



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

División de Ingenierías
Campus Guanajuato

Diseño de Distritos de Medición en Redes de
Distribución de Agua Mediante un Enfoque de
Estructura Centro-Periferia

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

Doctor en Ciencia y Tecnología del Agua

PRESENTA

Rair Solis Jácome

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José de Jesús Mora Rodríguez

CODIRECTORES

Dr. Daniel Hernández Cervantes

Dr. Manuel Herrera Fernández

Marzo de 2026

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del acompañamiento y la colaboración de distintas personas e instituciones, cuyo apoyo fue fundamental a lo largo de su desarrollo.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, el **Dr. José de Jesús Mora Rodríguez**, por su orientación, disposición y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron de manera decisiva al desarrollo y consolidación de este trabajo. Asimismo, agradezco a mis codirectores de tesis, el **Dr. Manuel Herrera** y el **Dr. Daniel Hernández Cervantes**, quienes brindaron la orientación académica necesaria para la realización del trabajo.

De igual manera, expreso mi agradecimiento a los miembros del comité tutorial de evaluación, conformado por el **Dr. Bruno Brentan**, el **Dr. José Antonio Arciniega** y la **Dra. Xitlali Delgado**, por sus observaciones y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, lo cual contribuyó de manera significativa a fortalecer su calidad científica y metodológica.

De manera especial, agradezco a la **Universidad de Guanajuato**, así como a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el respaldo institucional brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco profundamente a mis padres, **Alejandro Solis Rosas** y **Christian Jácome Baizabal**, por el apoyo incondicional, la comprensión y el aliento constante a lo largo de todo este proceso formativo, así como por el respaldo personal que hizo posible la culminación de esta etapa académica.

Contenido

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.2	ANTECEDENTES.....	13
1.2.1	DISTRITOS DE MEDICIÓN	13
1.2.2	ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE DMAS: TÉCNICAS HEURÍSTICAS	15
1.2.3	IMPACTOS HIDRÁULICOS Y OPERATIVOS DE LOS DMAS	22
1.3	HIPÓTESIS	26
1.4	OBJETIVOS.....	27

CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

2	METODOLOGÍA	30
2.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS RDAS: REPRESENTACIÓN MEDIANTE GRÁFICAS	32
2.2	ESTRUCTURA CENTRO-PERIFERIA.....	41
2.3	DETECCIÓN DE ESTRUCTURA COMUNITARIA: <i>ALGORITMO FAST-GREEDY</i>	57
2.4	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN: <i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION</i>	63

CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

3	CASO DE ESTUDIO TEÓRICO DE LA RDA MODENA	69
3.1	DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ENJAMBRE	81
3.2	DESCOMPOSICIÓN DEL PROBLEMA Y OPTIMIZACIÓN POR DMAS INDIVIDUALES	84
3.3	ANÁLISIS DE LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL ESPACIO DE BÚSQUEDA	87

CAPÍTULO IV: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4. DESCRIPCIÓN DE REDES DE AGUA TEÓRICAS	96
4.1 RESULTADOS DE LAS OPTIMIZACIONES	99
4.2 ANÁLISIS DE LAS OPTIMIZACIONES	106

CAPÍTULO V: CASO DE ESTUDIO REAL RDA SIMAPAG

5. CARACTERÍSTICAS DE LA RDA SIMAPAG.....	110
5.1 AJUSTE DE MODELO HIDRÁULICO	113
5.2 DETECCIÓN DEL CENTRO URBANÍSTICO.....	120
5.3 DETECCIÓN DEL CENTRO HIDRÁULICO	128
5.4 DETECCIÓN DEL CENTRO TOPOLÓGICO.....	130
5.5 ESTRUCTURA DE LOS DMAS: DETECCIÓN DE COMUNIDADES.....	134
5.6 OPTIMIZACIÓN DE LAS FRONTERAS DE LOS DMAS	138
CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	146
RECOMENDACIONES.....	149
PROYECCIÓN Y DESARROLLO FUTURO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	151
REFERENCIAS	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura ideal de una RDA segmentada en DMAs. Fuente: Bui, Kang & Marlim (2020).....	14
Figura 2. Gráfica no dirigida y su matriz de adyacencia simétrica A	33
Figura 3. Gráfica dirigida y su matriz de adyacencia no simétrica A	34
Figura 4. Modelo hidráulico de la RDA teórica M1.....	36
Figura 5. Gráfica de la RDA M1 generada mediante MATLAB.	38
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología de sectorización de RDAs.....	41
Figura 7. Gráfica con ECP ideal: estrella.	43
Figura 8. Gráfica de RDA foss_poly_1.	49
Figura 9. Valores de IC en gráfica foss_poly_1.	50
Figura 10. Peso de los nodos en la gráfica foss_poly_1.	51
Figura 11. Sub-gráfica del centro de foss_poly_1: (a) ECP ideal; (b) Considerando dos clases de nodos, centrales y periféricos; (c) incorporando una semiperiferia.	53
Figura 12. Gráfica foss_poly_1: clases de nodos.	54
Figura 13. Valores de correlación r entre la gráfica foss_poly_1 y una gráfica con ECP ideal.	55
Figura 14. Gráfica dividida en comunidades. Fuente: Castellano & Fortunato (2012).	62
Figura 15. Modelo hidráulico de RDA Modena.	70
Figura 16. Pesos de los nodos en la gráfica Modena: perspectiva topológica.	71
Figura 17. Pesos de los nodos en gráfica Modena: perspectiva hidráulica.	72
Figura 18. Sub-gráficas periféricas de la red Modena: (1) ponderación hidráulica; (2) ponderación topológica.	73
Figura 19. Comunidades en gráfica Modena bajo perspectiva hidráulica: (a) tres comunidades; (b) cuatro comunidades.....	74
Figura 20. Comunidades en gráfica Modena bajo perspectiva topológica: (c) tres comunidades; (d) cuatro comunidades.....	75
Figura 21. DMAs en RDA Modena bajo perspectiva hidráulica: (a) tres DMAs; (b) cuatro DMAs.	76

Figura 22. DMAs en RDA Modena bajo perspectiva topológica: (c) tres DMAs; (d) cuatro DMAs.	77
Figura 23. Número de interacciones vs mejor solución: caso (a).	90
Figura 24. Número de interacciones vs mejor solución: caso (b).	91
Figura 25. Número de interacciones vs mejor solución: caso (c).	92
Figura 26. Número de interacciones vs mejor solución: caso (d).	93
Figura 27. Casos de estudio teóricos: (1) Exnet; (2) RuralNetwork; (3) ky2; (5) wolf-initial-fig.	97
Figura 28. Sectorización de caso de estudio de validación (1) Exnet.	102
Figura 29. Sectorización de caso de estudio de validación (2) RuralNetork.	103
Figura 30. Sectorización de caso de estudio de validación (3) ky2.	104
Figura 31. Sectorización de caso de estudio de validación (4) wolf-initial-fig.	105
Figura 32. Modelo hidráulico de la RDA SIMAPAG.	111
Figura 33. Presiones máximas y mínimas en el modelo hidráulico original y el modelo hidráulico ajustado.	119
Figura 34. Capa de sectores de la red SIMAPAG.	121
Figura 35. Zona norte de la ciudad de Guanajuato y ubicación de los inmuebles catalogados.	124
Figura 36. Polígono principal.	125
Figura 37. Gráfica SIMAPAG: zona central desde la perspectiva urbanística.	127
Figura 38. Gráfica SIMAPAG: zona central desde la perspectiva hidráulica.	129
Figura 39. Gráfica SIMAPAG: peso de nodos desde la perspectiva topológica.	131
Figura 40. Nodos principales bajo perspectiva topológica.	133
Figura 41. Estructura de los DMAs: (1) Sectores SIMAPAG; (2) ECP Hidráulica; (3) ECP Topológico.	136
Figura 42. Zona central: (1) ECP Hidráulica; (2) ECP Urbanística.	137
Figura 43. DMAs en RDA SIMAPAG ajustada: (a) ECP Hidráulica; (b) ECP Urbanística.	143
Figura 44. Presiones en los modelos hidráulicos optimizados: (a) ECP Hidráulica; (b) ECP Urbanística.	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de adyacencia de la RDA M1.	37
Tabla 2. Grado y centralidad de los nodos de la gráfica de la red experimental.	39
Tabla 3. Características de los DMAs en RDA Modena.	78
Tabla 4. Estructura de <i>Simxn</i> del caso (d).	83
Tabla 5. Comparación entre optimización conjunta e individual.	85
Tabla 6. Mejores soluciones obtenidas para diferentes intervalos del parámetro de inercia w	88
Tabla 7. Características de los casos de estudio empleados para complementar el ajuste de la metodología.	98
Tabla 8. Resultados de las optimizaciones en los casos de estudio teóricos de validación de la metodología.	99
Tabla 9. Tipo y número de componentes las RDAs Modena y SIMAPAG.	112
Tabla 10. Cantidad de elementos de RDA SIMAPAG original y RDA SIMAPAG ajustada.	115
Tabla 11. Resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo Fast-Greedy en la gráfica SIMAPAG.	134
Tabla 12. Resultados de la optimización de la RDA SIMAPAG ajustada y de los casos de validación.	139
Tabla 13. Costo de las válvulas respecto al diámetro.	139

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano de las ciudades constituye un reto permanente en la gestión del servicio de agua potable, que depende del correcto funcionamiento de múltiples elementos dinámicos interconectados. En la práctica, es común que la estructura de las Redes de Agua (RDAs) sea desordenada debido a que son el reflejo de la implementación de soluciones a corto plazo para atender el aumento de la demanda, por lo que se han vuelto complicadas de gestionar. Dada la importancia de asegurar el suministro de agua a los usuarios es menester optimizar el funcionamiento de RDAs cuya complejidad crece sustancialmente con la aceleración de la urbanización.

En años recientes, se ha incrementado el uso de técnicas numéricas eficientes para apoyar las labores de control y gestión por parte de las entidades gestoras del servicio de agua. Este avance ha dado lugar al desarrollo de una línea de investigación científica enfocada en la optimización de las RDAs mediante su segmentación física en Distritos de Medición, comúnmente denominados como DMAs por las siglas en inglés de *District Metered Areas*, los cuales corresponden a subregiones aisladas dentro de la RDA, delimitadas mediante el uso de válvulas y medidores de flujo.

La técnica de los DMAs ofrece múltiples ventajas en la gestión de las redes, dentro de las cuales destacan la facilitación en la cuantificación de los caudales de agua que circulan por la red, el incremento en el control de la presión y por ende la reducción de fugas, así como en el monitoreo de la calidad del agua, entre otras. Bajo dichas consideraciones, a lo largo

de este documento se profundiza en los fundamentos para desarrollar un nuevo enfoque de diseño de DMAs basado en el enfoque de Estructura Centro Periferia (ECP), y su aplicación en distintas RDAs, teóricas y un caso real.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Distritos de Medición

De acuerdo con Morrison *et al.* (2007) los DMAs se introducen por primera vez en 1985 en el informe *Report 26 Leakage Control Policy & Practice*, escrito por la Asociación de Autoridades del Agua, WAA por las siglas en inglés de *Water Authorities Association* de Inglaterra. En dicho reporte se describe a los DMAs como subáreas de la RDA delimitadas por Válvulas de Aislamiento (VAs) que permiten mejorar la cuantificación de los volúmenes de agua de alimentación y de consumo dentro de ellos (WAA, 1985). En esencia, la conformación de los distritos consiste en la segmentación física de la red en subáreas, este proceso es usualmente denominado como sectorización.

La Fig. 1 muestra el esquema de una RDA sectorizada abastecida por una fuente de agua, la cual se conecta a la red de distribución a través de una línea de conducción principal. De esta línea se derivan las tuberías de distribución y los nodos asociados, que representan los puntos de consumo. En un escenario de sectorización ideal, la línea de conducción principal permanece siempre abierta, y a partir de ella se derivan las tuberías que suministran agua a los DMAs, que cuentan con una única línea de alimentación mientras que las tuberías de frontera entre distritos se cierran mediante el uso de VAs. Nótese que la RDA está aclimatada con un medidor de flujo aguas abajo de la fuente de abastecimiento con el fin de cuantificar el volumen de inyección a la misma, al igual que en las tuberías de alimentación de los

distritos, las cuales permiten dar un mayor seguimiento al volumen de agua que entra a cada uno. En contraste, en RDAs no segmentadas en distritos, es complejo identificar con exactitud cómo se distribuye el caudal en la red.

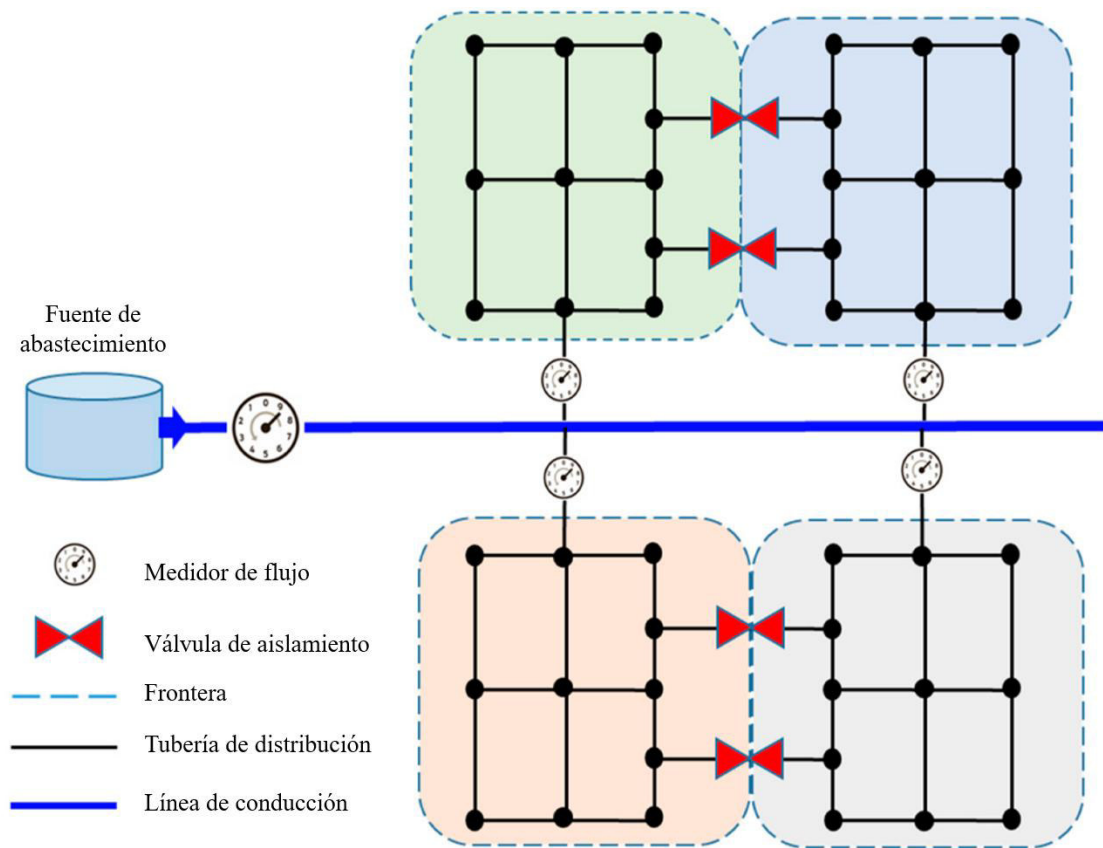


Figura 1. Estructura ideal de una RDA segmentada en DMAs. Fuente: Bui et al. (2020).

Una etapa esencial en la conformación de los DMAs es la selección de los nodos y tuberías que los integran, proceso que se basa principalmente en la similitud de ciertas características, tales como la elevación, la calidad del agua, el diámetro de las tuberías, la antigüedad de los

elementos y el valor de la demanda, entre otros. Por otra parte, algunos métodos incorporan criterios propios de la segmentación, como el número de válvulas disponibles, el número máximo de tomas domiciliarias por distrito o la reducción de costos. Adicionalmente, en ciertos enfoques se consideran aspectos no tangibles, pero igualmente relevantes, como la conservación del rendimiento hidráulico (resiliencia), el control de la presión y el monitoreo de la calidad del agua.

