas abajo de una EDAR.

Episodio 1: Enero de 2009 en Guadajira

Los valores de las variables seleccionadas por los expertos durante el período del episodio se muestran en la figura 2 (arriba). Se aprecian dos sucesos diferenciados, uno al inicio del día 22 de enero y otro en torno al inicio del día 27, marcados con sendos rectángulos.

La explicación al primero es un posible mal funcionamiento en el proceso de nitrificación-desnitrificación de la EDAR que está situada aguas arriba. En el segundo posiblemente no funcione correctamente la aireación en la EDAR. Este tipo de situaciones es habitual ya que existe una previsión de ampliación sobre la EDAR para dar capacidad suficiente de depuración a las necesidades actuales. En este caso, el sistema experto propuesto se convierte en una herramienta de valoración de la efectividad e idoneidad de las actuaciones.

Episodio 2: Septiembre de 2008 en Guadajira

En la figura 2 (medio) se muestran los valores de las variables durante el episodio anómalo. Se aprecia un suceso que comienza la tarde del día 22 de septiembre, marcado con un rectángulo.

Este episodio corresponde a un vertido urbano directo de la propia EDAR, o de alguna de las industrias aceituneras ubicadas en la zona, no conectadas a la red de saneamiento a la que da servicio la EDAR y que se encuentra en fase de requerimiento para la implantación de los sistemas de depuración convenientes.

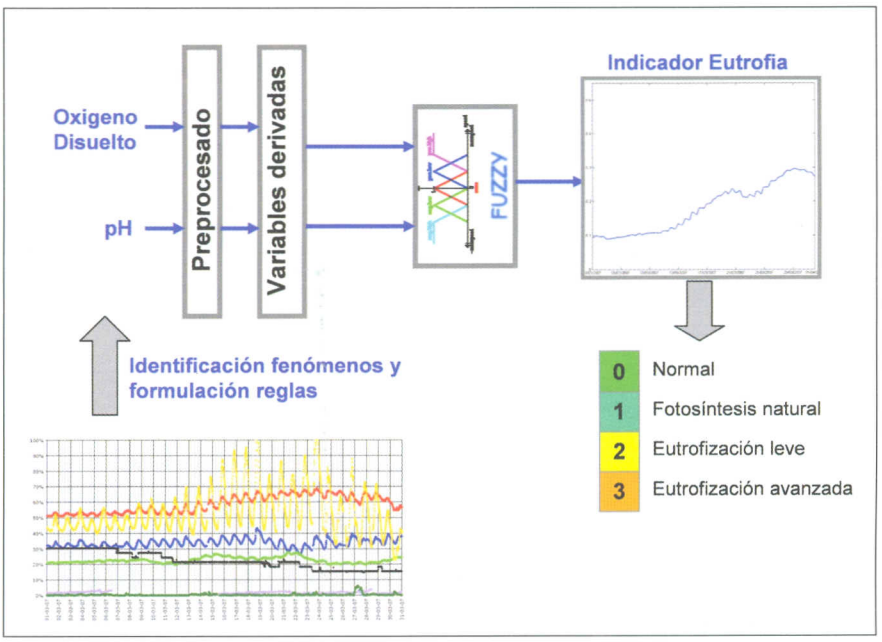


Figura 4. Algoritmo borroso indicador de eutrofia

Eutrofia

Un proceso de eutrofización consiste en el aumento del estado trófico del agua causado por el enriquecimiento de nutrientes [5]. En el límite, el proceso acumulativo puede conducir a un impacto biológico ya que se llega a situaciones de anoxia (ausencia de oxígeno) parcial (nocturna) o permanente, provocando la mortalidad de los peces. A continuación se muestra un episodio seleccionado.

