

EL USO DE LOS PROGRAMAS *R* Y *EPANET* PARA LA ENSEÑANZA EN LA GESTIÓN DEL AGUA A LOS INGENIEROS

Gabriel Ibarra-Berastegi¹, Raúl Garcia-de-Arriba²

¹UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. Escuela Ingeniería Bilbao. Dpto. de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. C/ Alda. Urkijo, s/n – 48013 Bilbao. Tfno: +34 946014274. gabriel.ibarra@ehu.es

²CONFEDERACION HIDROGRAFICA CANTABRICO.. Bilbao.

Recibido: 31/Mar/2017–Revisado: 11/Abr/2017--Aceptado: 29/Jun/2017-DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES8395>

THE USE OF R AND EPANET SOFTWARE FOR TEACHING WATER MANAGEMENT TO ENGINEERS

ABSTRACT:

At Bilbao Engineering School (University of the Basque Country, www.ehu.es), our students in the last year of their studies, before becoming engineers, have the opportunity to select a block of subjects intended to enhance their knowledge on generally speaking, Fluid Mechanics. The focus of this paper is an educational experience applied to two of the subjects belonging to this stream: "Networks of Fluids" and "Management and Maintenance of Hydraulic Systems". The reason to deal jointly with the two subjects is that both are devoted to different aspects of the water cycle management. In these subjects, state-of-the-art operation and management techniques are taught to the students. Apart from the transmission of good practices and standard applied protocols, the focus is practical and is based on hands-on computer real-life exercises, which involves not only intensive programming using high-level software, but also the spatial representation of results in georeferenced formats and/or maps. The approach is therefore that of Learning by Projects (LBP). To that purpose, two main open source codes are used: EPANET and R. Students learn how to address real-life problems regarding the correct calculation of water distribution networks with EPANET while more general issues about a great deal of water management aspects are solved with R.

Both EPANET and R are open source scientific software widely used in the private sector, so by the end of the course, students have a good and practical grasp on water management problems. In their surveys, students place high value on this methodology. This learning-by-problems approach contributes to minimizing the gap between theoretical education and real-life problems for future engineers.

Keywords: R, EPANET , Water management, High Education

RESUMEN:

En la Escuela de Ingeniería de Bilbao (www.ehu.es), nuestros alumnos del último año de estudios, antes de llegar a ser ingenieros, tienen la oportunidad de seleccionar un bloque de materias destinadas a potenciar sus conocimientos del área de Mecánica de fluidos. El presente trabajo se centra en una experiencia educativa aplicada a dos de los temas pertenecientes a este flujo: "Redes de Fluidos" y "Explotación y Mantenimiento de Sistemas Hidráulicos".

La razón para tratar conjuntamente estas dos asignaturas es que ambas están dedicados a diferentes aspectos de la gestión del ciclo del agua. Aparte de la transmisión de buenas prácticas y protocolos estándar aplicados, el enfoque es práctico basado en aprendizaje por proyectos (LBP) y se basa en ejercicios prácticos en ordenador lo que implica no sólo la aplicación de programación intensiva usando software de alto nivel, sino también la representación espacial de los resultados en formatos y/o mapas georeferenciados. Para ello se utilizan principalmente dos programas de código abierto: *EPANET* y *R*. Los estudiantes aprenden cómo abordar problemas de la vida real relacionados con el cálculo correcto de las redes de distribución de agua con *EPANET*, mientras que las cuestiones más generales sobre muchos aspectos de la gestión del agua se resuelven con R.

EPANET y *R* son programas científicos de código abierto ampliamente utilizados en el sector privado, por lo que al final del curso, los estudiantes adquieren una buena comprensión práctica de los problemas de gestión del agua. En sus encuestas, los estudiantes valoran muy positivamente esta metodología. Este enfoque de aprendizaje por problemas contribuye a minimizar la brecha entre la educación teórica y los problemas de la vida real para futuros ingenieros.

Palabras clave: R, *EPANET* , Water management, High Education

1.- INTRODUCCION

La Escuela de Ingeniería de Bilbao pertenece a la Universidad del País Vasco (www.ehu.es) y es la más antigua e importante Facultad de Ingeniería de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Nuestra escuela siempre ha mantenido estrechos vínculos con los sectores industriales más dinámicos del entorno, proporcionando a sus estudiantes las habilidades que les permitirán encontrar un trabajo en los sectores de vanguardia de nuestra economía.

Desde la entrada en vigor de la reforma de Bolonia, los estudios de ingeniería en España constan de dos etapas: un grado inicial de Ingeniería (4 años) y un Master en Ingeniería (2 años adicionales). En nuestra escuela, durante los cursos iniciales de grado, los estudiantes aprenden los fundamentos de la Mecánica de Fluidos y la Máquinas Hidráulicas. Si optan por los dos años adicionales del Máster de Ingeniería, los estudiantes tienen la posibilidad de seleccionar varias intensificaciones en las que aparte de un núcleo central de asignaturas comunes, pueden recibir formación en diferentes grupos de asignaturas interconectadas denominadas intensificaciones. Una de éstas es la Intensificación Hidráulica donde tienen la ocasión de profundizar en contenidos que van desde la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) hasta la Oleohidráulica-Neumática. Entre estas asignaturas opcionales se encuentran también dos dedicadas a la gestión del agua y que son el foco de este trabajo.