1.2.2 Estrategias de Diseño de DMAs: Técnicas Heurísticas

En diversas áreas del conocimiento, incluida la hidráulica, la necesidad de los tomadores de decisiones de identificar la mejor forma posible de resolver problemas ha impulsado el desarrollo de técnicas heurísticas, mediante las cuales se busca encontrar la mejor solución a un problema dentro de un conjunto de posibilidades, dicho conjunto es conocido como población (Foulds, 1983). De acuerdo con Ruggiero (1995), las técnicas heurísticas son métodos basados en la experiencia que permiten producir soluciones razonables a problemas formulados mediante la construcción de modelos matemáticos. En dichos modelos se introducen supuestos simplificadores, en ocasiones cuestionables, que facilitan la optimización del proceso de búsqueda de soluciones dentro de la población (Silver, 2004; Dantzig *et al.*, 1997). Bajo este enfoque, las posibles soluciones de los problemas se formulan mediante relaciones matemáticas, de modo que cualquier solución que satisfaga dichas relaciones se considera una alternativa válida (MirHassani *et al.*, 2019). Gestal (2013)

señala que, para identificar el mejor elemento dentro de una población, es necesario definir una función de ajuste cuyo objetivo es evaluar sistemáticamente los valores de entrada del modelo matemático y calcular el valor de ajuste, o bondad, de cada solución.

Las técnicas heurísticas han demostrado ser una poderosa herramienta para diseñar los DMAs, debido a que dada la gran cantidad de combinaciones en las que se puede agrupar a los nodos dentro de los distritos y la extensa variedad de configuraciones de los elementos de frontera, la cantidad de diseños de la RDA segmentada en distritos es sumamente elevada. Dentro de ese contexto, las técnicas heurísticas permiten simplificar la búsqueda del mejor diseño de los DMAs. A continuación, se presentan algunos trabajos de investigación en los que se han aplicado estas técnicas para el diseño de DMAs, haciendo énfasis en los criterios de diseño que son evaluados por las funciones de ajuste y su relación con la presente investigación.

Diao *et al.* (2013) proponen una metodología que emplea el concepto de Estructura Comunitaria (EC), bajo el cual se considera que los nodos se organizan en grupos densamente conectados. Los grupos que exceden el número máximo de nodos se descomponen para garantizar un tamaño adecuado de los distritos. El enfoque de EC será empleado en este trabajo; por ello, en el apartado 2.3, *Detección de Estructura Comunitaria: algoritmo Fast-Greedy*, se describe con mayor profundidad. Barret *et al.* (2014) proponen un método que considera un enfoque topológico para minimizar el número de válvulas de frontera y un enfoque hidráulico para mantener los requerimientos mínimos de presión, así como maximizar la similitud de elevación de los nodos dentro de los distritos, en este trabajo

se emplea un método de detección de EC que busca minimizar el número de fronteras entre DMAs.

Di Nardo *et al.* (2017) proponen una metodología que prioriza la preservación del rendimiento hidráulico de la RDA, al tiempo que minimiza el número de tuberías de frontera con el objetivo de reducir los costos de inversión, mediante el uso de algoritmos basados en la Teoría de Gráficas, algoritmos de partición multinivel y algoritmos de detección de EC. Tal como en el trabajo desarrollado por Di Nardo *et al.* (2017), en la presente investigación también se busca minimizar el número de tuberías de frontera entre DMAs al mismo tiempo que se resguarda el rendimiento hidráulico de la RDA bajo el enfoque de ECP.

Ostfeld *et al.* (2017) presentan un método en el cual la estructura de los distritos se determina con base en la preservación de la edad del agua, la cual es una medida indirecta de la calidad del agua que considera el tiempo que esta tarda en llegar a los nodos desde las fuentes de abastecimiento incluyendo el periodo en que permanece dentro de las tuberías antes de ser consumida (Kanakoudis *et al.*, 2020). En una primera etapa, cada nodo se considera como un grupo individual, evaluándose de manera sistemática la edad del agua hasta alcanzar el caso en el que todos los nodos pertenecen a un único grupo. Si bien en el trabajo desarrollado por Ostfeld *et al.* (2017) no se emplea el término “comunidad”, los grupos hacen referencia al mismo concepto. En la presente investigación, también se considera el caso donde los nodos son agrupados en los DMAs con base en sus características físicas e hidráulicas.

Brentan *et al.* (2017) realizan un análisis multiobjetivo considerando indicadores como la resiliencia, la similitud de la demanda y la presión dentro de los distritos, la conservación de

la edad del agua, la reducción de los costos de instalación de los elementos de frontera y del consumo eléctrico. El método emplea algoritmos de detección de EC para determinar la estructura de los distritos y, en una segunda etapa, se analiza el comportamiento de estos de manera parcial y completamente aislada. En el presente trabajo, la metodología de diseño de DMAs también se divide en etapas, entre las que se incluye la detección de EC y posteriormente la optimización de las variables hidráulicas. Iglesias *et al.* (2018) presentan un método en el que los distritos son abastecidos por agua inyectada desde una planta de tratamiento de aguas residuales. En dicho enfoque, las tuberías se clasifican en principales y de distribución (secundarias), y las válvulas únicamente pueden instalarse en las tuberías secundarias, como en el escenario ideal mostrado en la Fig. 1. Bajo estas restricciones, se define la estructura óptima de los distritos evaluando la conservación de la presión mínima requerida y la distribución equitativa de la demanda de agua entre ellos. Al igual que en el trabajo desarrollado por Iglesias *et al.* (2018), en este trabajo los componentes de la RDA son clasificados en principales y secundarios, empleando el enfoque de ECP.

Behzadian *et al.* (2018) diseñan distritos en RDAs de gran extensión para las temporadas de lluvia y sequía. El método consiste en realizar un análisis preliminar de las características clave de los componentes de la red, tales como los niveles de los tanques y la ubicación y el estado de las válvulas. Posteriormente, los nodos se agrupan dentro de los distritos con base en la similitud de la demanda de agua y de la presión; finalmente, se ajustan los parámetros de los componentes de la RDA para satisfacer las nuevas condiciones de operación. Bajo el enfoque de ECP, en este trabajo se pretende minimizar el número de fronteras cerradas entre de DMAs para reducir los impactos negativos en las temporadas de sequía. Berglund *et al.*

(2018) llevan a cabo un análisis geoespacial para el agrupamiento de los nodos, en el cual se minimiza la variación de la demanda de agua entre distritos, al tiempo que se limita el número de tuberías de suministro. La metodología busca cumplir con las restricciones de presión máxima y mínima, así como conservar la edad del agua y los niveles de los tanques. Al igual que en el trabajo desarrollado por Berglund *et al.* (2018), en este trabajo se emplea un análisis geoespacial para realizar el agrupamiento de los nodos.

Zhang *et al.* (2017) aplican el algoritmo *BORG Multi-Objective Evolutionary Algorithm* para identificar las tuberías de frontera entre distritos mediante una optimización multiobjetivo, en la cual se minimiza su número y se uniformizan la presión y la edad del agua dentro de los distritos. El método de DMAs con enfoque ECP busca preservar la edad del agua, como en el trabajo descrito previamente. Bianchotti *et al.* (2021) emplean el algoritmo metaheurístico *Spider Monkey Optimization-Based Scheduling Algorithm*, especializado en optimización multiobjetivo, para analizar el número de componentes hidráulicos requeridos para aislar los distritos, considerando índices de desempeño como la desviación estándar, empleada como medida de la dispersión de la demanda de agua entre comunidades; el coeficiente de Gini, empleado como medida de la desigualdad en el número de nodos dentro de los distritos; y un índice de resiliencia que evalúa la capacidad del agua para encontrar rutas alternativas cuando la RDA es segmentada. El enfoque de ECP busca preservar las rutas de agua entre los DMAs. Ciaponi *et al.* (2016) desarrollan un algoritmo de optimización de DMAs basado en la Modularidad, en el cual se identifican las tuberías de transmisión o principales, cuyo diámetro supera un umbral específico de la RDA estudiada, a las que se conectan los distritos conformados por las tuberías restantes. El concepto de Modularidad

también será empleado en este estudio, por lo que se describe con mayor profundidad en el capítulo 2.3, *Detección de Estructura Comunitaria: algoritmo Fast-Greedy*.

Abraham *et al.* (2017) llevan a cabo una optimización multiobjetivo mediante el algoritmo *Agent Swarm Optimization* para modificar las fronteras de los distritos durante la estación de sequía, con el fin de satisfacer la demanda de agua requerida, garantizar su calidad y cumplir con las restricciones de presión bajo condiciones de operación estrictas. Shekofteh *et al.* (2023) diseñan DMAs funcionales bajo condiciones hidráulicas críticas, en las cuales se busca conservar el suministro de agua con niveles adecuados de presión y calidad mediante la aplicación del algoritmo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*. Al igual que en los trabajos desarrollados por Abraham *et al.* (2017) y Shekofteh *et al.* (2023) los DMAs con enfoque ECP pretenden preservar el rendimiento hidráulico de las RDAs mediante la clasificación de sus elementos en principales y secundarios.

Con base en los estudios previamente analizados, es posible inferir que los DMAs constituyen una técnica de gestión de RDAs que aporta múltiples ventajas orientadas a asegurar un suministro de agua adecuado a los usuarios. Además de los beneficios descritos a lo largo de los trabajos referenciados en esta sección, Bui *et al.* (2020) señalan que los distritos también contribuyen a mejorar aspectos como la identificación de fugas, la protección frente a contaminantes y la caracterización de los patrones de demanda. Asimismo, Fanner *et al.* (2007) indican que los métodos enfocados en el control de la presión en las RDAs, como su segmentación en DMAs, han demostrado ser confiables tanto en la prevención de pérdidas de agua por fugas como en la mitigación de los niveles existentes,

los cuales pueden ser medidos con base al indicador conocido como como Eficiencia Física, (E_f).

$$E_f(\%) = \frac{V_c}{V_s} * 100 \quad [1]$$

La eficiencia física, E_f , se refiere a la conservación del agua dentro del sistema de distribución. Como se indica en la Ec. [1], corresponde al cociente, expresado en porcentaje, entre el volumen de agua consumido por los usuarios (V_c) y el volumen de agua suministrado a la RDA (V_s) (Comisión Nacional del Agua-CONAGUA, 2009). Este indicador refleja en gran medida la capacidad del sistema de abastecimiento para entregar agua a los usuarios, así como la magnitud del volumen de fugas existentes, que depende directamente de la presión en las RDAs, por lo que, si la presión en las redes es controlada adecuadamente, la eficiencia física incrementa.

Por otra parte, el aumento de la eficiencia física tiene efectos directos sobre la eficiencia económica, energética e institucional, por lo que su mejora representa una estrategia integral para elevar el rendimiento global de las entidades gestoras del servicio de agua. En este contexto, la implementación de DMAs ha demostrado ser altamente benéfica para la gestión de las RDAs, al facilitar el control operativo, la reducción de pérdidas y el monitoreo del desempeño hidráulico. Debido a estas ventajas, en el presente estudio se profundiza en el

análisis de los DMAs con el objetivo de proponer una nueva técnica orientada a mejorar su diseño y su aplicación en RDAs.

1.2.3 Impactos Hidráulicos y Operativos de los DMAs

Hasta ahora se han descrito las bondades de los DMAs; no obstante, la segmentación de las RDAs puede generar efectos no favorables en el comportamiento hidráulico. Para aislar los distritos entre sí es necesario instalar válvulas, específicamente Válvulas de Aislamiento (VAs), las cuales interrumpen el flujo de agua entre distintos puntos de la red. Sin embargo, la reducción del flujo conlleva una disminución de la presión, por lo que la instalación de VAs puede provocar descensos desproporcionados de este parámetro, hasta alcanzar valores inferiores a los estándares establecidos por la normatividad para garantizar un suministro adecuado a los usuarios. Por ello, como se describirá con mayor profundidad en la sección 2.2, *Estrategias de Diseño de DMAs: Técnicas Heurísticas*, los investigadores consideran favorables aquellos diseños de DMAs que mejor conservan la presión mínima de operación, en particular cuando la resiliencia de las RDAs resulta adecuada ante situaciones críticas de operación, como las horas de consumo máximo o las épocas de sequía.

Cuando se interrumpe el flujo en las tuberías el agua tarda más tiempo en llegar a los nodos de consumo ya que debe buscar rutas alternativas. Esto genera pérdidas por fricción significativas y, en consecuencia, reduce la resiliencia de las RDAs (Sharma *et al.*, 2023). Brentan *et al.* (2017) reportan que la segmentación física de las RDAs conlleva pérdidas en

la calidad del agua debido a que esta permanece por mayor tiempo dentro de las tuberías. Además, dicha segmentación puede ocasionar problemas de suministro en zonas periféricas y durante situaciones de emergencia. Con la finalidad de reducir los efectos no favorables derivados de la segmentación de las RDAs, Todini (2000) introduce un índice para evaluar la resiliencia de las RDAs. Este índice se calcula con base en la demanda mínima de agua requerida en los nodos y su elevación, así como en el caudal de llegada y el número de reservorios. Por su parte, Bianchotti *et al.* (2021) proponen una variación de dicho índice que incorpora consideraciones asociadas a la hora de demanda máxima de agua. Otros autores como Herrera *et al.* (2024) introducen el concepto de *District Informed Areas*. Esta propuesta constituye una alternativa a los DMAs tradicionales que incorpora sensores para definir subáreas virtuales bajo monitoreo constante en lugar de realizar particiones físicas con el objetivo de reducir los efectos intrínsecos derivados de la segmentación de las RDAs, como el incremento en la edad del agua.

En las investigaciones realizadas por Dini *et al.* (2016); Ostfeld *et al.* (2017); y Algarvio *et al.* (2021), la edad del agua se considera un parámetro sustituto de la calidad del agua que en ocasiones se incorpora en problemas de optimización, a pesar de que no existen valores de referencia ni funciones de ajuste estándar aplicables a cualquier caso de estudio.

La edad del agua constituye un buen indicador de la calidad del agua, ya que los riesgos biológicos y químicos que pueden ocasionar problemas de salud se generan o se agravan cuando el agua presenta tiempos elevados de residencia en las tuberías (Rossman, 2000). Dichos riesgos se asocian con el decaimiento del cloro en el agua, lo cual puede conducir a

rebotes microbiológicos y a la formación de subproductos de la desinfección (Brentan *et al.*, 2021). Kanakoudis *et al.* (2020) consideran que la disminución de la calidad del agua se atribuye a factores como la velocidad del flujo, la composición química del agua y las sustancias transportadas junto con ella, las cuales pueden introducirse a través de los orificios de las fugas, que pueden reducirse con la técnica de los DMAs. No obstante, Kanakoudis *et al.* (2020) señalan que al particionar las RDAs en distritos el agua tiende a envejecer en mayor medida, ya que un mayor número de tuberías conduce a la formación de callejones sin salida. En estos puntos, de acuerdo con Dias *et al.* (2017), el agua se estanca en lugar de circular como lo haría en una red sin distritos. Es por ello que mediante el enfoque de ECP se busca evitar la instalación de VAs en zonas primordiales de la red, con la finalidad de mitigar los efectos adversos de los DMAs, entre los que se incluye el incremento de la edad del agua. Kanakoudis *et al.* (2020), tras analizar una RDA bajo los escenarios (a) RDA sin DMAs, (b) RDA con DMAs y (c) RDA con DMAs y válvulas reductoras de presión, concluyen que en el escenario (a) la edad del agua alcanza su valor más bajo, mientras que la demanda de agua es la más alta. En contraste, en el escenario (c) la edad del agua presenta su valor más alto y la demanda su valor más bajo. Lo anterior indica la existencia de una relación directa entre la presión y la edad del agua, por lo que al diseñar los DMAs resulta necesario conservar valores de presión adecuados, lo cual puede conseguirse mediante el enfoque de DMAs bajo el enfoque de ECP.

Algarvio *et al.* (2021) analizan la edad del agua en dos RDAs previamente particionadas en DMAs y establecen relaciones entre la concentración de cloro en el agua y la edad del agua en los nodos. Sus resultados demuestran que, para estimar correctamente los valores de edad

del agua, las funciones de ajuste deben ser específicas para cada caso de estudio. Zhang *et al.* (2017) realizan una optimización de las fronteras de los DMAs en dos etapas. La primera se enfoca en uniformizar la presión dentro de los distritos, mientras que la segunda se orienta a uniformizar la edad del agua. En el caso de estudio analizado, los autores identifican un total de 43 DMAs. En seis de ellos la edad del agua se conserva, en 23 disminuye y en 14 la edad aumenta.