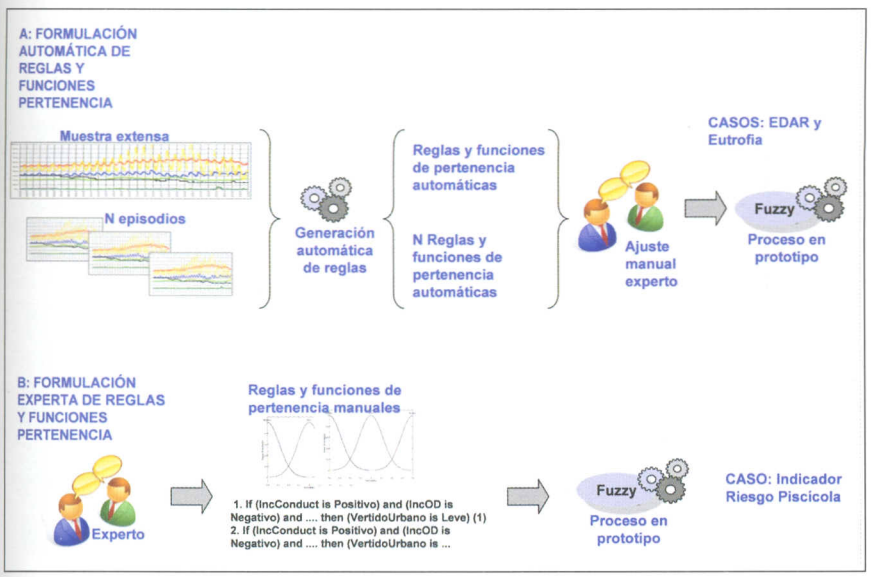


Figura 3. Proceso de calibración de algoritmos

Episodio 3: Marzo de 2007 en Benavides

Se produce un proceso de fotosíntesis natural. Según avanza este proceso, el ciclo diario de oxígeno incrementa su amplitud de oscilación. El bajo caudal no favorece la dilución, favoreciéndose el crecimiento incontrolado de la biomasa. El sistema deja de ser sostenible cuando la cantidad de biomasa a degradar es superior a la capacidad del sistema, agotándose el oxígeno hasta alcanzar situaciones de anoxia. La figura 2 (abajo) muestra el valor de las variables de calidad durante el episodio.

Salir de esta situación depende de la capacidad de renovación del río. El sistema propuesto puede utilizarse para el seguimiento de episodios similares, de forma que permita establecer reglas de gestión de caudales que mantengan unas condiciones suficientemente sostenibles respecto a la calidad del medio.

Riesgo piscícola

De acuerdo con la experiencia de los responsables de explotación, durante la fase avanzada de eutrofia el pH medio del río aumenta. En estas condiciones, si se produce un vertido de amonio se transforma en amoníaco, de elevada toxicidad y letal para una fauna piscícola que ya se encontraba bajo presión por los períodos de anoxia parcial.

Disponer de información sobre riesgo piscícola resulta de elevada utilidad para los responsables de explotación, como ayuda para la toma de decisiones de actuación preventiva. En caso de en-

trar en zona de riesgo, si existe capacidad de actuación, se puede forzar la dilución liberando agua de los embalses que ayude a romper el ciclo de eutrofia.

En los siguientes apartados se presenta un episodio seleccionado para una estación en el río Guadiana.

Episodio 3: Marzo de 2007 en Benavides

En este episodio, los valores de pH medio llegan a valores cercanos a 9, por lo que una descarga pequeña de amonio resulta peligrosa para la fauna piscícola y, una grande, letal. La figura 2 (abajo) muestra el valor de las variables de calidad durante el episodio.

Desarrollo de los sistemas de inferencia borrosos

Una vez fijados los ejemplos de episodios anómalos, el siguiente paso en la metodología es la automatización por parte del grupo de trabajo de la generación del sistema experto.

Descripción

Los sistemas de inferencia borrosos son una metodología extendida en el tratamiento de información para la creación de sistemas expertos en la monitorización de la calidad de las aguas [6,7,8,9].

La lógica borrosa (o difusa) es una lógica multivaluada que proporciona valores intermedios para definir evaluaciones convencionales como verdadero/falso, negro/blanco, etc. Las nociones como "más bien caliente" o "poco hecho" pueden, de esta forma, formularse matemáticamente y ser procesadas computacionalmente. En esencia, un sistema de inferencia borroso es un algoritmo capaz de convertir un conjunto de reglas lingüísticas en una estrategia automatizada. Con la lógica borrosa es posible diseñar aplicaciones para que los sistemas y procesos respondan con mayor conocimiento a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior.

Aplicación

Los datos obtenidos de forma continua a través de redes automáticas en la demarcación de la CHG han permitido caracterizar diferentes episodios en la cuenca, a los cuales los expertos han intentado asociar la posible causa de tal episodio.

Este tipo de información es del todo relevante para realizar un estudio sistemático de la calidad del agua y, para ello, es muy importante poder contar con el apoyo de técnicos expertos