La estructura general de las asignaturas en esta intensificación incluye tres partes principales. La primera incluye visitas a instalaciones operativas relacionadas con el suministro y gestión de agua, como depósitos, potabilizadoras y plantas de tratamiento de aguas residuales (Fig. 1). Una segunda parte importante es traer a los expertos de las empresas locales involucradas en la gestión del agua a las aulas para compartir su experiencia con los estudiantes. Finalmente, la tercera parte se basa en la docencia basada en aprendizaje por proyectos con ejercicios computacionales prácticos y / o experimentos de laboratorio. Aquí se anima a los estudiantes a trabajar de manera cooperativa para resolver problemas de la vida real que se les proponen. Esto implica el uso de herramientas de programación punteras. En este artículo describiremos la innovadora experiencia educativa y los resultados obtenidos en este enfoque cuando se aplican a los siguientes dos asignaturas de esta intensificación: “Redes de Fluidos” y “Explotación y Mantenimiento de Sistemas Hidráulicos.”

En la asignatura de Redes de Fluidos, los alumnos aprenden a dimensionar correctamente sistemas complejos de tuberías. En combinación con la asignatura de “Explotación y Mantenimiento de Sistemas Hidráulicos” se pueden resolver problemas como la selección óptima de diámetros de pozos y tuberías. Debido a los vínculos evidentes entre ambas asignaturas, todas las actividades docentes están estrechamente interconectadas. La interacción incluye visitas a instalaciones de tratamiento de agua y más allá de la transmisión de las buenas prácticas en la gestión del agua, los estudiantes aprenden a lidiar con problemas reales.

Esto exige que los estudiantes adquieran dos tipos de habilidades que les permitan la:

1. Solución de problemas de la vida real como el diseño correcto de tanques de abastecimiento de agua, planificación general para un área determinada y estimación de la disponibilidad de agua en varios escenarios de cambio climático. Esto implica el uso de software de programación de alto nivel como **EPANET** (<https://www.epa.gov/water-research/EPANET>) y **R** (<https://www.cran.r-project.org/>).
2. Caracterización geográfica de los recursos hídricos disponibles. Esto implica el uso de un software de sistema de información geográfica (GIS) y para ello, **R** debido a su naturaleza modular, tiene paquetes que le dotan de la funcionalidad completa de cualquier software GIS.

En este trabajo presentamos la experiencia educativa en el campo de la gestión del agua con **EPANET** y **R** en la Escuela de Ingeniería de Bilbao para estudiantes de ingeniería del último año.



Fig. 1. Bilbao Engineering School students follow the explanations before the control panel at the water treatment plant of Epele (Mondragón)

2.- MATERIALES Y METODOS

Para cuando los estudiantes ya seleccionan las asignaturas de la Intensificación Hidráulica ya han adquirido un grado suficiente de habilidades en programación y computación y por ello, ya están de alguna manera familiarizados con software de uso general como VisualBasic, Fortran o C ++. Debido a esta formación inicial, es posible que el equipo de profesores diseñe clases como un conjunto de ejercicios prácticos con software específico orientado al manejo del agua. El software que utilizamos en las clases es a) **EPANET** y b) **R**.

A. **EPANET**

EPANET ha sido desarrollado por la USEPA (<https://www.epa.gov/water-research/EPANET>). Se trata de un software de dominio público que puede ser libremente copiado y distribuido. Está diseñado para modelar sistemas de tuberías de distribución de agua y se aplica habitualmente cuando las redes de agua necesitan ser diseñadas o recalculadas. Funciona en Windows 95/98 / NT / XP y realiza simulaciones del movimiento del agua y el comportamiento de calidad dentro de las redes de tuberías presurizadas. La interfaz de usuario de Windows de **EPANET** proporciona un editor e interfaz gráfica que simplifica el proceso de construcción de modelos de red de tuberías y edición de sus propiedades y datos. **EPANET** proporciona un entorno informático integrado para editar datos de entrada. Se utilizan diversas herramientas de visualización de

datos para ayudar a interpretar los resultados de un análisis de red. Es importante señalar que **EPANET** ha resuelto de manera sencilla y eficiente el tipo de ecuaciones no lineales involucradas en la resolución de problemas complejos de redes. Antes de **EPANET** y herramientas similares, este problema solía abordarse usando métodos iterativos como Hardy-Cross con aproximaciones sucesivas a partir de un conjunto de estimaciones iniciales de las incógnitas.

