

The background of the cover is a watercolor illustration. The upper portion shows a large, multi-story building with a prominent tower and arched windows, rendered in warm, golden-yellow and brown tones. The lower portion shows a stone bridge with several arches spanning a river. The water is depicted with various shades of blue and green, and the bridge's reflection is visible in the water below. The overall style is artistic and textured.

Jia₂₀₁₅

**ACTAS DE LAS
IV JORNADAS DE INGENIERÍA
DEL AGUA**

La precipitación y los procesos erosivos

Córdoba, 20 a 23 de octubre de 2015



**ACTAS DE LAS IV JORNADAS
DE INGENIERÍA DEL AGUA**
La precipitación y los procesos erosivos

Córdoba, 20 a 23 de octubre de 2015

Editores:

María Fátima Moreno Pérez
José Roldán Cañas

ACTAS DE LAS IV JORNADAS DE INGENIERÍA DEL AGUA

Fecha de aparición: 15/10/2015

Formato: Memoria USB

Editores

María Fátima Moreno Pérez

José Roldán Cañas

ISBN: 978-84-608-3043-6

Análisis de medidas para la mejora de la calidad del agua en el tramo bajo del río Lurín (Perú)

Andrea Momblanch, Javier Paredes-Arquiola, Joaquín Andreu
*Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València,
Valencia, España*

Lia Ramos Fernández, Wilfredo Baldeón Quispe
Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Javier García Hernández
Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin, Sion, Suiza

1. Introducción

La cuenca del río Lurín es una de las más pobladas de Perú, siendo una de las principales fuentes de agua para la ciudad de Lima, la capital del país. En dicha cuenca, se dan unos índices de pobreza superiores al resto de cuencas de la vertiente del departamento de Lima. Principalmente en su tramo bajo, el río está sometido a importantes presiones derivadas de la extracción de recursos hídricos, a la descarga de aguas residuales urbanas (tratadas y sin tratar), disposición de basuras, drenajes agrícolas, así como al desarrollo industrial en general y a la minería en particular. Todo ello provoca una creciente escasez de agua y el deterioro de su calidad, lo cual revierte en el menoscabo de los ecosistemas acuáticos. Además, esta problemática se agudiza en los periodos de sequía (Momblanch et al., 2015).

Varios estudios (MA, 2003; Daw et al., 2011, WHO and CBD, 2015) indican que los impactos de la degradación de los ecosistemas afectan de una forma más directa a las poblaciones rurales y personas con bajos recursos. Este hecho acentúa la importancia de mejora de la situación ambiental del río Lurín, específicamente en lo que se refiere a la calidad del agua, con el fin de evitar problemas de la salud pública.

Los programas de control de la contaminación en la cuenca se han enfocado, hasta el momento, a la construcción de sistemas de tratamiento que disminuyan la carga de contaminantes vertidos al río desde los principales núcleos urbanos. Asimismo, se han realizado estudios de evaluación de la calidad por parte de organismos públicos (DIGESA, 2010; ANA, 2014). A pesar de que estos trabajos han mejorado la situación del río, se siguen dando concentraciones elevadas de algunos contaminantes con un elevado potencial de riesgo para la salud humana. Por tanto, se debe seguir analizando el origen de la problemática, y realizando análisis de la gestión de la cuenca que integren conceptos físicos,

químicos y biológicos, así como su evolución temporal. La modelación de la calidad del agua a escala de cuenca presenta la ventaja de incorporar de una forma dinámica las relaciones entre estos elementos y las masas de agua (Paredes et al., 2010).

Bajo estas premisas, se desarrolla el proyecto “Fortalecimiento científico e institucional para la implantación de indicadores de calidad del agua en la cuenca del río Lurín (Perú)”. Este proyecto tiene como objetivo definir los indicadores de calidad del agua más adecuados para gestionar los recursos hídricos del río Lurín, así como la construcción de un modelo de calidad del agua del tramo bajo del río Lurín para simular escenarios de actuaciones encaminadas a la mejora de la calidad del agua. Este artículo presenta los resultados preliminares obtenidos en el marco del proyecto.