Con base en los trabajos descritos previamente se concluye que la conservación de la edad del agua depende de condiciones particulares de cada caso de estudio. En este sentido, cuando no se dispone de información detallada sobre los procesos de decaimiento de la calidad del agua, resulta prioritario asegurar que la presión se mantenga dentro de los límites establecidos. A partir del análisis de los efectos favorables y adversos asociados a la sectorización de las RDAs, la presente investigación propone el desarrollo de una metodología para el diseño de DMAs bajo el enfoque de ECP. Este enfoque busca aprovechar las ventajas de dicha técnica de gestión, al mismo tiempo que se atenúan los efectos adversos inherentes a su implementación.

1.3 HIPÓTESIS

Los DMAs constituyen una técnica de gestión que aporta beneficios significativos en la administración de las RDAs, principalmente por el incremento en el control de una variable fundamental como la presión. Cuando ésta no se regula adecuadamente, se generan impactos negativos en la red, entre los que se incluyen el aumento de pérdidas de agua por fugas, el consumo adicional necesario para compensarlas y el incremento de los costos asociados a la reparación de tuberías. En este contexto, la aplicación de un enfoque de ECP en el diseño de los DMAs permite aprovechar las ventajas de dicho esquema, al facilitar la implementación de proyectos de sectorización de las RDAs en subregiones más manejables y técnicamente viables, al mismo tiempo que se preserva la continuidad del suministro en las áreas estratégicas para el funcionamiento de la red.

1.4 OBJETIVOS

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se plantean los siguientes objetivos.

Objetivo General

Diseñar DMAs bajo el enfoque de ECP en RDAs teóricas y en la RDA real de SIMAPAG de la ciudad de Guanajuato, Gto., mediante la integración de modelos hidráulicos desarrollados en EPANET y el método heurístico *Particle Swarm Optimization*, implementados mediante algoritmos computacionales en el entorno de programación MATLAB.

Objetivos específicos

1. Desarrollar e implementar en RDAs teóricas un algoritmo de detección de ECP considerando dos escenarios de análisis, ECP hidráulica y ECP topológica, así como un tercer escenario de ECP urbanística aplicado al caso de estudio real.
2. Implementar un algoritmo de detección de estructura comunitaria en las subredes periféricas derivadas del enfoque ECP de los casos de estudio.
3. Optimizar las fronteras entre DMAs en RDAs teóricas mediante un algoritmo heurístico.
4. Preparar y calibrar el modelo hidráulico de la RDA real de SIMAPAG para su posterior optimización.
5. Aplicar la metodología completa de diseño de DMAs con ECP al caso de estudio real de la RDA SIMAPAG.

6. Evaluar las bondades y las áreas de oportunidad de los DMAs propuestos.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

2 METODOLOGÍA

La estrategia metodológica del presente trabajo se estructura en distintas etapas, cuya ejecución requiere del uso de diversas herramientas tecnológicas. Dado que las RDAs se componen mayoritariamente de infraestructura subterránea, su modificación implica obras civiles de alto costo y tiempos de ejecución prolongados. Por esta razón, en la práctica actual, los análisis hidráulicos se realizan mediante programas de modelación hidráulica. Estos modelos constituyen representaciones físico matemáticas de sistemas que involucran fluidos y permiten simular y predecir el comportamiento del agua bajo diferentes condiciones de (Coelho *et al.*, 2006). En el caso de las RDAs, los programas de modelación permiten representar tanto los elementos que conforman la red como las interacciones que surgen a partir de las condiciones de simulación. De este modo, dentro de un modelo hidráulico de una RDA es posible analizar componentes que se agrupan en dos categorías principales: los nodos, que representan las fuentes de abastecimiento, los tanques, los nodos de consumo y los nodos de conexión; y los enlaces, que representan las tuberías, las bombas y las válvulas.

El presente trabajo se desarrolla mediante el uso de EPANET 2.2, desarrollado por la EPA, un programa informático que permite simular el comportamiento hidráulico de redes de tuberías presurizadas y que ha demostrado ser una herramienta eficaz para la investigación y la mejora en la comprensión de la dinámica de los componentes de las RDAs (Shang *et al.*, 2023). Dado que las RDAs dependen de múltiples elementos dinámicos interconectados, presentan una elevada sensibilidad ante cualquier modificación en su configuración. En este

contexto, la amplia gama de configuraciones posibles hace necesario el empleo de herramientas computacionales avanzadas. De este modo, la modelación hidráulica se vincula estrechamente con algoritmos matemáticos basados en principios evolutivos, los cuales permiten identificar soluciones robustas frente a los desafíos que enfrentan los sistemas de abastecimiento de agua.

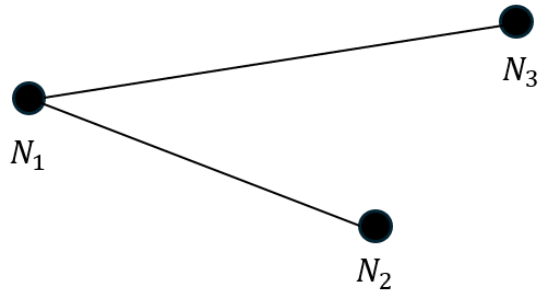
De acuerdo con Goldberg (1989), los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda de soluciones inspirados en los mecanismos de la selección natural. Gestal (2013) los describe como técnicas adaptativas empleadas principalmente en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, fundamentadas en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto. En este sentido, el desarrollo metodológico de la presente investigación se apoya en la integración de herramientas de modelación hidráulica y técnicas computacionales implementadas en MATLAB, orientadas a ejecutar las distintas fases de la propuesta metodológica, las cuales se describen de manera progresiva a lo largo del documento. Asimismo, se emplea la herramienta EPANET-MATLAB-Toolkit, que permite realizar simulaciones hidráulicas en MATLAB a partir del código fuente de EPANET. Esta herramienta facilita la representación de las características hidráulicas y físicas de las redes mediante matrices y arreglos numéricos, lo que contribuye a un análisis más eficiente y sistemático.

2.1 Análisis Estructural de las RDAs: Representación Mediante Gráficas

Además del rendimiento hidráulico, la geometría de las RDAs desempeña un papel fundamental en el diseño de los DMAs. En algunas metodologías de diseño de distritos se asume que, debido a la propia estructura de las RDAs, existe una subdivisión implícita de los nodos en grupos, los cuales pueden identificarse mediante herramientas de análisis de redes complejas. De acuerdo con la Teoría de Gráficas, una red o gráfica (G) se define como un sistema complejo tal que $G = (N, E)$, donde N representa el conjunto de nodos y E el conjunto de enlaces que los conectan (Barthelemy, 2011).

Barabási (2013) señala que la estructura de una gráfica puede describirse mediante la matriz de adyacencia A , la cual se construye a partir de la información de conectividad entre sus nodos. Considerando un nodo de origen i y un nodo de destino j , el elemento $A_{i,j} = 1$ indica la existencia de un enlace desde i hacia j ; en caso contrario, $A_{i,j} = 0$. De este modo, la matriz de adyacencia presenta una dimensión $A_{n \times n}$, donde n es el número de elementos.

La Fig. 2 muestra la matriz de adyacencia A correspondiente a una gráfica teórica compuesta por tres nodos: N_1 , N_2 y N_3 .



(a)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(b)

Figura 2. Gráfica no dirigida y su matriz de adyacencia simétrica A .

La Fig. 2 (a) muestra la estructura de la gráfica, mientras que la Fig. 2 (b) presenta la matriz de adyacencia A correspondiente a dicha gráfica. En gráficas no dirigidas, como la ilustrada en la Fig. 2 (a), si existe una trayectoria desde un nodo fuente hasta un nodo objetivo, también existe una trayectoria en sentido inverso. En consecuencia, si $A_{i,j} = 1$, entonces $A_{j,i} = 1$, por lo que la matriz de adyacencia es simétrica. Además, si la gráfica no presenta bucles, es decir, nodos con enlaces hacia sí mismos, la diagonal principal de A se compone exclusivamente de valores cero, como ocurre en las gráficas que representan a las RDAs. Por otra parte, también se consideran las gráficas dirigidas, como se muestra en la Fig. 3.

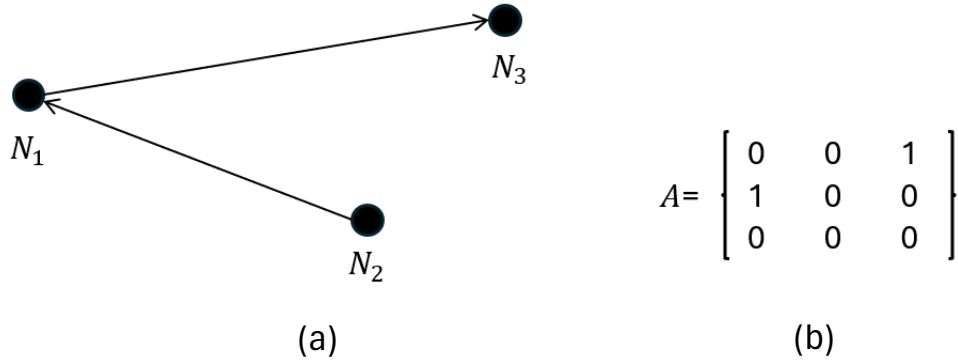


Figura 3. Gráfica dirigida y su matriz de adyacencia no simétrica A .

En las gráficas dirigidas, como la presentada en la Fig. 3, la existencia de una trayectoria desde un nodo i hasta un nodo j no garantiza la presencia de una trayectoria inversa. En la representación gráfica, los enlaces se indican mediante flechas que señalan la dirección de las trayectorias, y las matrices de adyacencia no son necesariamente simétricas. En el caso de las RDAs, la dirección de las trayectorias puede estar definida, por ejemplo, por el sentido del flujo del agua en las tuberías. Sin embargo, el análisis de la estructura de una RDA mediante gráficas dirigidas debe realizarse con precaución, dado que la dirección del flujo puede variar a lo largo del tiempo, modificando así el comportamiento estructural de la gráfica. A pesar de ello, los DMAs diseñados a partir de gráficas dirigidas, definidas según la dirección del flujo, presentan similitudes con los distritos generados mediante gráficas no dirigidas. Por lo tanto, aunque estos resultados deben interpretarse con precaución, proporcionan un panorama general útil para identificar un diseño de sectorización óptimo en

aquellos escenarios donde la dirección del flujo se mantiene estable durante la mayor parte del tiempo (Jacome *et al.*, 2025; De Freitas *et al.* 2024).

En ambos casos, tanto en la Fig. 2 como en la Fig. 3, se trata de gráficas no ponderadas, en las cuales el peso w de un elemento $A_{i,j}$ es igual a 1. Por otro lado, también es posible encontrar gráficas ponderadas, en las que w puede asumir distintos valores de acuerdo con la relevancia de los enlaces que conectan los nodos. En el caso de las RDAs, este peso puede estar asociado a características físicas de las tuberías, como su diámetro o longitud. Las gráficas constituyen una herramienta apropiada para el análisis de conjuntos de datos desde la perspectiva implementada en esta investigación, ya que permiten explorar las relaciones entre sus elementos. Este análisis puede abordarse desde una perspectiva puramente topológica, prescindiendo de las características físicas, o bien incorporando pesos que representen dichas propiedades, lo que amplía la profundidad y precisión de la evaluación.

A continuación, se analiza la topología de la RDA teórica M1 mediante su representación como gráfica, con la finalidad de establecer las bases de una metodología de sectorización de redes en DMAs basada en su geometría, por lo que, en esta etapa, las variables hidráulicas se excluyen por completo.

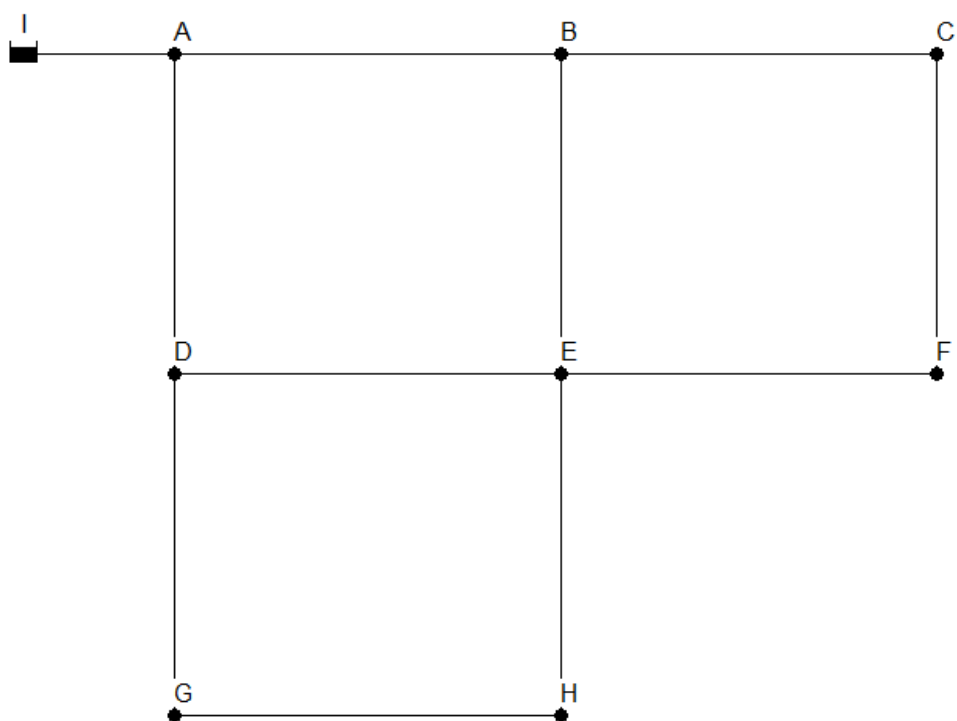


Figura 4. Modelo hidráulico de la RDA teórica M1.

La red M1, mostrada en la Fig. 4, se compone de 8 nodos, identificados de la A hasta la H, que conforman tres mallas y son abastecidos por un reservorio representado por el nodo I.

La Tabla 1 muestra la matriz de adyacencia $A_{9 \times 9}$ de la red M1, en la cual las filas y las columnas se integran por los nodos que componen la red.

Tabla 1. Matriz de adyacencia de la RDA M1.

Nodo	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	1	0	1	0	0	0	0	1
B	1	0	1	0	1	0	0	0	0
C	0	1	0	0	0	1	0	0	0
D	1	0	0	0	1	0	1	0	0
E	0	1	0	1	0	1	0	1	0
F	0	0	1	0	1	0	0	0	0
G	0	0	0	1	0	0	0	1	0
H	0	0	0	0	1	0	1	0	0
I	1	0	0	0	0	0	0	0	0

La Fig. 5 muestra la gráfica de la red M1. Esta representación se obtiene tras exportar la información del modelo hidráulico de EPANET hacia MATLAB mediante la EPANET-MATLAB-Toolkit. Esta herramienta permite incorporar las coordenadas originales de los nodos y sus índices, favoreciendo la interpretación de los datos.

Una gráfica se considera como regular cuando todos sus nodos presentan el mismo número de enlaces adyacentes; en la gráfica M1, los nodos presentan un número variable de conexiones, por lo que se clasifica como no regular. Esto implica que, de manera inherente, algunos nodos desempeñan un rol más relevante dentro de la estructura de la gráfica debido a su conectividad. Hidráulicamente, un nodo con una alta adyacencia puede representar puntos importantes de la red, como fuentes de abastecimiento o plantas de tratamiento.