B. R

R (<https://www.cran.r-project.org/>) es un software de acceso libre, que ha resultado ser una herramienta científica perfecta debido a su naturaleza modular y sus capacidades de procesamiento de datos. La razón de esto es que **R** tiene un módulo central que puede interactuar fácilmente con un número creciente de paquetes -más de 10000 para marzo de 2017- desarrollados específicamente y adoptados por una creciente cantidad de comunidades científicas que permiten a los usuarios aprovechar los avances anteriores. Debido al alto potencial de **R** los estudiantes perciben que mediante la incorporación de **R** en su programa de estudios, han obtenido acceso a una herramienta de vanguardia, poderosa y valiosa que marcará una diferencia en su carrera profesional.

R además de ser software libre, está evolucionando continuamente con mejoras en forma de nuevos paquetes. Después de que los estudiantes han aprendido a usarlo, se convertirán en miembros de esta enorme y creciente comunidad. De usuarios Además, toda la información sobre la gestión del agua y la planificación espacial asociada suele estar libremente disponible y difundida por instituciones regionales, nacionales y europeas que utilizan los sistemas de información geográfica (SIG), normalmente archivos de forma de ArcGIS. Estos archivos tienen una extensión .shp y representan el formato más popular y generalmente aceptado para proporcionar cualquier tipo de información que necesita ser georeferenciada. Por esta razón, los estudiantes necesitan leer eficazmente esta información, calcular los resultados y, finalmente, producir una representación espacial de la misma. Este tipo de habilidades son apreciadas por las empresas del sector del agua.

R proporciona una respuesta óptima a estas necesidades y desafíos combinados debido a su estructura modular. **R** tiene un módulo central y luego paquetes adicionales específicamente desarrollados para diferentes aplicaciones. Se han desarrollado paquetes como "sp", "rgeos", "rgdal", "mapas", "maptools" y "mapdata" para que **R** trabaje con funcionalidades completas como cualquier software GIS, al tiempo que exhibe todas las capacidades de cualquier software de programación.

R ha sido adoptado como un estándar por muchas comunidades científicas y el campo de la gestión del agua no es una excepción, con un número creciente de desarrollos en esta área que los últimos años.

La incorporación de **R** a las actividades docentes de la asignatura en la última edición de "Explotación y Mantenimiento de Sistemas Hidráulicos" ha representado un importante paso adelante en la formación de futuros ingenieros a la vez que les proporciona herramientas reales de gestión del agua.

Uno de los aspectos clave de **R** es que puede funcionar como una herramienta GIS completamente funcional. Dado que la mayor parte de la información del dominio público sobre las actividades de gestión del agua está georeferenciada, esta característica de **R** adquiere importancia capital. Además, uno de los paquetes más recientes llamado '**EPANETReader**' permite una conexión perfecta de **EPANET** y **R** combinando y amplificando así las posibilidades que ambos códigos exhiben independientemente.

C. Aprendizaje por problemas

Utilizando **EPANET** y **R** para introducir conceptos relacionados con las dos asignaturas mencionados anteriormente, representa para nuestros estudiantes una manera real y pragmática de resolver problemas. Simulan lo que el científico y los profesionales hacen cada día, utilizando la lógica del descubrimiento en

lugar de la lógica de la justificación [1]. Como afirma Clement [2]-3] en su profundo estudio de la creatividad científica, al tratar un problema heurísticamente no hay diferencia en cuanto a la capacidad de resolución de problemas.

3.- RESULTADOS

En esta sección, se mostrarán algunos ejemplos sobre el uso educativos de *EPANET* y R.

1. *EPANET*

Los estudiantes aprenden a implementar y resolver redes de suministro de agua (Fig. 2.3). En la Figura 2 se puede ver una vista aérea de un sector de la ciudad y la Figura 3 representa el diseño de la red de tuberías por debajo de las calles. La distribución de agua a través de la red de tuberías supone el cálculo de las presiones disponibles, las pérdidas de carga y la distribución del flujo en las uniones principales hasta que el agua sale por los grifos del consumidor final. Nuestros alumnos también aprenden cómo abordar problemas más sofisticados que implican por ejemplo la incorporación de aditivos químicos al agua en los suministros urbanos.



Fig. 2. Área de análisis

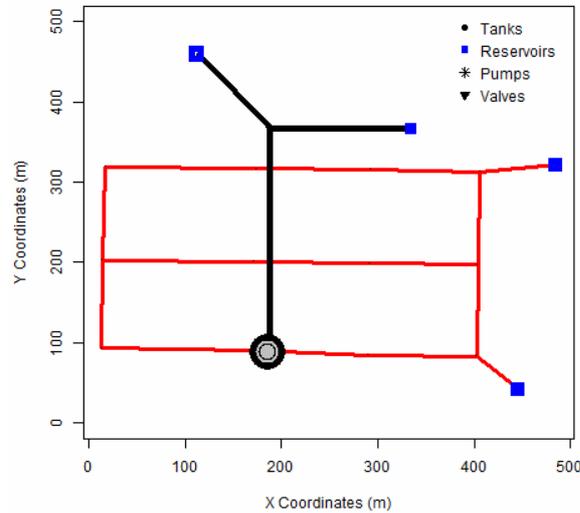


Fig. 3. Red de agua subterránea vista y resuelta con *EPANET*.

