

La vulnerabilidad de los sistemas denominados de infraestructura crítica (IC), entre ellos los sistemas de distribución de agua potable (SDAP), ha sido uno de los temas de investigación de gran relevancia durante las últimas décadas, particularmente enmarcado en un contexto de peligro y/o amenaza. En general, los sistemas de IC proveen servicios esenciales para la sociedad actual. La seguridad, el crecimiento económico y el bienestar social de un país pueden verse comprometidos cuando alguno de esos sistemas es dañado, deshabilitado o interrumpido en su funcionamiento. Además de los accidentes y fallos característicos de los SDAPs, ciertos peligros y amenazas extraordinarios, tales como desastres naturales o actos relacionados con violencia a diferentes niveles, han generado un interés creciente entre gestores, tomadores de decisiones, ingenieros y la sociedad en general.

El abastecimiento de agua potable es uno de los servicios fundamentales para el desarrollo de una ciudad y la calidad de vida de los ciudadanos. Sin embargo, un SDAP tiene propiedades que lo hacen especialmente vulnerable en comparación con otros sistemas. La interrupción total o parcial del suministro de agua por un período de tiempo, causa graves efectos en los usuarios y en el resto de sistemas que dependen de él.

Debido a su importancia como infraestructuras, los SDAPs han sido un objetivo especialmente atrayente para ataques maliciosos, específicamente, posibles eventos de contaminación intencional. Este tipo de sucesos ha puesto de manifiesto las debilidades de estos sistemas y la necesidad de establecer medidas de prevención y mitigación que mejoren su seguridad, evitando que la salud de los usuarios sea afectada.

En la literatura se pueden encontrar diversos métodos para evaluar, prevenir y mitigar aspectos asociados a la vulnerabilidad de las ICs. Entre ellos se encuentra el enfoque de la teoría de redes complejas, basada en las técnicas de la teoría de grafos, que ha sido ampliamente utilizado, entre otros fines, para obtener parámetros relacionados con la estructura y conectividad de los elementos de una IC, para identificar los elementos más importantes, y para analizar el impacto en el funcionamiento del sistema debido a la eliminación de uno o más elementos. Investigaciones recientes han demostrado la validez de estas técnicas para la evaluación de la vulnerabilidad de redes de diversa clase y, particularmente, de las redes de distribución de agua (RDAs). Mediante la abstracción de la RDA a un grafo con características especiales (donde los arcos son las líneas hidráulicas y los vértices son los puntos de consumo) es posible cuantificar sus atributos estructurales, facilitando su análisis a un nivel de detalle más preciso, incluida la división en sectores.

Esta tesis doctoral surge de la motivación de abordar este tema y de enfocarlo en la identificación y prevención de eventos de fallo en la calidad del agua. El estudio se centra en el análisis de la RDA que, por la ordenación y exposición de los diferentes elementos que la componen, es la parte más vulnerable de todo el sistema. Bajo el marco conceptual de la teoría de redes, se cuantifican atributos como la robustez y redundancia de la estructura de la RDA. Además, se utiliza el algoritmo evolutivo multiagente *Agent Swarm Optimization* (ASO) para identificar los lugares óptimos para ubicar sensores de monitorización de la calidad del agua, como una medida de vigilancia preventiva de cara a un evento de contaminación intencional o accidental. Al medir continuamente parámetros de la

calidad del agua, entre ellos la conductividad, el pH, la concentración de diferentes sustancias y otros parámetros relacionados, directamente desde la red, una red adecuada de estos sensores ayudará a las empresas de distribución de agua a detectar la intrusión de contaminantes y a evaluar los problemas de calidad en sus redes. Decidir dónde colocar los sensores en la red y cuántos de ellos deben colocarse es un problema difícil de enfrentar, debido a la naturaleza de los objetivos que implica. Los objetivos contemplados en este trabajo son: el tiempo de detección, el volumen de agua contaminada consumida, el fallo de detección y los costes de implementación. Esta tesis presenta una forma de resolver el problema mencionado mediante la hibridación de la teoría de redes y el enfoque multiobjetivo del algoritmo ASO. Con la teoría de redes, se busca una aproximación a la búsqueda de soluciones posibles, reduciendo así el espacio de búsqueda. Con el algoritmo evolutivo multiobjetivo ASO más que una única solución precisa, la idea es encontrar un amplio espacio de soluciones que representen la mejor compensación entre todos los objetivos considerados en el problema.

Para esto, se toma como antecedente las propuestas de Gutiérrez-Pérez et al. (2017, 2012 y 2013) y Herrera et al. (2011a, 2012), en las que se demuestra la efectividad del uso de algoritmos – poco comunes en el campo de los SDAPs – como son el *PageRank* (Brin and Page, 1998a) y otras medidas interesantes en teoría de grafos. Asimismo, la tesis se fundamenta en los trabajos de Izquierdo et al. (2008), Montalvo (2010) y Montalvo et al. (2014) sobre el diseño de redes de abastecimiento con algoritmos evolutivos, específicamente con ASO.

Finalmente, la contribución principal de esta tesis es una metodología que ayude a las empresas de agua a establecer redes de monitoreo para detectar y estimar con rapidez posibles fallos en la calidad del agua, y que dé soporte a la toma de decisiones y a la mejora de la seguridad. Para demostrar el funcionamiento de la metodología propuesta, se presenta un caso de estudio referido a una red real, con el que se demuestran las posibilidades del acoplamiento de las técnicas propuestas. El resultado es un conjunto de posibles redes de sensores de calidad del agua, obtenido mediante un estudio *a priori* basado en el preproceso desarrollado a partir de la teoría de redes. Este conjunto es, posteriormente, ampliado y optimizado bajo el enfoque multiobjetivo de ASO, de modo que presente una cantidad suficiente de soluciones no dominadas de la frontera de Pareto del problema multiobjetivo estudiado. El fin último es dotar a los gestores del abastecimiento de una herramienta para seleccionar, mediante una toma de decisiones adecuada, aquella solución que mejor satisfaga, no solo los requerimientos técnicos y económicos, sino otros menos objetivables que puedan existir.