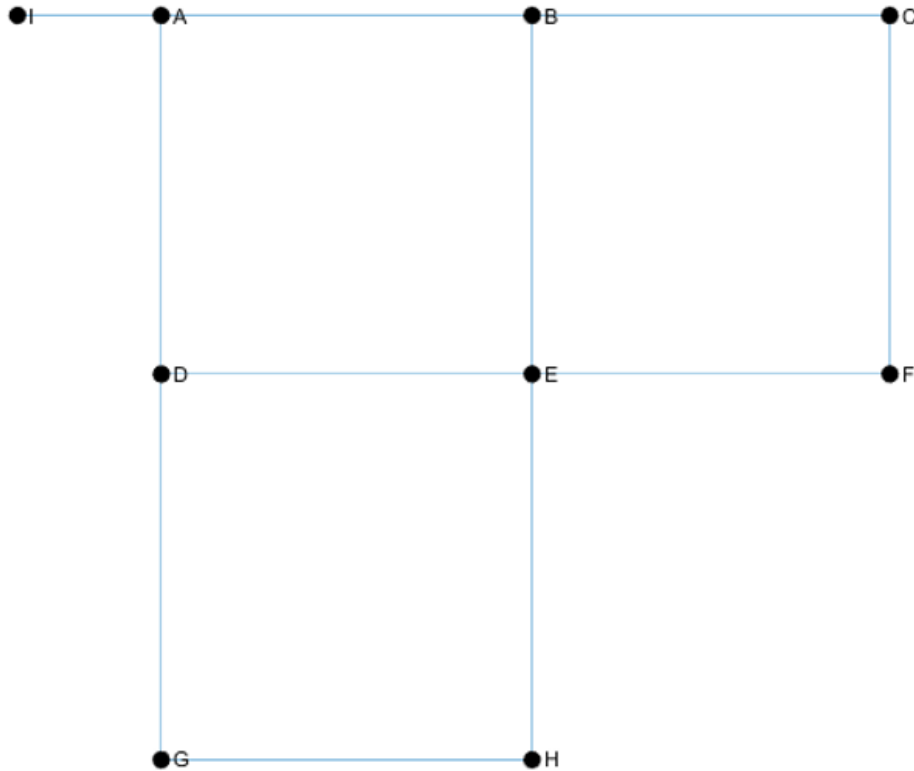


Figura 5. Gráfica de la RDA M1 generada mediante MATLAB.

La relevancia de los nodos en una gráfica se caracteriza mediante medidas de centralidad (Saxena *et al.*, 2020), las cuales se pueden clasificar en distintos tipos. Por ejemplo, el grado de un nodo indica el número de enlaces adyacentes al mismo. Como se observa en la Tabla 2, el nodo E alcanza un grado de 4, el valor máximo dentro de la gráfica analizada, seguido por los nodos A, B y D, que presentan un grado de 3. En la mayoría de las gráficas de RDAs, el grado máximo de los nodos suele ser 4, lo que coincide con los cruceros donde se intersecan dos tuberías perpendiculares.

Tabla 2. Grado y centralidad de los nodos de la gráfica de la red experimental.

Nodo	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Grado	3	3	2	3	4	2	2	2	1
$g(i)$	8.3667	7.2667	1.1667	7.2667	11.3	1.7333	1.1667	1.7333	0

En la Tabla 2 también se incluye una fila correspondiente a la Centralidad de Intermediación $g(i)$, que refleja la importancia de los nodos al considerar todas las trayectorias más cortas entre pares de nodos e identificar cuáles deben ser transitados para recorrer dichas trayectorias. Este valor se calcula mediante la Ec. [2].

$$g(i) = \sum_{s=1}^N \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad [2]$$

Donde σ_{st} es el número de caminos más cortos que van desde el nodo de origen s hasta el nodo de destino t , siempre y cuando $s \neq t$; $\sigma_{st}(i)$ es el número de caminos más cortos desde s hasta t que recorren el nodo i .

Con base en la Tabla 2, el nodo con mayor valor de intermediación es el E, ubicado en el centro de la gráfica, mientras que el nodo I presenta el valor más bajo, ya que ninguna trayectoria más corta entre pares de nodos requiere transitar por él. A partir de estos valores, se observa que los nodos E, A, B y D exhiben una prominencia elevada dentro de la gráfica de la red M1 (Fig. 5). En consecuencia, y considerando las intervenciones civiles necesarias

para el aislamiento de los DMAs, no resulta recomendable ubicarlas en las cercanías de estos nodos. Por el contrario, los enlaces que conectan a los nodos más alejados de la gráfica constituyen candidatos más adecuados para realizar dichas obras, debido a su baja conectividad respecto al resto de la red. En contraste, los nodos C, F, G y H presentan un valor de intermediación bajo y, además, son de grado 2, inferior al de los nodos más prominentes, que es de 3 y 4. Por consiguiente, su menor conectividad indica que pertenecen a una categoría distinta de la de los nodos E, A, B y D. En virtud de ello, la estructura de la gráfica de la red M1 (Fig. 5) se ajusta al patrón de ECP, que es descrito en la siguiente sección 2.2, *Estructura Centro-Periferia*.

Por otra parte, el caso del nodo I evidencia un contraste entre la relevancia de los nodos en la gráfica y en el modelo hidráulico. Según la gráfica, el nodo I (Fig. 5) presenta una relevancia mínima; sin embargo, en el modelo hidráulico corresponde al reservorio que abastece a la red. El análisis hidráulico de la red segmentada permitirá clarificar este planteamiento. Hasta este punto, se han identificado los parámetros para una posible subdivisión de la red, en la que la zona con nodos prominentes constituye un grupo principal o central, mientras que los nodos periféricos adyacentes serían candidatos para conformar grupos aislados.

Derivado del planteamiento anterior, se propone el diagrama de flujo de la metodología de sectorización de redes (Fig. 6), basado en sus gráficas, el cual se explicará con detalle en las subsecciones posteriores.

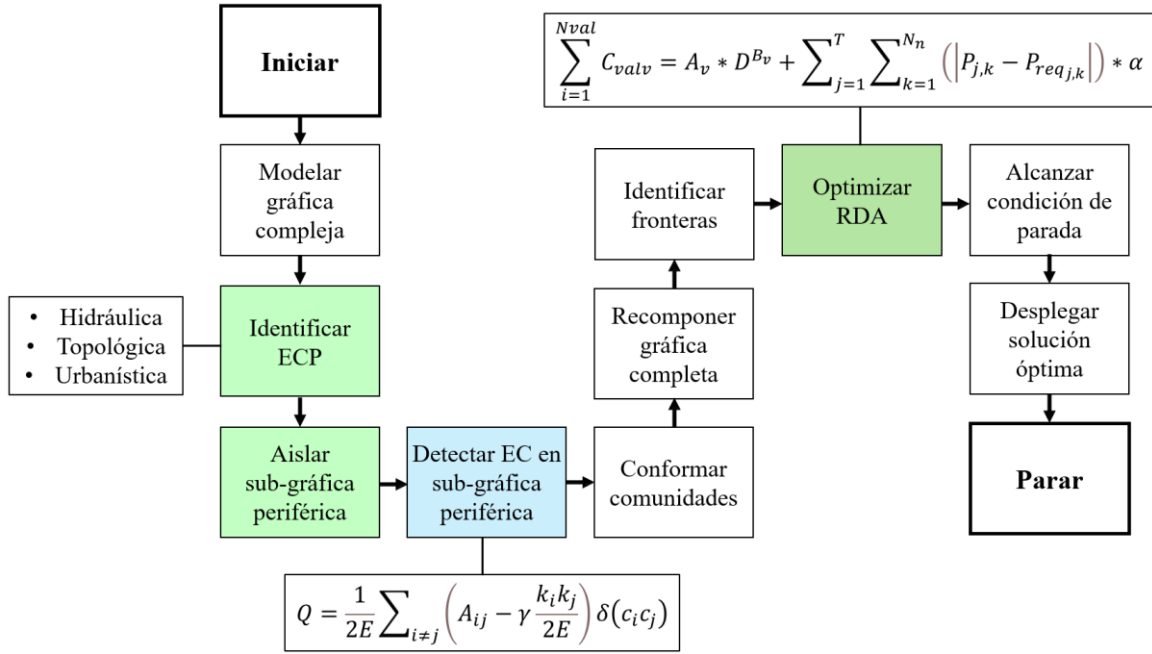


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología de sectorización de RDAs.

En el diagrama de flujo de la Fig. 6 se presentan seis etapas generales que permiten determinar el diseño óptimo de los DMAs, basándose en la clasificación de los nodos de la gráfica en dos categorías: principales y periféricos. La propuesta se fundamenta en capturar la representación gráfica del modelo hidráulico.

2.2 Estructura Centro-Periferia

Tang *et al.* (2019) señalan que la ECP ha adquirido relevancia en el análisis de gráficas, ya que se encuentra comúnmente en redes de tamaño intermedio. La definición más aceptada de la ECP es la presentada por Borgatti *et al.* (2000), quienes plantean que las gráficas se

componen de dos clases de nodos: una sub-gráfica cohesiva (el centro), en la que los nodos están fuertemente conectados entre sí, y una sub-gráfica periférica, cuyos nodos están débilmente conectados al centro. Según Gallagher *et al.* (2021), descomponer las gráficas en nodos centrales y periféricos permite separar los procesos centrales de aquellos que ocurren en las márgenes, facilitando una clasificación más precisa de los roles funcionales dinámicos de los nodos en relación con su posición estructural. Zhang *et al.* (2015) destacan que las gráficas con un centro densamente conectado, rodeado por un halo periférico, presentan múltiples usos potenciales en los que los actores centrales desempeñan un rol distinto al de los periféricos.

Con base en estos fundamentos, en este estudio se propone identificar el centro de las gráficas de las RDAs para orientar el diseño de los DMAs únicamente en las sub-gráficas periféricas, donde resulta más factible realizar obras hidráulicas para su aislamiento. Aunque el enfoque de ECP ha sido aplicado previamente en campos como la medicina (Da Silva *et al.*, 2008), la economía (Waenerlund *et al.*, 2011) y la sociología (Battiston *et al.*, 2018) su implementación en investigación hidráulica es novedosa. En este contexto, la presente investigación introduce por primera vez su aplicación en la optimización de RDAs.

Borgatti *et al.* (2000) plantean que la estructura de una gráfica puede clasificarse como ECP en la medida en que su matriz de adyacencia A se asemeje a δ , la matriz de adyacencia de una gráfica con ECP ideal. Es decir, una gráfica que cumple tres condiciones clave:

- Todos los nodos centrales están conectados entre sí.
- Cada nodo central mantiene conexiones con los nodos periféricos.

- Los nodos periféricos no presentan conexiones entre sí.

La estructura con forma de estrella mostrada en la Fig. 7 cumple con los requisitos de una gráfica con ECP ideal.

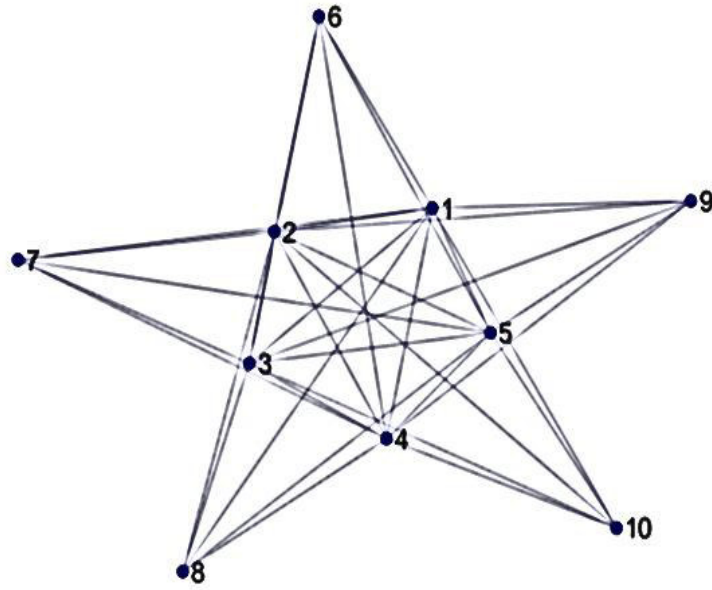


Figura 7. Gráfica con ECP ideal: estrella.

En la Fig. 7, la sub-gráfica central está compuesta por los nodos 1 a 5, mientras que la sub-gráfica periférica incluye los nodos 6 a 10. Cabe señalar que el patrón ideal difícilmente se encuentra en los datos empíricos, por lo que las gráficas reales solo se aproximan a él.

Es posible definir la estructura de la matriz δ bajo tres escenarios. En el primer escenario, el elemento $\delta_{i,j} = 1$ si ambos nodos i y j son centrales, mientras que en el segundo escenario

$\delta_{i,j} = 1$ sí al menos uno de los dos nodos es central. En ambos casos, $\delta_{i,j} = 0$ si ninguno de los nodos es central. Los dos escenarios descritos se clasifican como Modelos Discretos, dado que los pesos de los enlaces solo pueden asumir los valores 0 o 1.

En el tercer escenario, denominado Modelo Continuo, se introduce una tercera clase de nodos: la semiperiferia, ubicada entre los nodos centrales y periféricos. Desde un enfoque Euclídeo, los nodos semi-periféricos son aquellos que se encuentran a una distancia d de los nodos centrales, la cual puede representar el número de enlaces entre nodos, o bien el peso w , que puede indicar las unidades de distancia (metros, kilómetros, etc.) de los enlaces entre nodos central-semiperiféricos puede tomar cualquier valor no negativo dentro del intervalo $[0, 1]$ en gráficas no ponderadas, considerando que el peso máximo entre dos nodos centrales es 1. Bajo este modelo, asignar $w = 0$ a los enlaces que conectan la semiperiferia equivale a trabajar con el primer escenario del Modelo Discreto, mientras que $w = 1$ corresponde al segundo escenario, en el que $\delta_{i,j} = 1$ sí al menos uno de los nodos i o j es central. En otras palabras, el Modelo Continuo generaliza y permite representar también los dos primeros escenarios.

La similitud entre A y δ puede cuantificarse mediante los coeficientes ρ y r , definidos en las Ec. [3] y [4], respectivamente.

$$\rho = \sum_{i,j} A_{i,j} \delta_{i,j} \quad [3]$$

La Ec. [3] establece que ρ se obtiene a partir del producto Hadamard entre A y δ . En otras palabras, ρ corresponde al producto elemento a elemento de las matrices A y δ , seguido de la suma de todos los términos resultantes (Horn, 1991). En consecuencia, ρ alcanza su valor máximo únicamente cuando ambas matrices son idénticas. Sin embargo, la magnitud de ρ depende directamente del número de nodos de la gráfica analizada, por lo que no existe un valor máximo absoluto para este coeficiente.

Por su parte, el Coeficiente de Correlación de Pearson r , descrito por Walpole *et al.* (2012) como una medida de la asociación lineal entre dos variables, es independiente de la escala de medida, por lo que sí posee un valor máximo. En consecuencia, este parámetro se considera más eficiente, pues establece una base común para evaluar la similitud entre las matrices A y δ , sin importar el número de nodos de la gráfica.

$$r_{A,\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})(\delta_i - \bar{\delta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\delta_i - \bar{\delta})^2}} \quad [4]$$

En la Ec. [4], A y δ son las matrices descritas previamente, ordenadas a manera de arreglos de dimensión $1 \times N$, donde N es el número de nodos de la gráfica; $\bar{A}$ es la media muestral de A , análogamente para $\bar{\delta}$.

Los valores de r se sitúan en el intervalo $[-1, 1]$, donde $r = 1$ indica una correlación directa perfecta. Por lo tanto, la estructura de las gráficas puede catalogarse como ECP en la medida

en que este coeficiente se aproxime a la unidad. Además de Borgatti *et al.* (2000), este parámetro ha sido empleado por otros investigadores para identificar la correlación entre A y δ , como en los estudios de Lee *et al.* (2014); Yang *et al.* (2014); Luo & Yan (2016); Kojaku *et al.* (2017); y Shen *et al.* (2021).

Hasta ahora se ha descrito la manera de calcular la semejanza entre una gráfica y una gráfica con ECP ideal. De manera complementaria, también es necesario definir la etiqueta que determina la clase a la que pertenecen los nodos. En las gráficas de RDAs, el grado de las conexiones de los nodos generalmente se encuentra en el rango de 1 a 4, lo que podría sugerir intuitivamente la ausencia de un centro densamente conectado. No obstante, todas las RDAs cuentan con zonas principales o primordiales que aseguran un funcionamiento hidráulico adecuado.

En este estudio se analizan tres enfoques para determinar la zona central de las RDAs. El primero corresponde al centro topológico, definido a partir de la gráfica correspondiente, en el que los nodos centrales se identifican mediante medidas de centralidad que evalúan las interacciones entre los nodos y su importancia en el funcionamiento global de la red. El segundo enfoque es el centro hidráulico, que representa la zona de operación principal de la red. Finalmente, el tercer enfoque corresponde al centro urbanístico, determinado por las condiciones socioeconómicas de la ciudad a la que abastece la RDA. Este escenario es exclusivamente aplicable a redes correspondientes a casos reales.