2 .R (CRAN)

Como se mencionó anteriormente, en los últimos años existe una creciente tendencia a desarrollar y utilizar más herramientas computacionales para la gestión del agua en el marco de *R* [9-14]. Todos estos trabajos, recogidos en la literatura científica, incluyen, entre otras, varias herramientas para la evaluación de recursos en el marco del cambio climático o la toma de decisiones, en la mayoría de las ocasiones en combinación con información geográficamente referenciada.

Centrándonos en el uso educativo de *R* nuestros estudiantes aprenden a leer, importar y manipular información georreferenciada de las instalaciones de agua de sitios web de instituciones públicas y en una segunda etapa, aprenden a extraer información relevante y ponerla en un mapa. Las habilidades que adquieren incluyen la estimación de la disponibilidad de agua en el marco de los escenarios de cambio climático, tal como se proporciona en el último informe AR5 y las proyecciones de los modelos CMP5 asociados. En sus ejercicios, los estudiantes aprenden a descargar datos CMIP5 de <http://climexp.knmi.nl/selectdailyseries.cgi?someone@somewhere> y procesar proyecciones climáticas hasta el año 2100. En sus ejercicios, los estudiantes estiman la disponibilidad de agua -en este caso de la Península Ibérica- en función de los escenarios climáticos fronterizos. La disponibilidad de agua puede estimarse como la diferencia entre la precipitación y la evaporación en todo el área (Figura 4). Los estudiantes aprenden a definir los límites según los escenarios (RCP 2.6, verde, fuerte reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero) y (RCP, 8.5, normal). Se puede ver que más allá de 2040 existe una fuerte diferencia entre un escenario y otro, y en cualquier caso se detecta una tendencia descendente global. Los estudiantes aprenden a evaluar la situación y las proyecciones futuras para la disponibilidad de recursos hídricos.

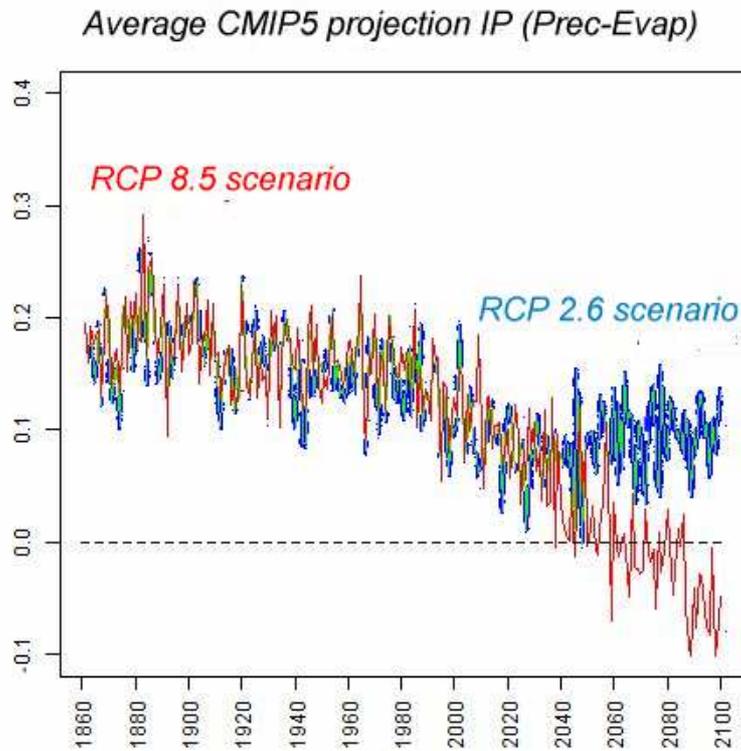


Fig. 4. Disponibilidad de agua (Precipitación-Evaporación) en la Península Ibérica. Proyecciones climáticas hasta el 2100.

En una segunda etapa, los estudiantes regionalizan las proyecciones y analizan las tendencias actuales y futuras con respecto a diferentes aspectos del ciclo del agua. El análisis de esta evolución durante los últimos 15 años ofrece una visión de qué políticas deben aplicarse en el marco del análisis conjunto de un gran número de tendencias significativas, desde el crecimiento de la población y la industria hasta el cambio climático. Esto incluye políticas de precios, inversiones futuras y estimaciones de cambios a largo plazo en la disponibilidad de agua.