2. Cuenca de estudio y calidad del agua

2.1 La cuenca baja del río Lurín (Perú)

El río Lurín nace en el Nevado Surococha en la Cordillera de los Andes y su cauce principal discurre a lo largo de 109 km hasta desembocar en el Océano Pacífico, en torno a 30 km al sur de la ciudad de Lima. De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua, la cuenca del río Lurín tiene una extensión de 1633.81 km²; la precipitación media anual en la cuenca varía espacialmente de 0 a 650 mm, lo cual genera unos recursos medios anuales de 193.63 Hm³ (ANA, 2012).

Administrativamente, la cuenca del río Lurín pertenece al departamento de Lima y abarca dos provincias (la de Lima propiamente dicha y la de Huarochiri). Comprende unas 6000 ha de tierras cultivadas, 4600 ha de lomas y abarca todos los pisos ecológicos desde 0 msnm (costa del Pacífico) hasta los 5000 msnm (planicies andinas).



Figura 1. Ciudad de Lima y río Lurín (izquierda). Cuenca del río Lurín (derecha). Fuente: Lillo Paredes y Moncloa Guardia, 2007.

2.2 Datos de calidad del agua

Los datos oficiales disponibles a través de la Agencia Nacional del Agua y la Dirección General de Seguridad Ambiental han servido para caracterizar la cuenca de forma general en cuanto a hidrología, demandas de agua y estado de la calidad del agua. Como consecuencia de este análisis, la zona de estudio se ha limitado al tramo bajo del río Lurín, debido a que en él se concentran la mayor parte de los usos del agua, así como los focos de contaminación. Se han identificado como contaminantes prioritarios los coliformes de origen humano y animal, porque pueden causar problemas potenciales de insalubridad del agua para consumo directo, de los productos agrícolas cultivados en la zona y de las zonas de baño en las playas ubicadas cerca de la desembocadura del río.

Como datos de entrada, y para la calibración y validación del modelo de calidad a escala mensual, se requieren y utilizan datos con esa misma escala temporal. Por ello, el proyecto ha incluido la realización de una campaña de muestreos para generar dicha información. Se han realizado 12 muestreos mensuales en 7 puntos del río y en 5 efluentes. La figura 2 muestra un esquema del tramo de estudio, incluyendo los puntos de muestreo de calidad del agua. Las variables cuantificadas en cada punto mediante medición *in situ* o toma de muestras y posterior análisis en laboratorio son: caudal (m^3/s), conductividad ($\mu S/m$), pH, temperatura ($^{\circ}C$), oxígeno disuelto (mg/l), DBO₅ (mg/l), sólidos totales (mg/l), *Escherichia coli* (NMP/100 ml) y coliformes totales (NMP/100 ml).

El análisis preliminar de los datos de los muestreos ha permitido identificar fuentes no controladas de contaminación por coliformes como son las aguas residuales no tratadas del Distrito de Pachacámac al sur de Lima y las escorrentías de usos ganaderos (chancherías). Para tenerlo en cuenta en la fase de construcción del modelo así como en el planteamiento de las medidas de mejora de la calidad, se ha introducido en el modelo un nuevo vertido, Pachacamac (ARD) y una fuente de contaminación difusa aguas arriba del punto de muestreo L6. Además, se ha constatado que las concentraciones en numerosos puntos del río incumplen los estándares nacionales de calidad ambiental para el agua (ECA) establecidos para los usos existentes en el tramo de estudio por el Ministerio del Ambiente de Perú.

Según las disposiciones para la implementación de los ECA (MINAM, 2008), se ha clasificado el tramo de estudio del río Lurín con Categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales), por los múltiples usos agrarios que alberga; y la desembocadura del mismo con Categoría 1.B1 (Aguas superficiales destinadas para la recreación, con contacto primario), ya que existen playas con abundante afluencia de personas (Mamacona y Campo Mar 'U'). A pesar de que no existen en el tramo de estudio tomas de demandas urbanas, debido a los índices de pobreza de la zona se contempla la posibilidad del uso directo del agua para consumo humano, por lo que también se ha considerado la Categoría 1 (Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable).