En el capítulo 2.1, *Análisis Estructural de las RDAs: Representación Mediante Gráficas*, se introdujo el concepto de Centralidad de Intermediación $g(i)$. Además de este parámetro,

para determinar el centro topológico de la gráfica se considera adicionalmente la Centralidad de Cercanía $C_C(i)$, que corresponde al inverso de la lejanía desde un nodo hasta todos los demás, de modo que el nodo con el valor más alto de $C_C(i)$ es aquel que se localiza más cercano al resto. Este tipo de centralidad puede calcularse mediante la Ec. [5], en la cual $d(s, t)$ representa la distancia (número de enlaces) desde el nodo fuente s hasta el nodo de destino t , considerando que $s \neq t$.

$$C_C(i) = \frac{1}{\sum_{t=1}^N d(s, t)} \quad [5]$$

Los valores calculados de $g(i)$ y $C_C(i)$ se encuentran en escalas diferentes, por lo que se realiza una estandarización con el fin de establecer una escala común, aplicando la relación mostrada en la Ec. [6].

$$x_n = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad [6]$$

En la Ec. [6], x_n representa el valor normalizado del parámetro estudiado; x_i corresponde al valor del parámetro analizado del nodo i ; y x_{max} y x_{min} son los valores máximo y mínimo, respectivamente, del conjunto de valores del parámetro analizado. Según esta relación, el elemento x_n presenta un valor máximo de 1, mientras que el valor mínimo puede ser 0.

Estandarizar los valores de $g(i)$ y de $C_c(i)$ y posteriormente calcular su valor medio, permite establecer una única medida de evaluación, denominada $I_c(i)$, a partir de la cual la noción del centro topológico de una gráfica de RDA puede definirse como la región donde se concentran los nodos más prominentes, considerando como parámetros su transitividad y cercanía al resto de nodos.

Con el fin de medir la efectividad de $I_c(i)$, se compara su efectividad contrastándolo con el caso en el que los nodos centrales son aquellos que maximizan el valor de r . Para ello, se emplea el caso teórico de la red `foss_poly_1`, mostrada en la Fig. 8. Este caso de estudio se encuentra dentro del catálogo de redes de la EPANET-MATLAB-Toolkit, el cual se integra por redes de acceso libre que son empleadas por los investigadores como base común para comparar la efectividad de las diversas metodologías de optimización de redes.

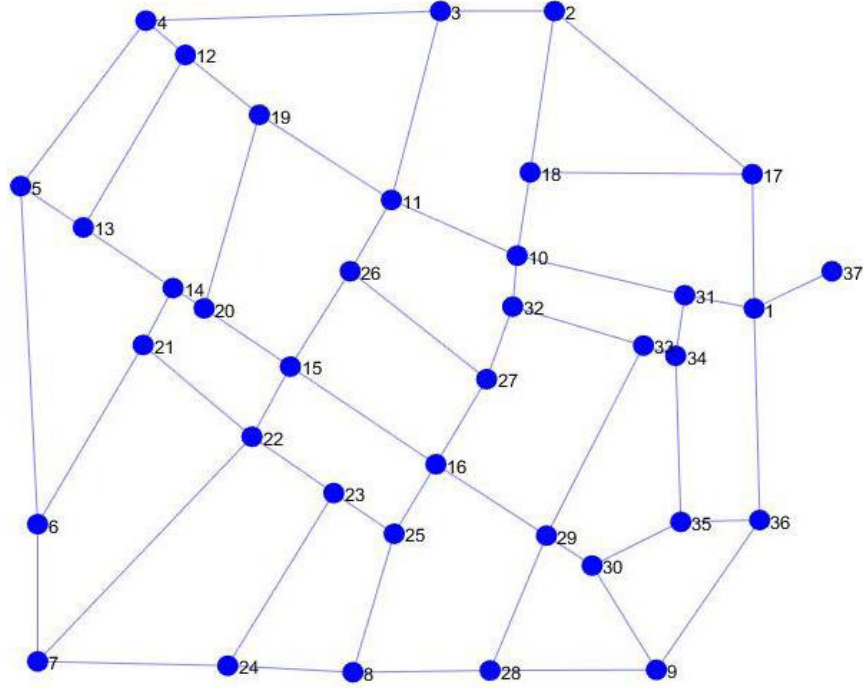


Figura 8. Gráfica de RDA *foss_poly_1*.

La Fig. 8 muestra la geometría casi cuadrada de la gráfica *foss_poly_1*, compuesta por 36 nodos de consumo y abastecida por un reservorio ubicado en el nodo 37. A continuación, se analizan dos escenarios: el escenario (1) *wcent*, en el cual los nodos centrales se determinan mediante I_c ; y el escenario (2) *wmax*, en el cual los nodos centrales son aquellos que incrementan en mayor medida el valor de r .

Los pesos de los nodos se clasifican con base en los cuartiles, que corresponden a tres valores Q_1 , Q_2 y Q_3 que dividen un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales. El primer cuartil Q_1 delimita el 25% inferior de los datos; el segundo cuartil Q_2 corresponde al 50% y

coincide con la mediana; y el tercer cuartil Q_3 delimita el 75% del conjunto. Estos datos estadísticos permiten analizar la dispersión y la posición relativa de los datos dentro de la distribución. En ese contexto, los valores superiores a Q_3 se consideran los más elevados del conjunto analizado.

Comenzando por el caso (1) *wcent*, en el cual los nodos centrales se determinan mediante $I_c(i)$, en la Fig. 9 se presentan los valores de dicho parámetro, destacándose en color amarillo los nodos 10, 11, 15 y 16, cuyo valor de $I_c(i) > 0.045$. Este umbral corresponde al valor de Q_3 del conjunto de datos de $I_c(i)$ para la gráfica *foss_poly_1*, e identifica a los nodos con mayor prominencia dentro de la red.

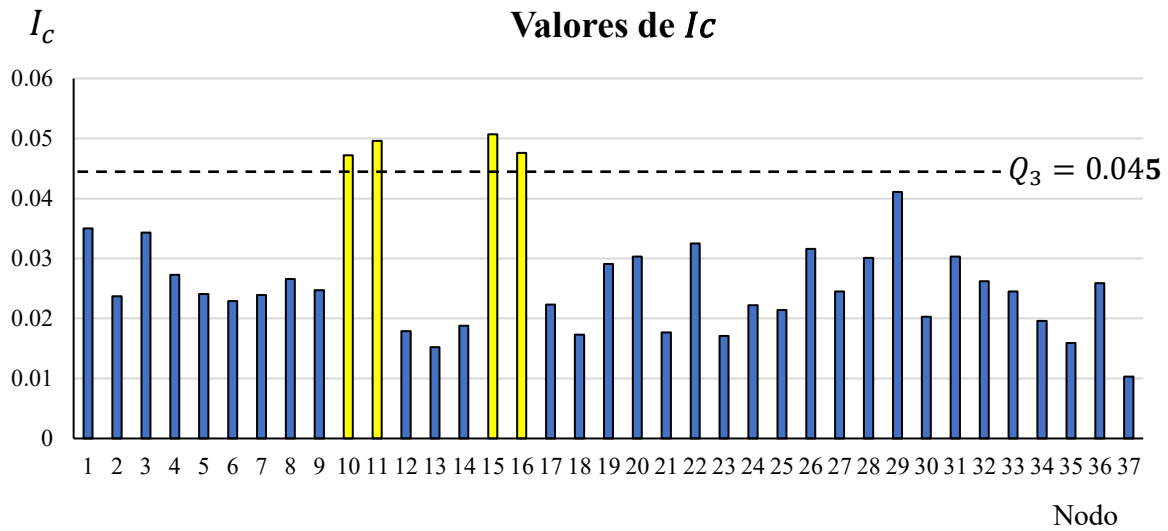


Figura 9. Valores de I_c en gráfica *foss_poly_1*.

En la Fig. 9 se presentan, por orden de índice, los valores de I_c correspondientes a cada nodo de la gráfica.

De acuerdo el código de colores mostrado en la Fig. 10, los nodos centrales se localizan en la región geográficamente central de la gráfica, mientras los nodos periféricos se disponen alrededor de ellos. Intuitivamente esta distribución parece lógica; sin embargo, no siempre corresponde a la realidad de la red debido a que la zona con mayor conectividad puede localizarse en cualquier región geográfica de la gráfica.

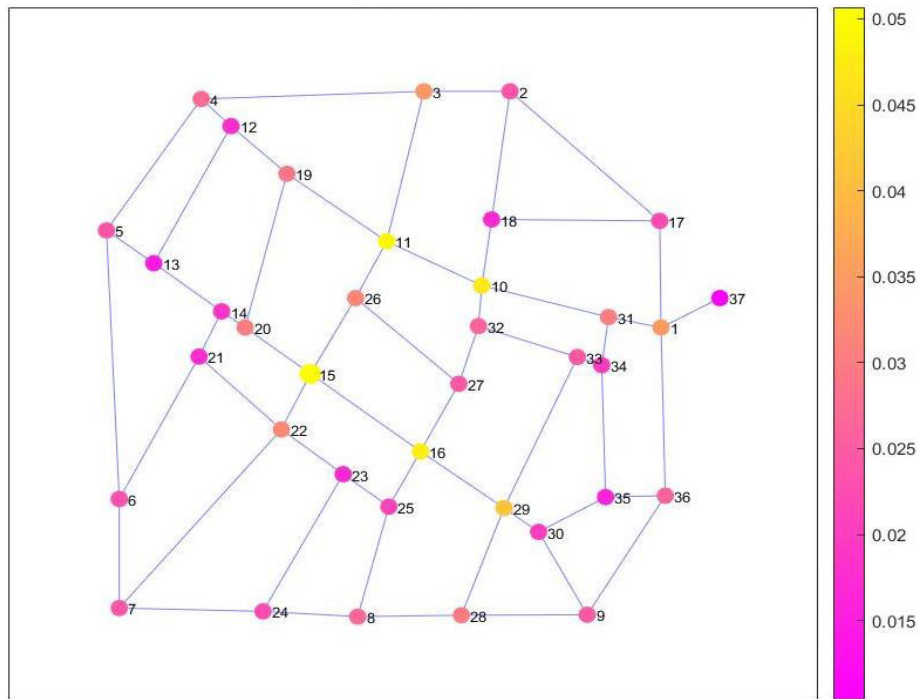


Figura 10. Peso de los nodos en la gráfica foss_poly_1.

En la Fig. 10 se observa que, en medio de los nodos centrales, se encuentran los nodos 26, 27 y 32, los cuales presentan valores intermedios de $I_c(i)$. En el caso donde resulte mayormente conveniente que la sub-gráfica central incluya todos los nodos centrales es necesario incorporar algunos nodos que, de acuerdo con su peso, no entran en dicha clase. Ante esta situación, resulta factible introducir una semiperiferia, de manera análoga al Modelo Continuo de ECP.

Si bien el peso w de los enlaces entre las aristas (que representan a los nodos de la RDA) centrales de la gráfica es 1, en el caso de la gráfica `foss_poly_1`, los enlaces que adoptan ese valor son aquellos que conectan los nodos 10, 11, 15 y 16 entre sí. En la Fig. 11 se muestran los nodos de la sub-gráfica de la región central, los enlaces que los conectan y sus respectivos pesos bajo tres escenarios: (a) la ECP ideal, en la que todos los nodos centrales están conectados entre sí; (b) muestra la estructura real considerando únicamente dos clases de nodos, centrales y periféricos; y (c) la estructura real incorporando la semiperiferia.

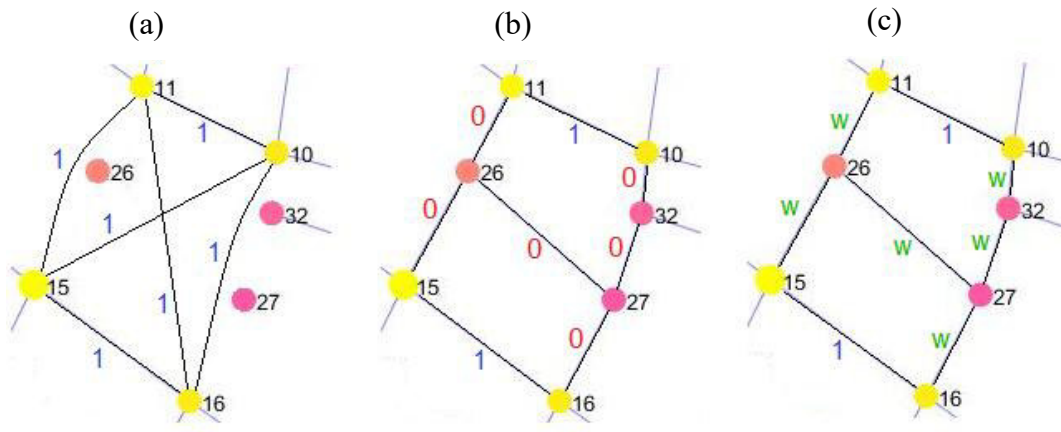


Figura 11. Sub-gráfica del centro de foss_poly_1: (a) ECP ideal; (b) Considerando dos clases de nodos, centrales y periféricos; (c) incorporando una semiperiferia.

Como se muestra en la Fig. 11, los nodos semi-periféricos son aquellos que se encuentren a una distancia $d = 1$ de los nodos centrales, es decir, a un enlace de distancia, mientras que el resto de los nodos serán periféricos. Las gráficas que presentan más de una región con nodos centrales se clasifican como gráficas con ECP multicentro (Kojaku & Masuda, 2017).

En la Fig. 12 se ilustra la distribución de las tres clases de nodos en la gráfica.

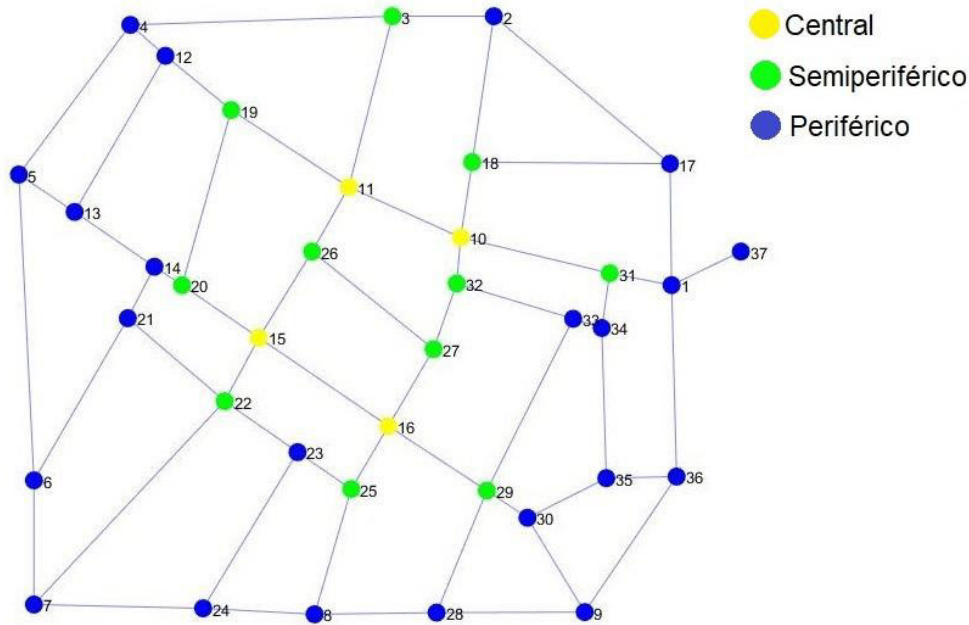


Figura 12. Gráfica *foss_poly_1*: clases de nodos.

En el caso (2) *wmax*, en el cual los nodos centrales son aquellos que incrementan en mayor medida el valor de r , se desarrolló un algoritmo que considera a cada nodo, desde 1 hasta N , como el nodo central de la gráfica. Los nodos a una distancia $d = 1$ son considerados dentro de la misma clasificación, mientras que los nodos a una distancia $d = 2$ se consideran semi-periféricos. El algoritmo modifica la distribución de clases con el fin de maximizar el valor de r para los distintos valores de w .

La Fig. 13 muestra los valores de Correlación de Pearson r entre la gráfica *foss_poly_1* y una gráfica con ECP ideal.