Cuando se trata de abordar problemas reales, como estimar las curvas de intensidad de lluvia para un lugar determinado, obtener las curvas de extracción de un pozo, representar los límites de las cuencas hidrográficas (Fig. 5) o caracterización de las áreas de inundación asociadas a diferentes períodos de retorno en un Área urbana (Fig. 6), **R** es la herramienta perfecta.

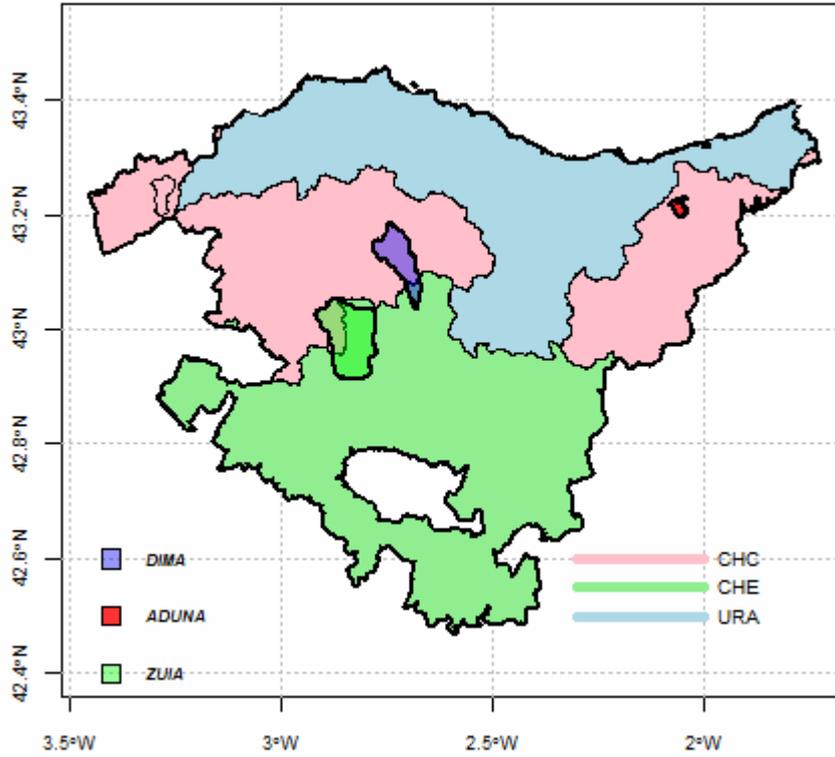


Fig. 5. Delimitación de cuencas hidrográficas en el País Vasco

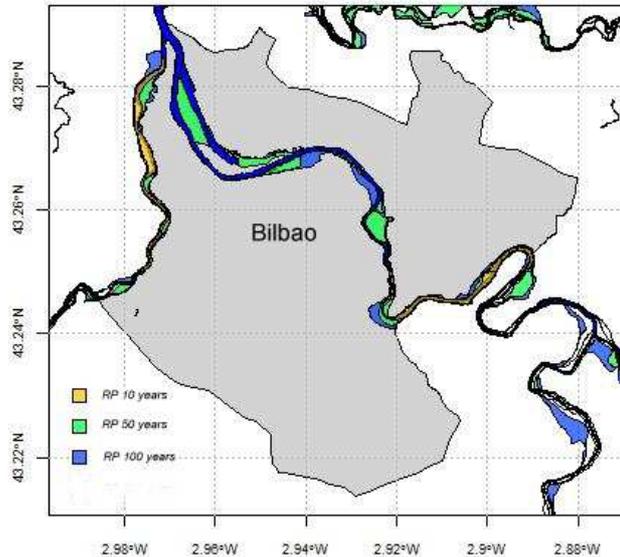


Fig. 6. Zonas de inundación correspondientes a períodos de retorno de 10-50-100 años en una zona urbana (Bilbao).

Destacar aquí que la literatura científica [9-14] indica una creciente adopción de **R** para resolver todo este conjunto de problemas relacionados con la gestión del agua. Esto no sólo se refiere al mundo académico, sino también a las empresas y al sector privado. Aunque algunas de las etapas de los ejercicios propuestos a los estudiantes se podrían resolver con otros códigos, como EXCEL y ArcGIS, **R** es el único software que con un enorme potencial educativo y profesional para futuros ingenieros, permite una interconexión completa de resultados, proporcionando así un análisis óptimo y completo de los datos.

El uso de **EPANET** permite resolver problemas relacionados con las redes de fluidos, pero en combinación con **R** el resultado es mucho más flexible y los cambios específicos y adaptaciones pueden ser diseñados por los estudiantes, más allá de la solución estándar incorporada.

El paquete **R** llamado 'EpanetReader' conecta **R** y **EPANET** y, entre otras cosas, permite manipular las salidas **EPANET** de una manera flexible. Más allá de las poderosas funciones incorporadas que se pueden encontrar en este paquete, los estudiantes pueden multiplicar su poder usando la funcionalidad que **R** proporciona para modificar y afinar las funciones incorporadas ya disponibles en 'EpanetReader.' Los aspectos más técnicos del paquete **R** 'EpanetReader.' son discutidos en un reciente artículo [15].