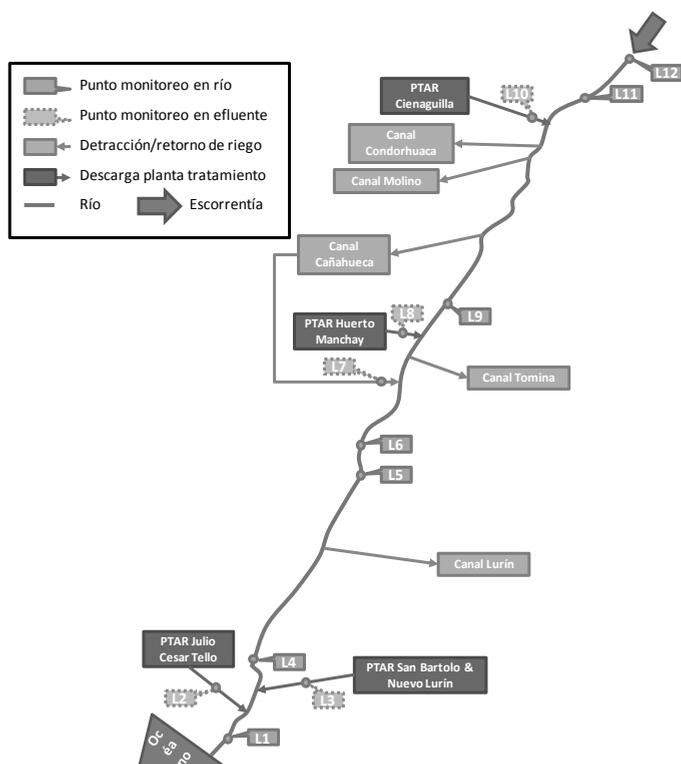


Figura 2. Esquema simplificado de los usos del agua y puntos de monitoreo del tramo bajo del río Lurín.

La tabla 1 muestra los límites para cada categoría de uso y cada contaminante definidos en los ECA. Las figuras 3, 4 y 5 muestran un resumen de los datos muestreados utilizados para la calibración y su relación con los vertidos al cauce.

Categoría ECA Contaminante	Producción de agua potable (1)	Recreación con contacto primario (1.B1)	Riego de vegetales (3)
Oxígeno disuelto (mg/l)	$\geq 4 - 6$	≥ 5	≥ 4
DBO ₅ (mg/l)	3 - 10	5	15
<i>E-coli</i> (NMP/100 ml)	No definido	Ausencia	100
Coliformes totales (NMP/100 ml)	50 - 50000	1000	5000

Tabla 1. Límites de concentración de contaminantes por tipo de uso. Fuentes: MINAM, 2008; MINAM, 2009.

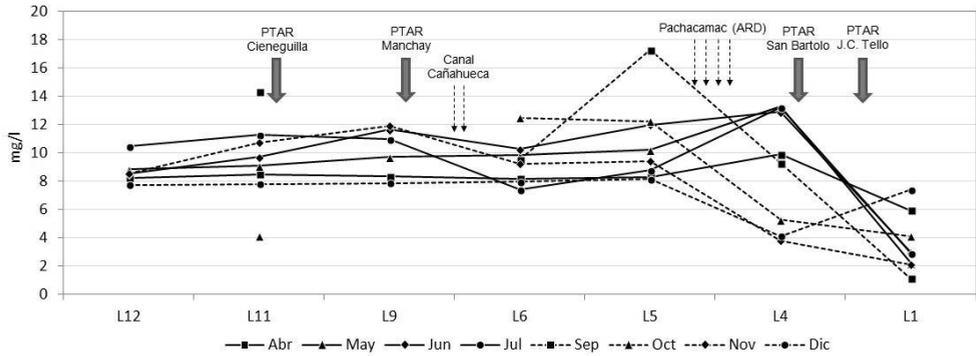


Figura 3. Evolución del oxígeno disuelto a lo largo del río Lurín.