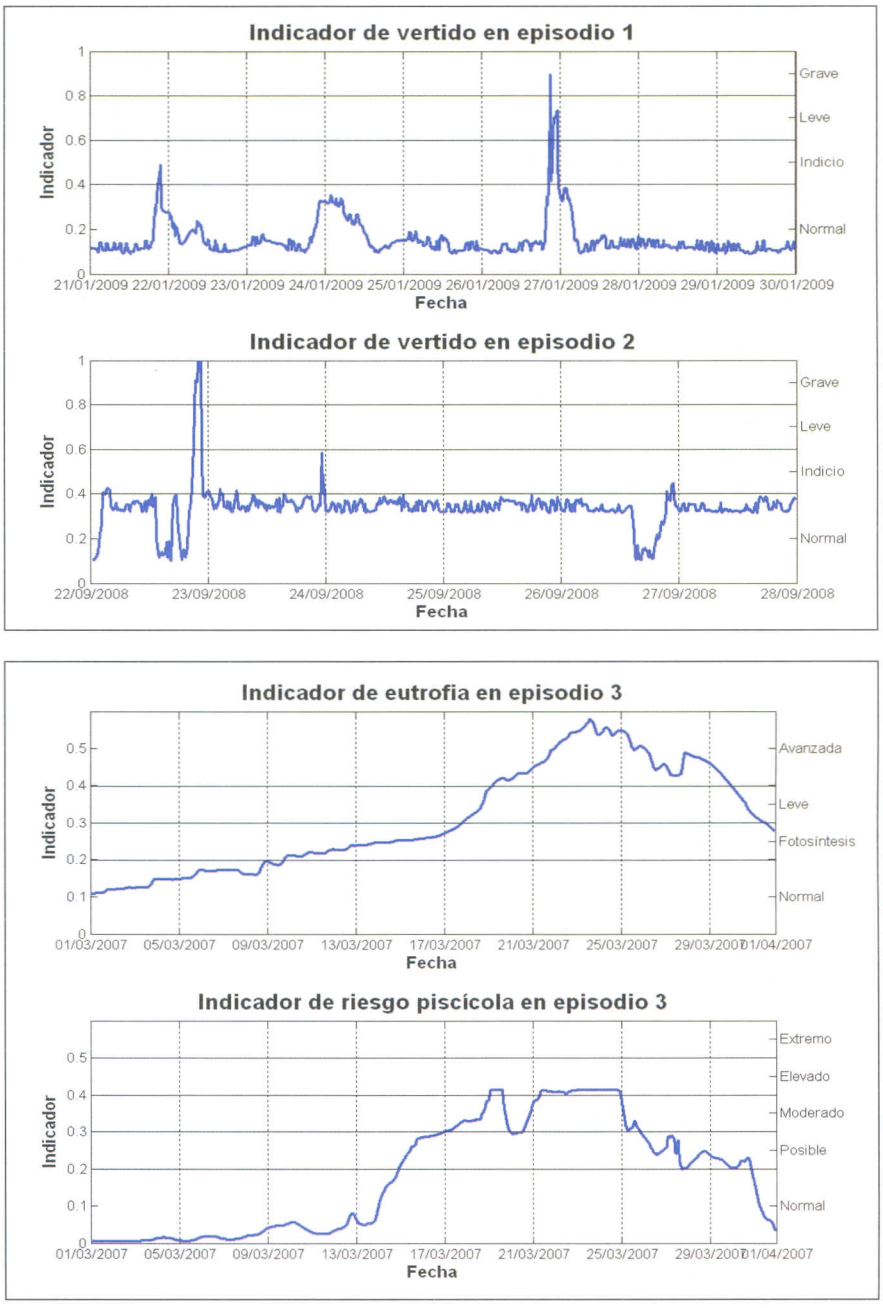


Figura 5. Indicador de vertido, eutrofia y riesgo piscícola para los tres episodios

que sepan discernir esta clase de comportamientos y contrastarlos con la realidad sobre el terreno. La creación de un sistema experto capaz de recoger esta experiencia, objetivizarla y cuantificarla, se puede realizar de forma más diáfana a través de un sistema de inferencia basado en reglas borrosas.

La figura 3 expone los dos procesos de aplicación que se han seguido para el desarrollo y calibración del sistema de inferencia, distinguiéndose una formulación automática de reglas, una vez conocidos los principios de los fenómenos, y una formulación manual.

Formulación

Como resultado del análisis de la información recogida por parte de los expertos se ha obtenido una formulación para los tres tipos de episodio a detectar. En la figura 4 se observa el esquema del algoritmo para la detección de fenómenos de eutrofia, que resulta en un valor entre 0 y 1 extraído a partir de las etiquetas "Normal", "Fotosíntesis natural", "Eutrofización leve" y "Eutrofización avanzada".

Análisis de resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de los algoritmos de cálculo de indicadores.

Vertido urbano o de EDAR

La figura 5 (arriba) expone los resultados del indicador de vertido para los episodios 1 y 2.

En el primer episodio se aprecia que el primer suceso ha sido caracterizado como indicio de vertido, mientas que el segundo lo ha sido como grave. Por otro lado, el indicador ha detectado otro posible suceso hacia el comienzo del día 24, aunque no lo suficientemente importante como para a ser considerado un indicio de vertido.

En el segundo episodio, el evento de la tarde del día 22, se detecta correctamente y se caracteriza como grave.

Los resultados obtenidos en el indicador de vertido sugieren utilizar los umbrales mostrados en la tabla 1 para caracterizar más fácilmente los episodios detectados.