4.- DISCUSION

Desde la reforma de Bolonia, existe un creciente interés por incorporar más y mejores herramientas metodológicas en la Educación Superior [24-27]. Esto es también cierto para los estudiantes de ingeniería que resuelven problemas prácticos relacionados con la gestión del agua [28-29] Comparada con otras intensificaciones de nuestro Master de ingeniería, la satisfacción general de los estudiantes con la intensificación hidráulica y más particularmente con estas dos asignaturas es muy alta. Al finalizar el curso, se pasa una encuesta a los estudiantes donde pueden calificar su grado de satisfacción con los aspectos metodológicos relacionados con la asignatura. En una escala de 0 a 5 (máxima satisfacción) la tasa histórica promedio ha sido de 4,23, un nivel muy satisfactoria que anima a los profesores a seguir en esta línea. La

encuesta que se pasa a los estudiantes es la estándar de la Universidad del País Vasco e incluye la evaluación de diferentes aspectos de la metodología que reciben en el aula. Uno de los aspectos más relevantes de esta encuesta es si consideran que la metodología es apropiada y también incluye preguntas relacionadas con su propia actitud hacia las asignaturas que cursan. Los resultados muestran que los alumnos aprecian particularmente el enfoque práctico de estos temas y las competencias que adquieren. Además, todos ellos muestran una actitud tremendamente positiva .hacia las asignaturas de la intensificación.

Creemos que una gran parte de este éxito se puede atribuir a la incorporación de software de código abierto de última generación como **EPANET** y **R** y al conjunta de posibilidades a nivel académico y de investigación que se presentan ante ellos. El feedback que recibimos de nuestros alumnos -algunos de ellos ya trabajando en el sector del agua- es también muy positivo, con especial énfasis en el tipo de habilidades computacionales adquiridas en estas asignaturas

Los resultados anteriores con **R** solo [16-19] o después de aplicar esta metodología a la enseñanza de otros campos científicos [20-23] indica que el uso del software libre que se utiliza ampliamente en los problemas de la vida real debilita la rigidez del contexto de justificación a favor del descubrimiento. De esta manera, los estudiantes aprenden a resolver problemas prácticos reales mientras aprenden a manejar **EPANET** y **R**. Según nuestra experiencia, el número de horas de ambas asignaturas (50) son suficientes para desarrollar las habilidades básicas de programación para fomentar la creatividad en el aula . Este método de trabajo permite un enfoque constructivo de manera cooperativa, ya que los estudiantes trabajan juntos ayudándose mutuamente en cada momento. Además, se han desarrollado algunos proyectos de fin de máster a partir de las ideas originadas en este entorno didáctico.

La cooperación entre profesores ha permitido conectar los contenidos de ambas asignaturas mediante la conexión del software que utilizamos. Con ese propósito, hemos aprovechado las posibilidades cada vez mayores que **R** ofrece. Creemos que esta aproximación educativa que trae al campo de la gestión del agua estos instrumentos de programación de alto nivel, representa un ejemplo aplicado del aprendizaje basado en problemas, debido a su capacidad de generar y resolver muchos problemas diferentes de una manera constructiva. Este aspecto constructivo crea un ambiente de aprendizaje cooperativo. La intervención del profesor se limita a la primera parte inicial de cada clase y el resto del tiempo puede ser usado para resolver varios problemas y para plantear otros nuevos. La idea es aprender mientras se hace. Además, esta actividad constituye un trabajo fructífero para los estudiantes que se puede extrapolar y adaptar fácilmente a cualquier otro entorno de aprendizaje.

En el aula, hacemos una translación directa de los problemas a que se enfrentan los expertos en sus actividades técnicas cotidianas. En nuestras clases, los estudiantes usan herramientas y elementos de última generación aplicados por esos mismos expertos. También hay que mencionar que los rapidísimos cambios y mejoras en las nuevas herramientas representan un gran desafío para el equipo de profesores que necesitamos seguir muy de cerca los desarrollos metodológicos que se producen y así incorporarlos en nuestras clases. Esto subraya la necesidad de mantener y afianzar vínculos estrechos con las empresas que trabajan en este campo, así como un seguimiento sistemático de los últimos avances en la literatura científica. En nuestra opinión, este enfoque metodológico es lo que estimula la motivación de nuestros estudiantes y su confianza creativa, que ofrece muchas claves educativas para la planificación futura basadas en la resolución de problemas y la simulación de lo que hacen los expertos. Dos aspectos adicionales que contribuyen al éxito de estas dos asignaturas es que debido a su carácter opcional, son los propios estudiantes quienes optan por matricularse, haciendo la interacción entre los estudiantes y también con el profesor mucho más fructífera.