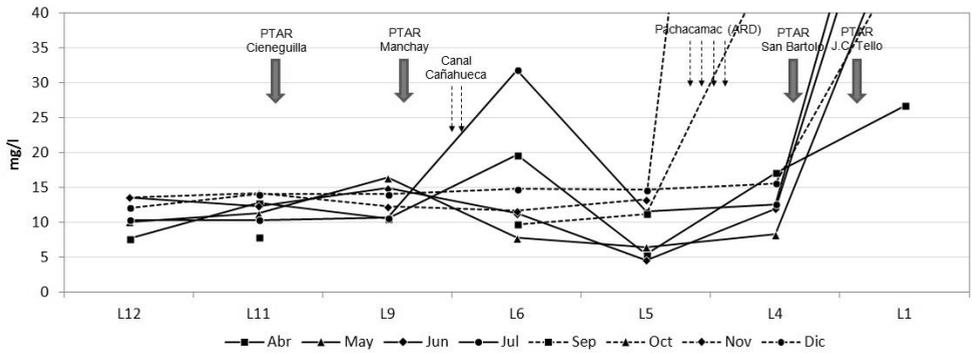
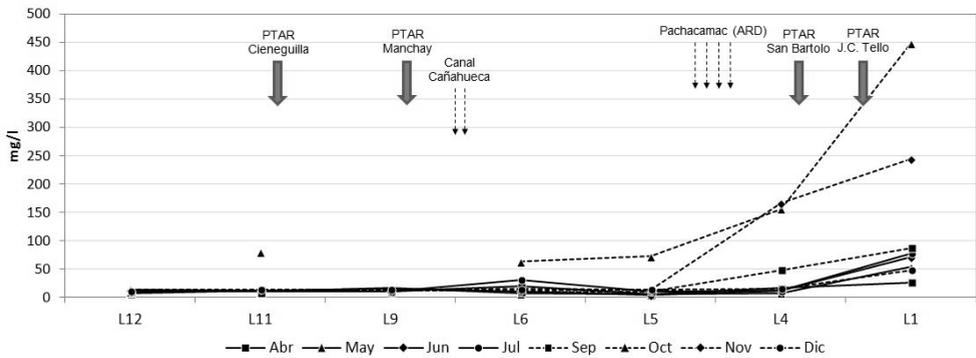


Figura 4. Evolución de la DBO₅ a lo largo del río Lurín (superior) y detalle para concentraciones inferiores a 40 mg/l (inferior).

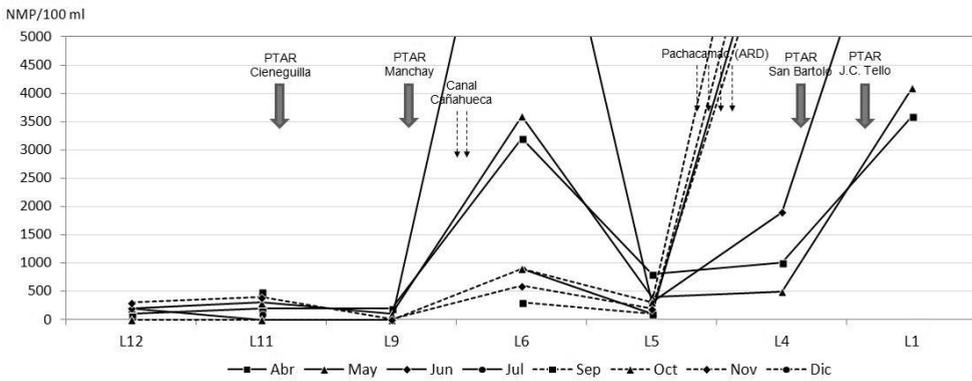
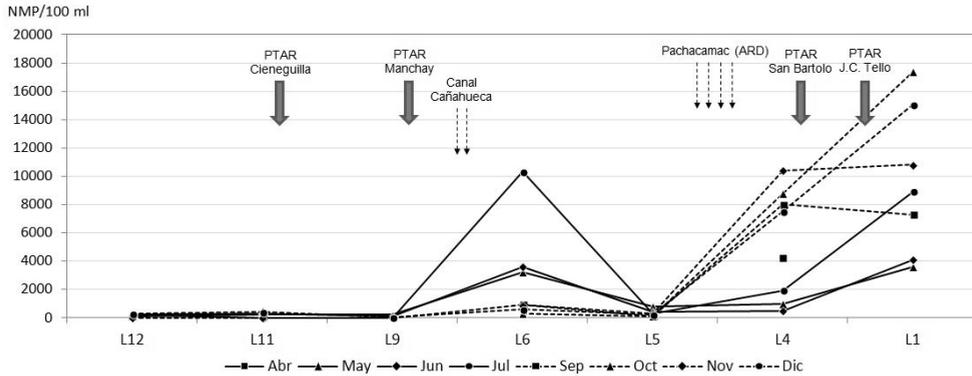