Eutrofia

Tabla 1. Umbrales para el indicador de vertido

Vertido	Normal	Indicios	Leve	Grave
Rango de valores	<0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	>0,8

El indicador de eutrofia para el episodio 3 entra en un estado de fotosíntesis a partir del día 9 y crece, paulatinamente, hasta entrar en eutrofia leve hacia la mitad del periodo de estudio. En ese momento, el estado pasa rápidamente a eutrofia avanzada, donde permanece hasta el día 30. A partir de entonces disminuye progresivamente, tal como se muestra en la figura 5 (medio).

Los resultados obtenidos en el indicador de eutrofia sugieren utilizar los umbrales determinados en la tabla 2 para caracterizar los episodios detectados.

Tabla 2. Umbrales para el indicador de eutrofia

Eutrofia	Normal	Fotosíntesis	Leve	Avanzada
Rango de valores	<0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	>0,4

Riesgo piscícola

La figura 5 (abajo) muestra los resultados del indicador de riesgo piscícola para el episodio 3. El indicador entra en una situación de posible riesgo hacia la mitad del periodo de estudio, y los valores obtenidos van creciendo hasta traspasar el umbral de riesgo elevado. Sin embargo, el vertido de amonio detectado no es lo suficientemente importante como para generar una situación de peligro. A partir del día 25 los valores de riesgo disminuyen hasta llegar a una situación de normalidad.

Los resultados obtenidos en el indicador de riesgo piscícola sugieren utilizar los umbrales determinados en la tabla 3 para caracterizar los episodios detectados.

Tabla 3. Umbrales para el indicador de eutrofia

Riesgo piscícola	Normal	Posible	Moderado	Elevado	Extremo
Rango de valores	<0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	>0,5

Conclusiones

Desde el punto de vista metodológico, se han desarrollado algoritmos basados en lógica borrosa que permiten la detección e identificación de episodios de vertido urbano o de depuradoras, eutrofia y riesgo piscícola. Dichos algoritmos han sido obtenidos a partir de la extracción de la experiencia y el conocimiento de expertos en este campo, tanto en forma de caracterización de los fenómenos como en la selección de las variables a utilizar, y los han traducido en indicadores más inteligibles para los responsables de gestión medioambiental y el público en general.

El sistema experto desarrollado se basa en datos de las redes del SAICA. A partir de unas pocas variables físico-químicas registradas en continuo, el sistema experto es capaz de obtener indicadores de fenómenos de calidad de las aguas que se pueden asociar, con alta probabilidad de relación causa-efecto, a presiones antrópicas sobre el medio hídrico, como serían los vertidos urbanos o la contaminación difusa agrícola. De esta manera, las redes de medida de calidad en continuo como el SAICA, complementan las redes oficiales de muestreo manual y analítica en laboratorio, aportando información acerca de fenómenos episódicos (vertidos) o procesos continuos (eutrofia) que difícilmente serían detectables mediante muestras discretas.

Agradecimientos

Los datos de la red SAICA han sido facilitados por el Área de Calidad de las Aguas de la CHG, que también ha aportado su experiencia y conocimiento de la cuenca, necesaria para caracterizar los episodios y analizar la validez de la herramienta propuesta. Los trabajos se han desarrollado en el contexto del proyecto Ecowatch, liderado por Adasa Sistemas S.A.U. y que ha contado con ayudas para la realización de proyectos medioambientales de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, en el marco del Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales (Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007).

Bibliografía

[1] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial L 327 de 22/12/2000, págs. 1-73.

[2] Ley 62/2003, de 30 de diciembre de 2000, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social

[3] A. Serramià, Sistemas de información y de calidad de las aguas en España, Ingeniería química 420:155-158, 2005.

[4] Aplicación de técnicas de estadística avanzada orientada a la ayuda en la gestión de los datos procedentes de las diferentes redes de observación del agua en el contexto de la implantación de la directiva marco del agua (ECOWATCH) 022/SGTB/2007/6.1. BOE 287 de 30/11/2007, págs.49474-49476.

[5] John R. Vallentyne. Introducción a la limnología. Ediciones omega, 1978, p. 144.

[6] H.K. Lee et al. Fuzzy expert system to determine stream water quality classification from ecological information, Water Science and Technology 36(12): 199-206, 1997.

[7] E.V. Hatzikos et al. Monitoring water quality through a telematic sensor network and a fuzzy expert system, Expert Systems 24(3): 143-161, 2007.

[8] R. Nasiri et al. Water Quality Index: A Fuzzy River-Pollution Decision Support Expert System. Journal of Water Resources Planning and Management 133(2): 95-105, March/April 2007.

[9] E.V. Hatzikos et al. Applying adaptive prediction to sea-water quality measurements. Expert Systems with Applications 36(3): 6773-6779, 2009.