Una gran ventaja de usar **R** es que, entre otras cosas, es también una herramienta de programación de alto nivel con capacidades de visualización gráfica muy potentes. Esta es la razón por la cual, tal como se recoge en la literatura mencionada anteriormente [9-14], el conjunto de problemas relacionados con la gestión del agua y que se resuelven con **R** está en continuo crecimiento. Nuestros estudiantes también usan **R** para

resolver problemas específicos desde cero. Por ejemplo, en las plantas de tratamiento de aguas residuales, el flujo entrante se mide generalmente usando un canal de Parshall. El caudal se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q [m^3/s]=0.3726B[H/0.3048]^{(1.56986B^{0.026})}$$

Siendo B la anchura del canal y H la profundidad del flujo entrante. Debido a la alta proporción de sólidos suspendidos en el flujo entrante, no se pueden usar caudalímetros convencionales y el flujo entrante a una planta de aguas residuales se calcula habitualmente de esta manera.

Otro ejemplo es el uso de Hazen-Williams, una expresión semi-empírica para calcular las pérdidas de carga (H_f) en redes de suministro de agua para un diámetro dado (D), longitud de tubo (L), con C adoptando diferentes valores dependiendo del material de que la tubería está hecha

$$H_f[mca] = 0.002131L(100/C)^{1.85} Q^{1.85} D^{-4.8655}$$

Un ejemplo adicional sería el cálculo exacto de DBO y DQO en instalaciones de tratamiento de aguas residuales que, tras la realización del experimento de laboratorio, debe ser procesado de acuerdo con la legislación española RD 11/1995 de 28 de diciembre. **R** permite también un cálculo completo de estos parámetros, acercando así el mundo de la educación y las actividades comerciales o industriales [28 - 30].

Cuando se enfrentan a este tipo de desafíos prácticos en el aula, y siendo su último año antes de convertirse en ingenieros, nuestros estudiantes no se focalizan en la calificación final que obtendrán sino que se centran en el aprendizaje y la adquisición de competencias. Obtienen su calificación final como resultado de un proceso, en el cual bajo las condiciones mencionadas anteriormente, los profesores podemos estar continuamente evaluándolos. Los resultados son muy satisfactorios ya que típicamente obtienen una nota entre 8 y 9 cuando en la escala universitaria española la escala varía de 0 a 10. Una gran parte del éxito se debe a las interacciones continuas entre los estudiantes y con los profesores mientras resuelven los problemas reales planteados. Un resultado positivo inesperado de esta metodología de trabajo es que los estudiantes aprenden a implementar exitosamente el trabajo en equipo y las estrategias de cooperación.

Todo esto requiere un esfuerzo continuo por parte de los profesores para incorporar nuevos contenidos y adaptar rápidamente el plan de estudios de una manera totalmente flexible. Esta línea de trabajo se aplica en el área de Mecánica de Fluidos desde las asignaturas más fundamentales [29]. Para el equipo de profesores todo esto representa un desafío importante ya que nuestras asignaturas están evolucionando todo el tiempo, pero la retroalimentación que recibimos de los estudiantes y las empresas que los contratan, es muy positiva y tiene en nosotros un efecto alentador para seguir trabajando en esta línea.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hanson, N. R. (1958). The logic of discovery. The Journal of Philosophy, 1073-1089. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2022541>
- [2] Clement, J. (1988). Observed methods for generating analogies in scientific problem solving. Cognitive Science, 12(4), 563-586. DOI: http://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog1204_3
- [3] Clement, J. (2008). Creative model construction in scientists and students: The role of imagery, analogy, and mental simulation. Springer Science & Business Media. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6712-9>
- [4] Chi, M. T., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. Cognitive science, 5(2), 121-152. DOI: http://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0502_2
- [5] Chi, M. T., Bassok, M., Lewis, M. W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. Cognitive science, 13(2), 145-182. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0364-0213\(89\)90002-5](http://dx.doi.org/10.1016/0364-0213(89)90002-5)
- [6] T. M. Duffy, J. Lowyck, & D. H. Jonassen. 1993. Designing environments for constructive learning. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-78069-1.