Figura 5. Evolución del *Escherichia Coli* a lo largo del río Lurín (superior) y detalle para concentraciones inferiores a 5000 NMP/100 ml (inferior).

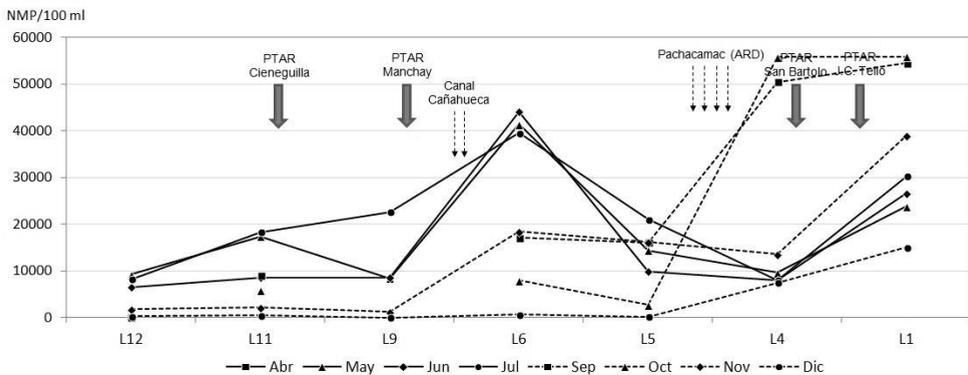


Figura 6. Evolución de los coliformes totales a lo largo del río Lurín.

3. Modelo integrado de calidad y gestión del agua

La selección de las acciones prioritarias para reducir los contaminantes seleccionados se abordará a través de la modelación y simulación de la calidad del agua. El modelo ha sido elaborado con el módulo GESCAL (Paredes et al., 2010) dentro del sistema soporte a la decisión AQUATOOL (Andreu et al., 1996). Se trata de un modelo mecanicista que simula la evolución de los contaminantes en el agua en tramos de río y embalses. Este modelo se simula conjuntamente con el modelo a escala de cuenca SIMGES (Andreu et al., 1996) para la asignación de recursos hídricos. La simulación de ambos modelos de forma conjunta permite tener en cuenta las relaciones entre la gestión y la calidad del agua de forma integrada.

En primer lugar se construye el modelo de gestión en el que se introducen los distintos elementos del sistema analizado: las demandas y sus retornos, las entradas de agua a través de la escorrentía y los tramos de río. Dado que en el tramo de estudio no existen elementos de regulación, la calibración es inmediata y únicamente consiste en validar el balance hídrico en los nudos. En los casos en los que el balance no se conservaba, se ha estudiado en detalle la relación entre las aguas superficiales y subterráneas, y se ha introducido una demanda ficticia que representa la detracción del acuífero o la escorrentía subterránea que se da en el tramo. La ecuación [1] resume el balance realizado en cada tramo.

$$Q_{FinTramo} = Q_{InicioTramo} - Captaciones + Retornos \pm Relación\ Río\ Acuífero \quad [1]$$