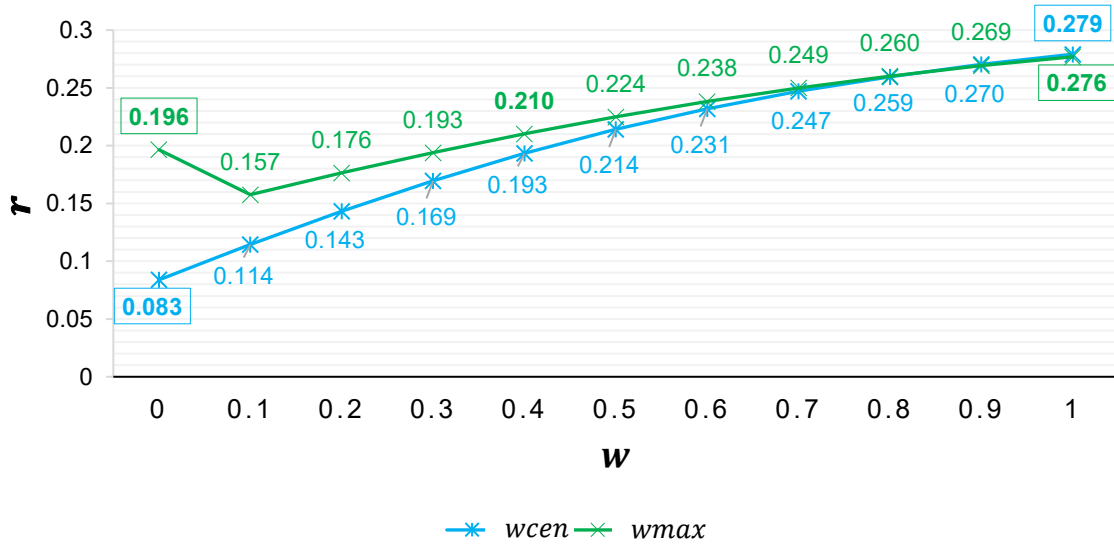


Figura 13. Valores de correlación r entre la gráfica *foss_poly_1* y una gráfica con ECP ideal.

En la Fig. 13 se muestra que se evaluó el peso w de las aristas con valores dentro del intervalo $[0, 1]$, considerando incrementos de 0.1, para evaluar su influencia en la similitud de la gráfica *foss_poly_1* con una gráfica con ECP ideal.

Los valores máximos alcanzados son 0.279 y 0.276, para los escenarios (1) *wcent* y (2) *wmax*, respectivamente. Cuando $w = 1$, el peso de los enlaces que conectan a los nodos semi-periféricos con los nodos centrales es equivalente al peso de los enlaces que conectan a los nodos centrales entre sí, ajustándose al patrón del Modelo Continuo de ECP en el cual únicamente se consideran dos clases de nodos. Tanto para el caso (1) *wcent* como para el caso (2) *wmax*, cuando el peso de las aristas toma el valor $w = 1$, la correlación entre las matrices A y δ alcanza su valor máximo. En consecuencia, se infiere que, para el caso de las gráficas asociadas a RDAs, su estructura se asemeja en mayor medida a una gráfica con ECP

ideal cuando los nodos son clasificados únicamente dentro de dos categorías, central y periférica, excluyendo a la semiperiferia.

Con base en el análisis anterior, el parámetro r presenta su valor más alto cuando $w = 1$, por lo que es más factible determinar la ECP con base al Modelo Continuo, en el cual los nodos únicamente pueden clasificarse como centrales o periféricos, excluyendo a la semiperiferia.

En el caso de las gráficas de RDAs se espera que el grado de conexión de los nodos se sitúe generalmente entre 1 y 4, por lo que difícilmente se presenta un centro densamente conectado. No obstante, como se demuestra en Barucca *et al.* (2016); Da Silva *et al.* (2008); Everett *et al.* (2005), así como en el presente análisis, las medidas de centralidad permiten identificar de manera fiable las zonas más prominentes de una gráfica asociada a una RDA, en consecuencia, estas métricas se adoptan como herramienta para la detección de ECP desde la perspectiva topológica.

Adicionalmente, en otro escenario, se identifica el centro hidráulico de la RDA debido a que, en el caso de que la ejecución de las obras civiles orientadas al aislamiento los distritos se sitúen cerca de tuberías o nodos con cargas piezométricas elevadas, pueden generarse pérdidas de carga significativas, comprometiendo la calidad del suministro de agua a los usuarios. Recuérdese que la carga piezométrica resulta de la suma de la carga de presión y la carga de elevación, por lo que valores elevados suelen estar asociados a condiciones hidráulicas sensibles ante intervenciones estructurales. En ese contexto, los nodos se ponderarán adicionalmente en función de la demanda de agua como un mecanismo frente a

posibles pérdidas de presión, considerando que demandas elevadas suelen corresponder a zonas de alta actividad socioeconómica, cuya afectación podría comprometer la continuidad del desarrollo urbano de los centros de población. Dado que los valores de carga piezométrica se expresan en metros y los valores de demanda se expresan en unidades de volumen por tiempo, los valores serán estandarizados con base en la Ec. [6], tal como se hizo para $I_c(i)$. De esta forma el valor del peso hidráulico de los nodos es un valor escalar calculado mediante la Ec. [7].

$$w_{nh} = \frac{x_{nd}(\bar{x}_{demanda_i}) + x_{ncp}(\bar{x}_{carga\ piezométrica_i})}{2} \quad [7]$$

Donde w_{nh} es el peso hidráulico del nodo, x_n es el valor normalizado y $\bar{x}$ es la media del parámetro evaluado durante las 24 horas del día en el nodo i . De tal modo que los valores de w_{nh} se encontrarán en el intervalo $[0, 1]$, siendo los nodos con pesos cercanos a 1 los más prominentes.

2.3 Detección de Estructura Comunitaria: *Algoritmo Fast-Greedy*

Bajo el enfoque de Estructura Comunitaria (EC) se asume que las gráficas pueden descomponerse en comunidades de nodos densamente conectados entre sí, mientras que las

conexiones entre comunidades son significativamente menos intensas (Fortunato *et al.*, 2007). Siguiendo este enfoque se han realizado trabajos de investigación como el de Diao *et al.* (2013) en el que la propuesta metodológica consiste en considerar a cada nodo como una comunidad, después las comunidades se unen sistemáticamente siempre que incremente el valor de Modularidad, Q , el cual cuantifica la calidad con la que una gráfica ha sido particionada en comunidades. Lambiotte *et al.* (2009) plantean que valores altos de Q indican que las comunidades encontradas tienen más conexiones que las esperadas por azar y, por tanto, son compactas y bien definidas.

Brentan *et al.* (2017) plantean una metodología de aislamiento de DMAs de dos etapas donde la primera se enfoca en el agrupamiento de los nodos mientras que la segunda se enfoca en la optimización hidráulica. Referente a la primera etapa de agrupación de los nodos, el algoritmo empleado es la Caminata Aleatoria (por la traducción del inglés *Random Walk*), que los propios investigadores describen como un proceso de difusión estocástico en el que la posición de una partícula en un instante dado depende de su posición anterior y una variable aleatoria que determina la dirección tomada desde el punto anterior hacia alguno de los vecinos. Los caminos aleatorios dentro de una gráfica tienden a quedar atrapados en partes densamente conectadas, aludiendo al concepto de comunidades. Pesantez *et al.* (2018) presentan una metodología de aislamiento de distritos en la que para agrupar a los nodos en comunidades los investigadores aplican el método *k-means*, que consiste en determinar un número k de centroides (nodos) que son generados aleatoriamente para después generar un número de k grupos asociados a la distancia más cercana a cada centroide. Posterior a que se ha establecido el centroide y se han unido a él los nodos dentro de dicha distancia cercana,

entonces el algoritmo recalcula el centroide de los k grupos y continúa repitiendo los pasos anteriores hasta lograr la convergencia a la agrupación óptima. Di Nardo *et al.* (2018) presentan una técnica de diseño de DMAs en la que se emplean Técnicas Espectrales de gráficas para calcular los vectores y valores propios de la matriz de adyacencia A y la matriz Laplaciano, que representan métricas sustitutas de la robustez y conectividad de la RDA, con el fin de cortar la gráfica en componentes independientes, es decir, en comunidades que posteriormente se convierten DMAs al llevar a cabo la optimización hidráulica de las fronteras entre dichas comunidades. Pesantez *et al.* (2019) presentan un método de aislamiento de distritos en el que para determinar la estructura de las comunidades los nodos son iterativamente intercambiados entre las mismas hasta asegurar que los nodos sean asignados a la comunidad más cercana. Ostfield *et al.* (2017) desarrollan una metodología de agrupación de los nodos de una RDA basándose en la similitud de la edad del agua dentro de los grupos. Similar al trabajo realizado por Diao *et al.* (2013), para una aplicación puramente hidráulica sin emplear gráficas, durante la primera etapa se considera que cada nodo es un grupo y se calcula su edad del agua promedio a lo largo del día, posteriormente el algoritmo agrupa a los dos nodos vecinos con mayor similitud de edad en un mismo grupo. Iterativamente el algoritmo repite el proceso hasta llegar y evaluar al caso en el que todos los nodos quedan agrupados dentro de un solo grupo. En una segunda etapa se verifica que los grupos contengan el número adecuado de nodos. A pesar de que en la investigación descrita previamente no se emplea el término comunidad, los grupos aluden al mismo concepto, pero abordado desde una perspectiva puramente hidráulica. Los estudios citados

previamente han demostrado que la detección de EC es un método eficiente para determinar la estructura de los distritos, y que es posible ejecutarla mediante distintos métodos.

Considerando las investigaciones descritas previamente, en esta investigación se propone integrar la ECP y la EC en el diseño de los DMAs. En una primera fase se realiza la detección de la ECP mediante la ponderación de los nodos con el objetivo de identificar aquellos con mayor prominencia en el funcionamiento global de la gráfica. Posteriormente, en una segunda etapa se ejecuta la detección de ECP en la sub-gráfica periférica, dado que, como señalan Gallagher *et al.* (2021), una gráfica puede presentar simultáneamente ambas estructuras: EC a escala global y ECP a escala local, o bien ECP a nivel global y EC a nivel local.

La estructura de las comunidades dentro de las gráficas es determinada con base al parámetro de Modularidad Q , descrito al comienzo de esta sección, el cual fue introducido por primera vez por Newman (2004). Basándose en Q para determinar la estructura de las comunidades, Clauset *et al.* (2004) desarrollan el algoritmo *Fast-Greedy*, que podría traducirse como “algoritmo rápido y voraz”, cuyo funcionamiento consiste en encontrar una solución global de la gráfica particionada en comunidades como resultado de obtener soluciones locales óptimas. Los propios investigadores describen que el algoritmo puede catalogarse dentro de los métodos de agrupamiento jerárquico por aglomeración, Everitt *et al.* (2011) describen que en una clasificación jerárquica los datos no se dividen en un número particular de grupos en un solo paso, sino en una serie de particiones que pueden ir desde un único grupo que

contiene a todos los individuos hasta N grupos, de los cuales cada uno contiene un único individuo.

El algoritmo *Fast-Greedy* parte de un estado en el que cada nodo es el único miembro de una de las N comunidades y repetidamente une a las comunidades en pares, eligiendo en cada paso a la unión que resulte en el mayor incremento de Q cuyo valor puede calcularse mediante la Ec. [8], presentada por Bianchotti *et al.* (2021) de manera simplificada con base en las investigaciones realizadas por Girvan *et al.* (2002) y Reichardt *et al.* (2006).

$$Q = \frac{1}{2E} \sum_{i \neq j} \left(A_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2E} \right) \delta(c_i c_j) \quad [8]$$

En la Ec. [8], A_{ij} son los elementos de la matriz de adyacencia A ; γ es un parámetro estructural de resolución; $\frac{k_i k_j}{2E}$ representa la posibilidad de que exista un enlace entre los nodos i y j , cuando $\gamma > 1$ las comunidades tienden a ser más pequeñas mientras que cuando $\gamma < 1$ las comunidades tienden a ser más grandes; k_i y k_j representan el grado de los nodos i y j , respectivamente; la función $\delta(c_i c_j) = 1$ si los nodos i y j pertenecen a la misma comunidad, $\delta(c_i c_j) = 0$ en el caso contrario. En ese contexto, la información de entrada del algoritmo *Fast-Greedy* es la matriz de adyacencia A , mientras que la información de salida es un arreglo de valores que indica la comunidad a la que pertenece cada nodo. Valores de

Q próximos a la unidad que la gráfica presenta una fuerte EC, en contraste, valores próximos a cero indican que la gráfica no presenta una EC significativa.

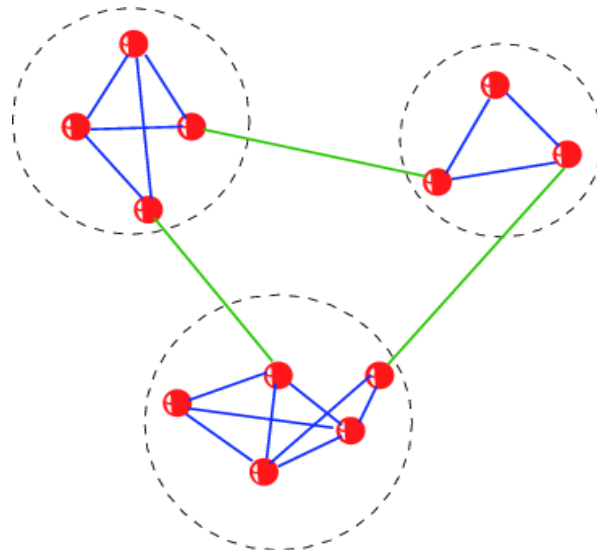


Figura 14. Gráfica dividida en comunidades. Fuente: Castellano & Fortunato (2012).

La Fig. 14 muestra el ejemplo de una gráfica simple que ha sido particionada en tres comunidades, cada una de ellas se delimita por los círculos en líneas azules discontinuas. Recuérdese que, cada comunidad dará paso a un DMA, por lo que posterior a que se ha determinado la ECP de las gráficas y la EC dentro de la sub-gráfica periférica, se procede a la selección de los elementos de frontera entre DMAs mediante un proceso de optimización.

2.4 Algoritmo de Optimización: *Particle Swarm Optimization*

La Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés de *Particle Swarm Optimization*), propuesta por primera vez por Eberhart *et al.* (1995) es un método de optimización estocástica. Ramos *et al.* (2005) describen que, a diferencia de los métodos de optimización deterministas, en los métodos de optimización estocástica los parámetros del problema no se conocen con certeza, por lo que este tipo de métodos toman decisiones para futuros inciertos con base en información preliminar, además de que permiten incorporar actitudes adversas al riesgo, por ejemplo, penalizando los peores escenarios. Heppner (1990) describe que los métodos estocásticos dependen de una serie de decisiones que a su vez dependen de una serie de restricciones que las limitan, y de una función de aptitud (o ajuste) que debe optimizarse. De acuerdo con Wang *et al.* (2018) el algoritmo PSO simula el comportamiento de animales sociales que desarrollan una forma cooperativa de buscar comida. Heppner (1990) describe la lógica de operación del comportamiento colectivo de animales, describiendo reglas simples que gobiernan el movimiento de los individuos de un grupo e introduce la lógica de su interacción social. De esa forma, el investigador plantea el ejemplo de la parvada de aves buscando comida: suponiendo que existe un campo de maíz (la solución óptima) en el plano cartesiano y una parvada de aves (las partículas) dispersas en el mismo plano buscando el campo de maíz, la aptitud de las aves se calcula en función de la distancia entre ellas y el campo de maíz; posteriormente se identifica la ubicación del ave con mayor aptitud, misma a la que buscarán acercarse el resto de aves, para cada iteración se asigna una velocidad a cada ave que la llevará a una nueva posición, luego se

actualiza la posición del ave con mayor aptitud y se repite el proceso hasta cumplir con la condición de parada, que en el caso de la parvada de aves corresponde al caso en el que un ave encuentra el campo de maíz, o se aproxima lo máximo posible a él. Siguiendo este marco conceptual Eberhart & Kennedy (1995) propondrían por primera vez el algoritmo PSO. En esencia, un enjambre de PSO está compuesto por un conjunto de partículas, cada una asociada a un vector de posición y un vector de velocidad, que usualmente se inicializan dentro de un rango previamente definido. El vector de posición representa una posible solución al problema ya que determina el valor de la función de ajuste. Los vectores de posición y velocidad son actualizados iterativamente con base en las ecuaciones [9] y [10], respectivamente.

$$x_s^{t+1} = x_s^t + v_s^{t+1} \quad [9]$$

$$v_s^{t+1} = w^t * v_s^t + c_1 * r_1 |l_b^t - x_s^t| + c_2 * r_2 |g_b^t - x_s^t| \quad [10]$$

Donde x_s^{t+1} es la posición de la partícula s en la iteración $t + 1$, actualizada usando la velocidad v_s^{t+1} , que es una combinación de:

- i. El último valor de velocidad ponderado por el parámetro de inercia w^t para evitar una excesiva itinerancia de las partículas.
- ii. La diferencia entre la mejor posición de la partícula, l_b^t , y su posición actual x_s^t ponderada por un parámetro cognitivo c_1 .