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

Gabriel Ibarra Berastegi, Raul Garcia de Arriba

- [7] Simons, P. R. J. 1993. Constructive learning: The role of the learner. In *Designing environments for constructive learning* (pp. 291-313). Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-78069-1.
- [8] Newell, A., & Simon, H. A. (1973). Human problem solving. *American Journal of Psychology*, 86, 2, pp. 449-455. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/1421456>
- [9] Jeffery S. Horsburgh, Stephanie L. Reeder, 2014. Data visualization and analysis within a Hydrologic Information System: Integrating with the R statistical computing environment, *Environmental Modelling & Software*, 52, pp 51-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.016>.
- [10] Sarah Whateley, Jeffrey D. Walker, Casey Brown, 2015. A web-based screening model for climate risk to water supply systems in the northeastern United States, *Environmental Modelling & Software*, 73, pp. 64-75, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.001>.
- [11] Robert M. Hirsch, Stacey A. Archfield, Laura A. De Cicco, 2015. A bootstrap method for estimating uncertainty of water quality trends, *Environmental Modelling & Software*, 73, pp. 148-166, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.017>.
- [12] David Hadka, Jonathan Herman, Patrick Reed, Klaus Keller, 2015. An open source framework for many-objective robust decision making, *Environmental Modelling & Software*, 74, pp. 114-129, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.014>.
- [13] S.W.D. Turner, S. Galelli, 2016. Water supply sensitivity to climate change: An R package for implementing reservoir storage analysis in global and regional impact studies, *Environmental Modelling & Software*, 76, pp. 13-19, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.007>.
- [14] Bivand. R., 2011. <http://rsf.r-forge-project.org/>
- [15] Becker, R.A., eta A. R. Wilks, 1995. Constructing a Geographical Database. AT&T Bell Laboratories Statistics Research Report [95.2].
- [16] Gilleland, E., 2012. <https://www.ral.ucar.edu/~ericg/softextreme.php>
- [17] Pavel Michna and with contributions from Milton Woods, 2016. RNetCDF: Interface to NetCDF Datasets. R package version 1.8-2. <https://CRAN.R-project.org/package=RNetCDF>
- [18] Ibarra Berastegi, G., 2016. Teaching water management to future engineers: Using R to blend programming needs and GIS. pp. 230 - 236. *New Perspectives In Science Education* ISSN 2420-9732, ISBN 978-88-6292-705-5
- [19] Ibarra Berastegi, G., Sáenz Agirre, J., Ezcurra Talegon, A., 2009. Linking high education and research using free software: Two experiences with R. *WSEAS Transactions on advances in Engineering Education*. pp. 70 - 75. 07/2009. ISBN 978-1-96047-402-5. WOS:000268848000010.
- [20] Ulazia Manterola, A., Ibarra Berastegi, G., 2015. *Itsas Energia irakasten R-rekin*. EKAIA. 28, pp. 1 - 13. ISSN 0214-9001
- [21] Ulazia Manterola, A., Ibarra Berastegi, G., 2016. Teaching marine energy with R. pp. 2231 - 2231. ISBN 978-84-608-5617-7 (INTED 2016)
- [22] Antxustegi, M, Maria Gonzalez, Urresti, A., Alvaro Campos, Alain Ulazia, Ibarra-Berastegi, G. (2016) Teaching renewable energies using free software: a case study with R applied to ocean energy. pp. 8696 - 8702. ISSN 2340-1117, ISBN 978-84-608-8860-4. EDULEARN 2016 8TH International Conference on Education and New Learning Technologies
- [23] Bradley J. Eck, 2016. An R package for reading **EPANET** files, *Environmental Modelling & Software* 84, 2016, pp 149-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.027>.
- [24] Garmendia-Mujika, M., Aginako, Z., Garmendia, A., Solaberrieta-Mendez, E., 2016. Students' evaluation of active and traditional teaching methodologies in the EUITI-BILBAO. *DYNA*, 91, 6, pp. 629-633. <http://dx.doi.org/10.6036/7869>
- [25] Quevedo-Blasco, R., Buela-Casal, G., 2017. Influence of the implementation of the european higher education area on engineering and architecture university teachers. *DYNA*, 92, 3, pp. 333-338. <http://dx.doi.org/10.6036/8045>
- [26] Buil-Fabrega, M., Aznar-Alarcon, J., Galiana, J., 2016. Entrepreneurship skills and its relation with the academic background: have students coming from engineering studies more entrepreneurial skills than the ones coming from social sciences?. *DYNA*, 91, 2, pp. 134-135. <http://dx.doi.org/10.6036/7774>
- [27] Ayala-Álvarez, F.J., Blázquez-Parra, E.B., Montes-Tubío, F., 2017. Presentation of 3D contents: from classroom to job. Usability and influence in spatial ability. *DYNA*, 92, 2, pp. 137. <http://dx.doi.org/10.6036/8236>
- [28] Argudo-Garcia, J., Molina-Moreno, V., Leyva-Diaz, J., 2017. Valorization of sludge from drinking water treatment plants. a commitment to circular economy and sustainability. *DYNA*, 92, 1, pp. 71-75. <http://dx.doi.org/10.6036/8024>
- [29] Ibarra-Berastegi, G.; M. Rodriguez; A. Elias; J. Caamaño. *Las máquinas hidráulicas y de fluidos a lo largo de la Historia*. *DYNA* LXXII-4. MAYO 1997. pp. 9 - 14. 1997.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad del País Vasco según proyecto EOLO-GIU14/03 y por el Vicerrectorado de Estudios de Grado e Innovación (UPV/EHU) SAE/HELAZ, PIE 2015/17-43.