El siguiente paso consiste en implementar el modelo de calidad. Los datos generados en la campaña de muestreo en los 5 efluentes (L2, L3, L7, L8 y L10) y al inicio del tramo de estudio (L12) se utilizan como datos de entrada asociados a los vertidos de las Plantas Depuradoras de Aguas Residuales (PTAR) y a la escorrentía. Los parámetros necesarios para la modelación de la calidad varían según los contaminantes que se vayan a analizar. Por los motivos expuestos en los apartados anteriores, se decide modelar oxígeno disuelto, DBO₅, coliformes totales y *E-Coli*. En los tramos de río, además del transporte por advección y dispersión, se consideran otros fenómenos que modifican la concentración de los contaminantes. Para la materia orgánica se ha considerado una ley de degradación de primer orden afectada por la disponibilidad de oxígeno, y la sedimentación ([2]). El balance de oxígeno tiene en cuenta el consumo por degradación de la materia orgánica y la entrada por reaireación ([3]). Finalmente, el *E-Coli* y los coliformes totales se modelan como contaminantes arbitrarios cuya concentración se reduce siguiendo una ley de degradación de primer orden ([4] y [5]).

$$\sum S_i = -K_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + K_{d1/2}} L - \frac{VS_L}{h} L \quad [2]$$

$$\sum S_i = K_a \theta_{Ka}^{T-20} (O_{sat} - O) - K_d \theta_d^{T-20} L \quad [3]$$

$$\sum S_i = -K_{Ec} \theta_{Ec}^{T-20} Ec \quad [4]$$

$$\sum S_i = -K_{CT} \theta_{CT}^{T-20} CT \quad [5]$$

Donde: L es la concentración de materia orgánica en el río (mg/l); K_d es la constante de degradación a 20°C (días⁻¹); θ_d es la constante por corrección de la temperatura de la constante K_d ; VS_L es la velocidad de sedimentación (m/día); h es el calado (m); T es la temperatura de la masa de agua (°C); O es la concentración de oxígeno disuelto en el río (mg/l); O_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (mg/l); K_a es la constante de reaeración a 20°C (día⁻¹); θ_a es el factor de corrección por temperatura de K_a ; Ec es la concentración de *E-coli* (NMP/100 ml); K_{Ec} representa la constante de descomposición del *E-coli* a 20°C (día⁻¹); θ_{Ec} es el coeficiente por corrección de temperatura de K_{Ec} ; CT es la concentración de coliformes totales (NMP/100 ml); K_{CT} representa la constante de descomposición de los coliformes totales a 20°C (día⁻¹); θ_{CT} es el coeficiente por corrección de temperatura de K_{CT} .

Para la calibración del modelo de calidad, se deben modificar los parámetros anteriores de modo que los valores de concentración de los contaminantes simulados en el río, se ajuste a los valores observados en los muestreos de los puntos L1, L4, L5, L6, L9 y L11. De los 12 meses muestreados, 8 se han utilizado para la calibración y 4 para la validación. Actualmente el modelo se encuentra en fase de validación.

4. Escenarios de mejora

Atendiendo a la caracterización inicial y al análisis de los datos muestreados, se han definido las siguientes medidas:

- Medidas de gestión para garantizar caudales mínimos de dilución en el río: en el tramo de estudio no existen elementos de regulación, por lo que esta medida se limitará a la reducción de las extracciones por parte de las demandas agrarias a través de mejoras en las eficiencias de transporte y aplicación del riego.
- Medidas de reducción de la contaminación por vertidos:
 - o Al final del tramo de estudio se ubican las PTAR San Bartolo y Julio Cesar Tello que muestran irregularidades de funcionamiento en algunos meses. Por tanto, una de las medidas consiste en garantizar el correcto funcionamiento de las mismas.
 - o El control de los vertidos no depurados del distrito de Pachacámac se considera de suma importancia. Esta medida consiste en la construcción de una nueva PTAR o la ampliación de la PTAR Huerto Manchay que se encuentra dentro del propio distrito Pachacámac.
 - o La ordenación de usos ganaderos en el entorno del río Lurín consiste en la delimitación y control de zonas de uso ganadero y recuperación de las riberas

del río en el tramo en el que se incorporan las escorrentías, con el fin de incrementar la capacidad de retención de contaminantes.