- iii. Finalmente, la diferencia entre la mejor posición de la partícula y la posición del líder el enjambre, g_b^t , ponderada por el parámetro social c_2 .

r_1 y r_2 son números aleatorios que generan dispersión en las partículas para evitar la convergencia prematura a soluciones óptimas locales. Los elementos dos y tres de la ecuación [10] son los encargados de la convergencia del método porque atraen partículas al mejor punto individual que una partícula ha visto.

En este estudio, la función de ajuste de la Ec. [11] (WDSA CCWI, 2022) evalúa la bondad de las partículas con base al costo total de la instalación de las válvulas requeridas para aislar a los DMAs.

$$\sum_{i=1}^{N_f} C_{valv} = A_v * D^{B_v} + \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^N \left(\left| P_{(i,j)} - P_{req(i,j)} \right| \right) * \alpha \quad [11]$$

En la Ec. [11], N_f es el número de fronteras (válvulas); C_{valv} es el costo en euros por instalar una nueva válvula; D es el diámetro de la tubería de frontera en metros; A_v y B_v son coeficientes característicos de la curva de costos que dependen del tipo de válvula. $A_v = 99,000$ y $B_v = 2.16$ en el caso de las VAs que se situarán sobre las fronteras cerradas, mientras que $A_v = 275,000$ y $B_v = 2.1$ en el caso de las Válvulas de Control de Flujo (VCFs) que se situarán sobre las fronteras abiertas, las cuales funcionan como entradas de agua a los distritos. Es importante destacar que las VCFs son más caras que las VAs. El segundo término de la Ec. [11] añade una penalización a las soluciones con presiones por

debajo del umbral requerido $P_{req(j,k)} = 10$ Metros Columna de Agua (mca) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Hídricos, 2000); T es la duración del periodo de simulación, que se establecerá entre 24 y 48 horas para asegurar soluciones viables a lo largo del día, con pasos temporales de una hora y N es el número de nodos de la RDA.

En esta investigación, el enjambre de partículas que representa el conjunto de soluciones está conformado por arreglos de valores que describen el estado de las tuberías de frontera de los DMAs. De acuerdo con la convención empleada en el EPANET-MATLAB-Toolkit, las tuberías abiertas se representan mediante el valor 1, mientras que las tuberías cerradas se representan mediante el valor 0; en consecuencia, las fronteras donde se instalan VCFs se codifican con el valor 1, mientras que aquellas donde se colocan VAs se representan con el valor 0. De esa manera, el enjambre inicial se representa mediante una matriz integrada por valores 0 y 1, donde las filas representan las combinaciones de los estados de las válvulas de frontera mientras que las columnas representan el estatus específico de cada válvula en cada posible solución.

El límite inferior del espacio de búsqueda se define por la configuración en la que todas las tuberías de frontera se equipan con VAs, representando el escenario de menor costo económico, sin embargo, dicha configuración resulta hidráulicamente inviable, ya que la supresión del flujo entre sectores genera pérdidas significativas de presión y compromete la continuidad del suministro en la RDA. En contraste, el límite superior se asocia a la instalación de VCF en la totalidad de las tuberías de frontera, lo que garantiza la preservación del comportamiento hidráulico actual de la red, aunque con el mayor costo económico y sin

lograr el aislamiento efectivo de los DMAs. En consecuencia, las soluciones factibles se encontrarán entre ambos extremos, correspondiendo a configuraciones intermedias que equilibran el desempeño hidráulico de la RDA y el costo económico de la sectorización. De esta manera, el algoritmo produce como salida un arreglo binario que representa la configuración de menor costo posible, sin generar afectaciones negativas en las presiones de la RDA.

Como condición de parada del algoritmo PSO se define un número máximo de iteraciones, así como umbral iteraciones consecutivas durante las cuales, si el valor de ajuste de la mejor solución no presenta mejoras, el algoritmo se detiene. La información de entrada del algoritmo PSO es la solución devuelta por el algoritmo *Fast-Greedy*, es decir, el arreglo de valores que indica las comunidades a las que pertenecen los nodos. Al comienzo, el algoritmo de optimización identifica pares de nodos vecinos, si pertenecen a comunidades distintas entonces el enlace que los conecta representa una frontera. La información de salida del algoritmo PSO es un arreglo de valores que indica el índice de las tuberías de frontera y su estado abierto o cerrado.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

3 CASO DE ESTUDIO TEÓRICO DE LA RDA MODENA

La propuesta metodología será experimentada siguiendo el caso teórico de la red Modena, mostrada en la Fig. 15, una red de acceso abierto en el sitio del Centro de Sistemas de Agua de la Universidad de Exeter. Han *et al.* (2020) refieren que es la RDA de la ciudad de Emilia-Romaña, ubicada en el noreste de Italia, que se extiende sobre una superficie de 183.2 km².

Este es un caso de estudio de referencia bien conocido dentro de los trabajos de optimización de RDAs debido a que se integra por los elementos hidráulicos menos complejos dentro de la modelación hidráulica: tuberías (317), nodos (268) y reservorios (4). En EPANET, los reservorios suponen suministro de agua constante y a diferencia de los tanques, no requieren de ningún tipo de controles de niveles operativos. La RDA tampoco integra válvulas o bombas, que al igual que los tanques, requieren de controles.

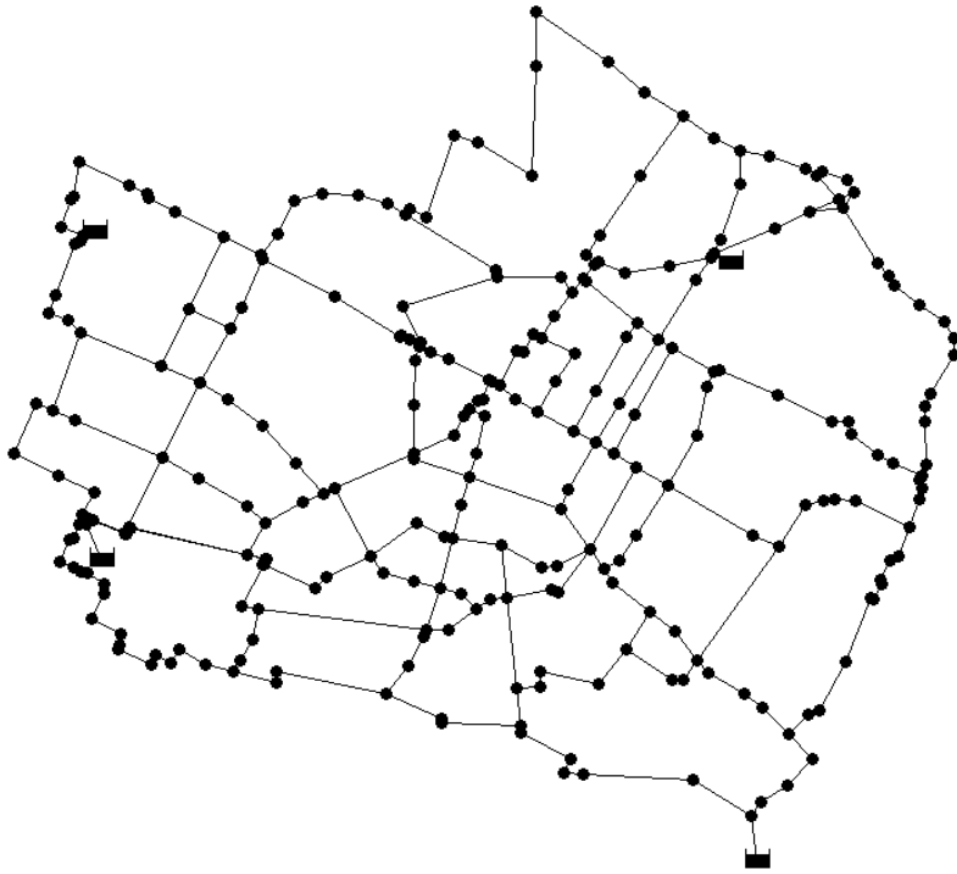


Figura 15. Modelo hidráulico de RDA Modena.

Recuérdese que, el método de optimización de redes se divide en tres etapas: detección de ECP topológica e hidráulica (y urbanística en el caso de RDAs reales), detección de EC en sub-gráfica periférica mediante algoritmo *Fast-Greedy* y optimización de fronteras mediante algoritmo PSO.

De acuerdo con la Ec. [5], para la ponderación de los nodos desde la perspectiva topológica, los pesos de los nodos se distribuyen tal como se muestra en la Fig. 16.

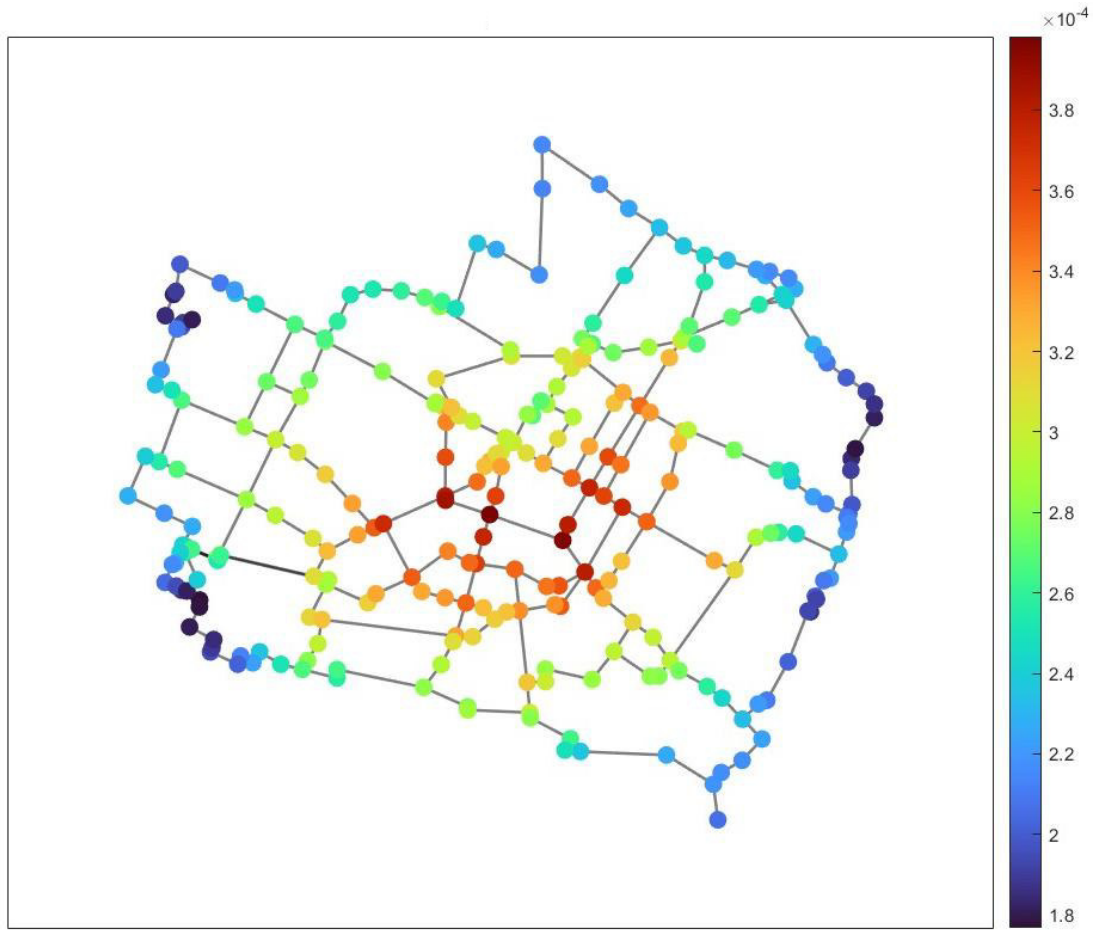


Figura 16. Pesos de los nodos en la gráfica Modena: perspectiva topológica.

La Ec. [5] permite calcular la Centralidad de Cercanía $C_C(i)$, que se ha empleado para la ponderación topológica en lugar de I_c , donde se considera también a la Centralidad de Intermediación $g(i)$, debido a que $g(i)$ indica los nodos más transitados desde la perspectiva topológica, lo que no representa que sean precisamente los nodos más transitados por el flujo de agua. En su lugar, $C_C(i)$ indica los nodos más cercanos al resto desde ambas perspectivas, por lo que se considera que es una aproximación más cercana al funcionamiento real de la

RDA. Debido a ello, en la Fig. 16 la escala de valores tiene como límite superior un valor de 1, en lugar de un valor 2, tal como lo haría si la ponderación se realizara por I_c .

Considerando que la red Modena tiene una estructura similar a radial, donde los elementos irradian desde un punto central, los nodos más preponderantes desde la perspectiva topológica se localizan en la región geográficamente central de la gráfica, estructurando un centro bien conformado.

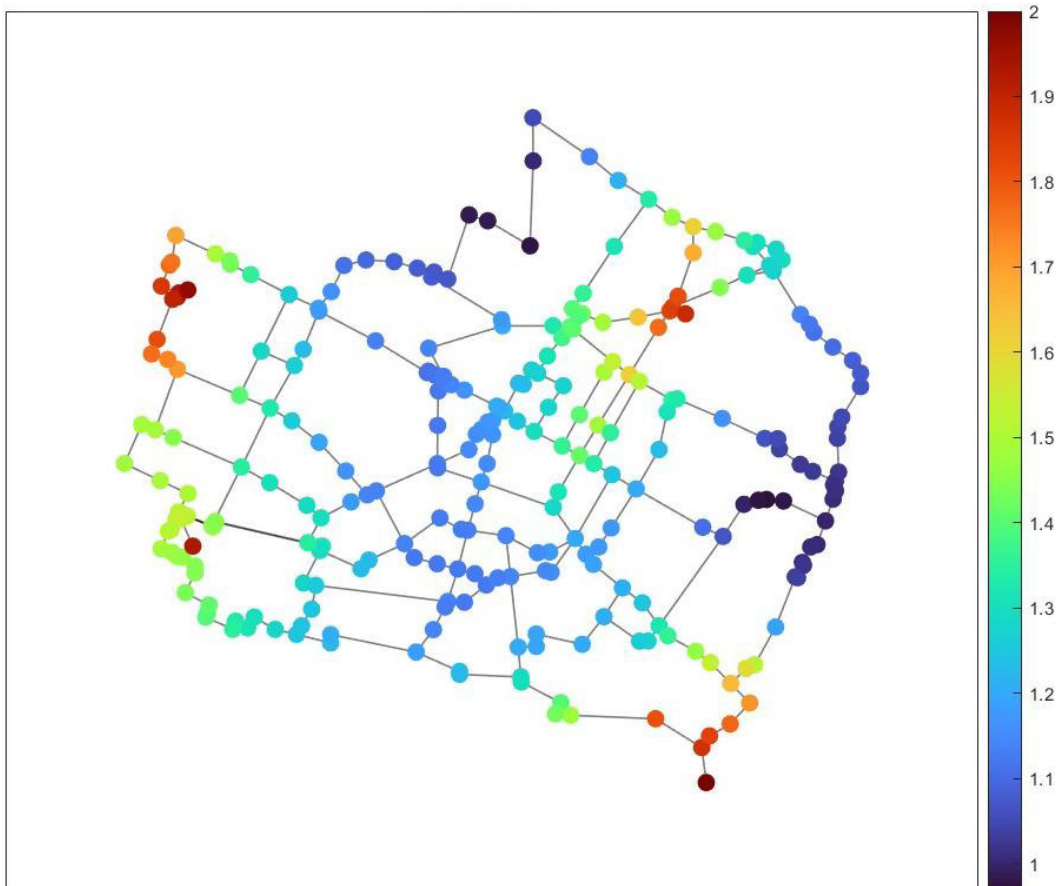


Figura 17. Pesos de los nodos en gráfica Modena: perspectiva hidráulica.