Este conjunto de medidas, han sido presentadas a los técnicos de la Autoridad Nacional del Agua en diversas reuniones. Una vez se concluyan los trabajos de simulación, se dispondrá de información acerca del efecto de cada una de las medidas sobre la calidad del agua a lo largo del río. Esto permitirá comprobar si se cumplen los límites establecidos en los ECA, así como priorizar las medidas por su eficacia. De este modo, se asegura que los resultados proporcionan información relevante para la toma de decisiones que apoye análisis posteriores de coste-eficacia de las medidas de cara a su implantación.

5. Conclusiones

El proyecto “Fortalecimiento científico e institucional para la implantación de indicadores de calidad del agua en la cuenca del río Lurín (Perú)” ha identificado como contaminantes prioritarios en el tramo bajo del río Lurín los coliformes totales y *Escherichia coli*. Las elevadas concentraciones de los mismo, junto con el riesgo potencial de insalubridad que suponen para los usos identificados en la zona de estudio, demuestra la importancia de analizar y priorizar medidas encaminadas a la mejora de la calidad del agua.

Mediante una campaña de muestreo y el análisis exhaustivo de los datos, se han identificado las principales fuentes del problema. A través de la definición de medidas dirigidas a resolver el origen de la contaminación y su análisis con un modelo integral de gestión y calidad del agua, se generan datos útiles para apoyar la toma de decisiones por parte de los organismos responsables.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Área de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de València por su apoyo financiero a través del Programa ADSIDEO. También valoramos el apoyo proporcionado por la Maestría en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, el Doctorado de Ingeniería Ambiental y el Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Referencias

Andreu, J., J. Capilla, E., Sanchis. 1996. AQUATOOL: A generalized decision support system for water resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177: 269-291

ANA, Autoridad Nacional del Agua. 2012. Recursos Hídricos del Perú. Autoridad Nacional del Agua. Ministerio de Agricultura. República del Perú. 2da Edición, Lima (Perú)

ANA, Autoridad Nacional del Agua. 2014. Monitoreo de la calidad superficial de la cuenca del Lurín. Ministerio de Agricultura, Perú

Daw, T., K. Brown, S. Rosendo, R. Pomeroy. 2011. Applying the ecosystem services concept to poverty alleviation: the need to disaggregate human well-being. *Environmental Conservation*, 38: 370–379

DIGESA, Dirección General de Salud Ambiental. 2010. Vigilancia y Monitoreo de los Recursos Hídricos por Cuencas Hidrográficas (http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/vigilancia_recursos_hidricos_mapa.asp)

Lillo Paredes, C.C., C.E. Moncloa Guardia. 2007. Centro ecoturístico en el Caserío de Sisicaya. Tesis doctoral. Universidad Ricardo Palma, Santiago de Surco - Lima (Perú)

MA, Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. *Ecosystems and human well-being*. Island Press

MINAM, Ministerio del Ambiente. 2008. Decreto Supremo nº 002-2008-MINAM: Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Jueves 31 de julio de 2008, Lima, Perú

MINAM, Ministerio del Ambiente. 2009. Decreto Supremo nº 023-2009-MINAM: Aprueban Disposiciones para la Implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Viernes 18 de diciembre de 2009, Lima, Perú

Momblanch, A., J. Paredes-Arquiola, A. Munné, A. Manzano, J. Arnau, J. Andreu. 2015. Managing water quality under drought conditions in the Llobregat River Basin. *Science of the Total Environment*, 503-504: 300-318

Paredes-Arquiola, J., J. Andreu, M. Martín-Monerris, A. Solera. 2010. Water quantity and quality models applied to the Júcar River basin, Spain. *Water Resources Management*, 24: 2759-2779

WHO and CBD, World Health Organization and Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2015. *Connecting Global Priorities: Biodiversity and Human Health*. A State of Knowledge Review. WHO Press