Respecto a la ponderación hidráulica, en la Fig. 17 se muestra que los nodos más relevantes son los que representan a los cuatro reservorios y sus vecinos cercanos, debido a que por su elevación topográfica y por su carga de presión tienen cargas piezométricas elevadas. A diferencia del caso topológico, bajo esta perspectiva es posible identificar cuatro regiones centrales, es decir, que la gráfica Modena presenta una ECP multicentro. En la Fig. 18 se presentan las sub-gráficas periféricas de ambos casos después de que los nodos centrales han sido identificados y sustraídos de las gráficas originales. A partir de ambas sub-gráficas serán generados un par de escenarios para poder comparar las bondades de las sectorizaciones.

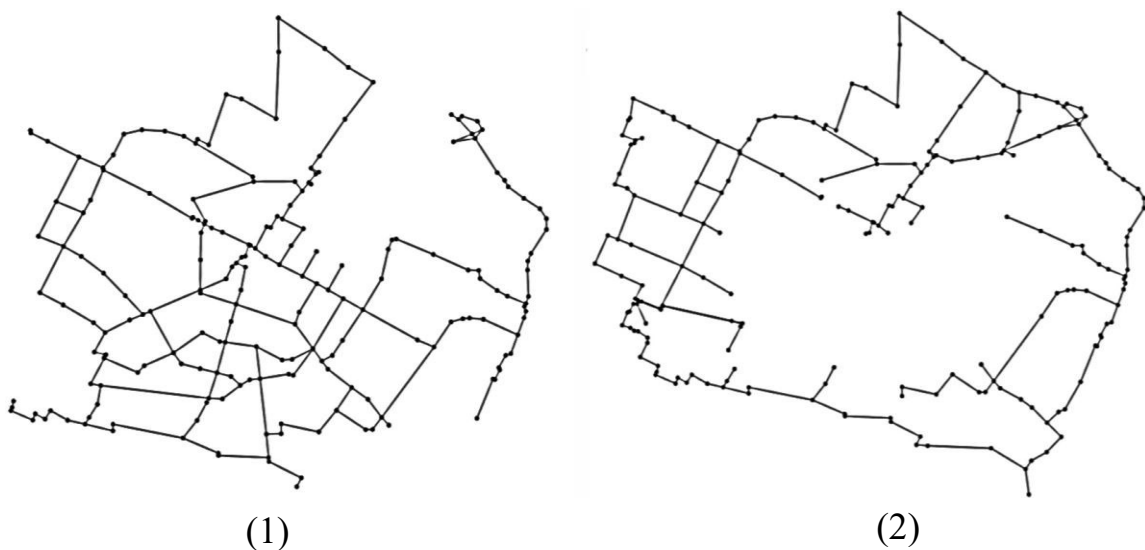


Figura 18. Sub-gráficas periféricas de la red Modena: (1) ponderación hidráulica; (2) ponderación topológica.

La Fig. 19 muestra las comunidades detectadas en la sub-gráfica periférica desde la perspectiva hidráulica, en un primer escenario se han detectado tres comunidades y en un segundo escenario se han detectado cuatro, el número de comunidades cambia conforme se modifique el valor del parámetro de resolución γ de la Ec. [8].

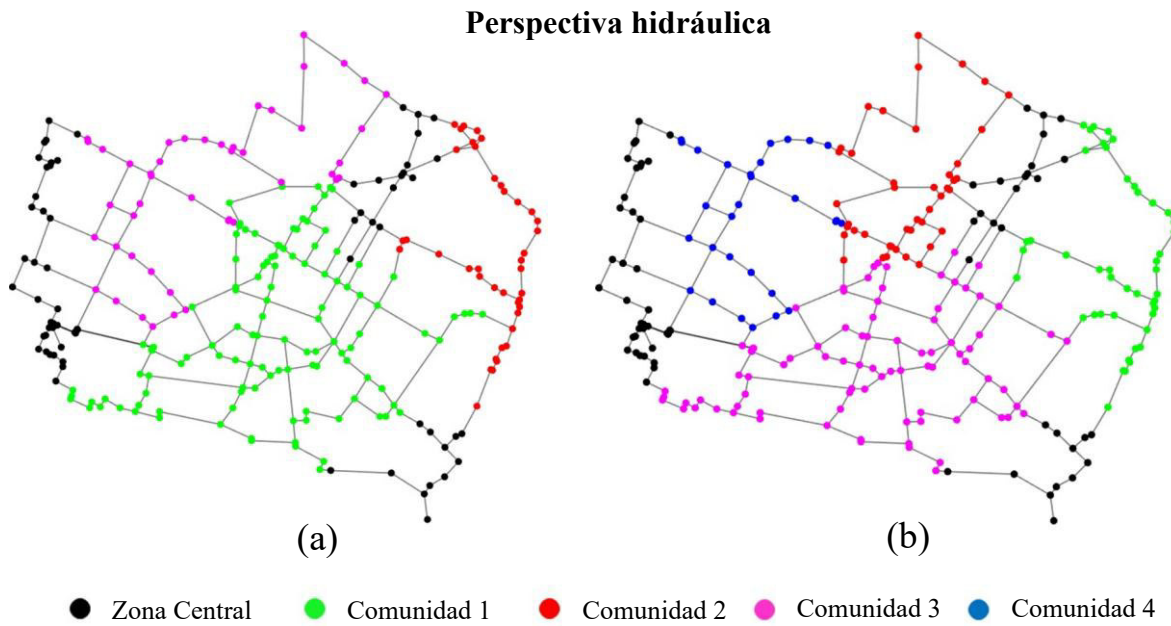


Figura 19. Comunidades en gráfica Modena bajo perspectiva hidráulica: (a) tres comunidades; (b) cuatro comunidades.

En la Fig. 19, los nodos centrales se muestran en color negro mientras que los nodos que integran a las comunidades se muestran en colores diferenciados. Numéricamente, los nodos centrales pertenecen a una única comunidad aun cuando se localizan en zonas separadas, como se observa en los casos (a) y (b) de la Fig. 19. En las mismas gráficas, la comunidad

situada en la zona derecha tiene una estructura casi idéntica, lo que evidencia una tendencia de los nodos de dicha región a agruparse. Un comportamiento análogo se observa en la comunidad correspondiente a la región centro-sur.

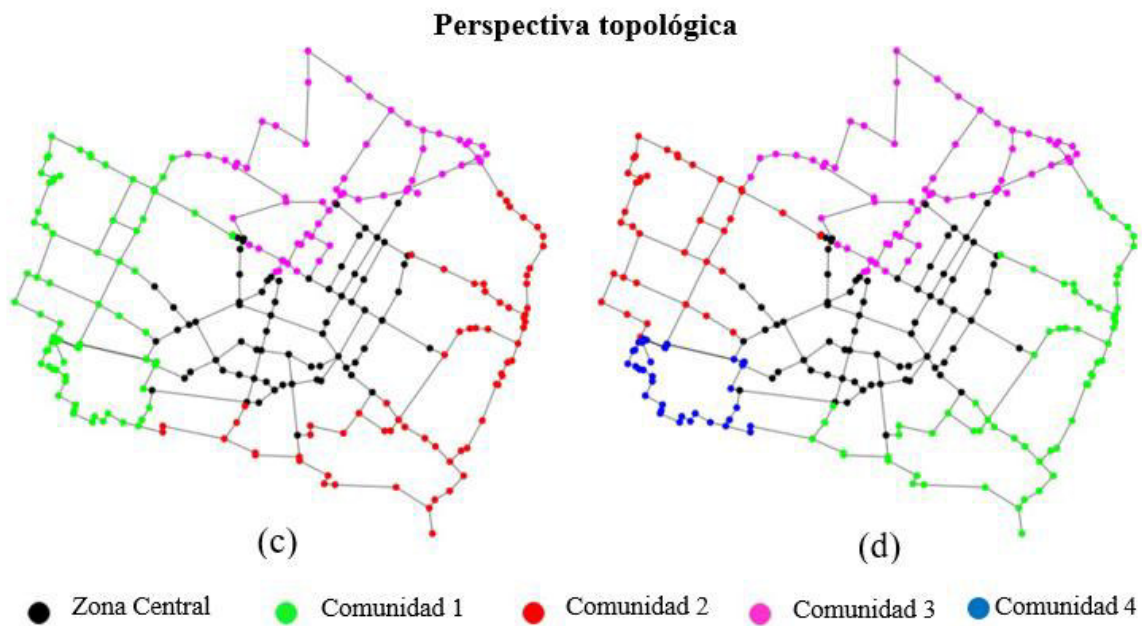


Figura 20. Comunidades en gráfica Modena bajo perspectiva topológica: (c) tres comunidades; (d) cuatro comunidades.

En la Fig. 20 se muestran las comunidades detectadas en las sub-gráficas periféricas topológicas, en la Fig. 20 (c) se han conformado tres comunidades mientras que en la Fig. 20 (d) se han conformado cuatro. En ambos casos, las comunidades de la parte inferior y de la parte superior de la gráfica permanecen constantes, lo que indica que los nodos de esas regiones tienden a conformar comunidades.

En la Fig. 21 y la Fig. 22 se representan las estructuras de los DMAs bajo las perspectivas hidráulica y topológica, respectivamente, una vez que se ejecutó la optimización hidráulica de las fronteras. Obsérvese que siguen la misma estructura que las comunidades de la Fig. 19 y la Fig. 20, pero además se resaltan los enlaces sobre los que se sitúan las válvulas de frontera.

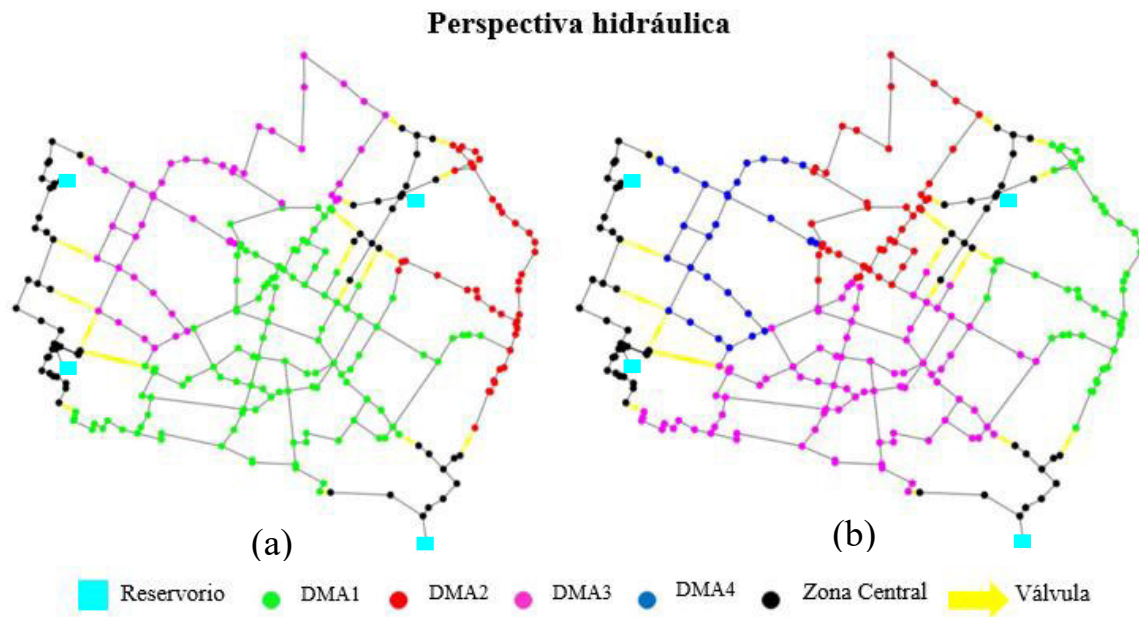


Figura 21. DMAs en RDA Modena bajo perspectiva hidráulica: (a) tres DMAs; (b) cuatro DMAs.

Perspectiva topológica

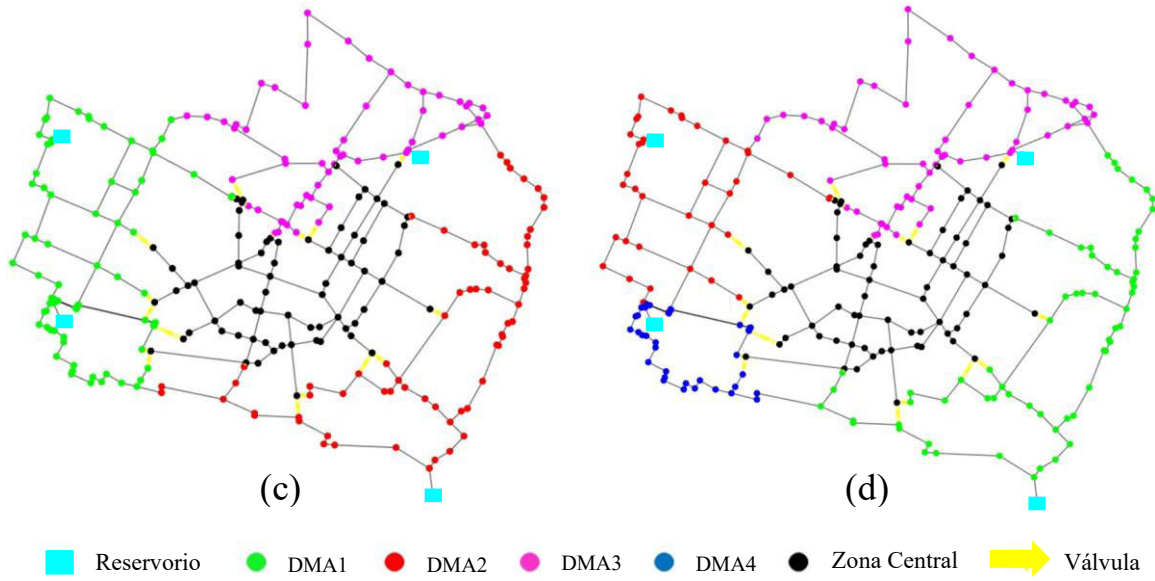


Figura 22. DMAs en RDA Modena bajo perspectiva topológica: (c) tres DMAs; (d) cuatro DMAs.

Las gráficas de las figuras 19 a 22 son representaciones gráficas impresas desde MATLAB mediante la función *plot*, por lo que en el modelo hidráulico de EPANET aún no se han actualizado los estados de las válvulas para evaluar el rendimiento hidráulico de la red modificada, por consiguiente, se ha desarrollado un algoritmo que toma como información de entrada los arreglos de índices y estados de tuberías devuelto por el PSO y actualiza el modelo hidráulico. Posterior a realizar las optimizaciones y las modificaciones correspondientes en los modelos de (a) a (d) se obtienen los resultados de la Tabla 3, que contiene las principales características de los DMAs propuestos. En la cual el costo de las sectorizaciones se calculó con base a la Ec. [11].

Tabla 3. Características de los DMAs en RDA Modena.

Caso	Ponderación	No. DMAs.	Modularidad Q	Válvulas			Presión (mca)		Costo Euros
				VCF	VA	Total	Media	Mínima	
(a)	Hidráulica	3	0.60	22	4	26	34.73	10.52	112,000
(b)	Hidráulica	4	0.67	24	4	28	34.69	10.65	123,900
(c)	Topológica	3	0.67	19	5	24	34.388	10.07	98,200
(d)	Topológica	4	0.70	20	5	25	34.79	10.96	100,800

En las columnas uno y dos de la Tabla 3 se señala el caso analizado y la perspectiva de ponderación de los nodos, respectivamente. En la columna tres se muestra el número de DMAs, en la columna cuatro se indican los valores de Modularidad Q , recuérdese que este parámetro es empleado como métrica para señalar la bondad de la gráfica dividida en comunidades. En todos los escenarios analizados $Q > 0.3$, calculado posteriormente a unir nuevamente la sub-gráfica periférica agrupada en comunidades junto con la sub-gráfica central, de acuerdo con el planteamiento de Newman (2004) esto indica que la gráfica presenta una estructura comunitaria significativa, por lo que la agrupación de los nodos dentro de los DMAs es favorable. Los casos (a) y (b) donde los nodos se ponderan desde la perspectiva hidráulica requieren de un mayor número de válvulas que los casos (c) y (d) donde la ponderación es con base en las medidas de centralidad debido a que numéricamente la zona central es considerada como una única comunidad, pero en la operación dicha región se conforma por cuatro subzonas y por lo tanto el número de válvulas requeridas para conformar a los DMAs es mayor.

La normatividad mexicana, adoptada como referencia en este estudio, recomienda una presión mínima de operación de 10 mca y una presión máxima de 50 mca, por lo que se considera un valor medio de 30 mca (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Hídricos, 2000). En la RDA Modena original, sin dividir en DMAs, la presión media es de 34.95 mca por lo que se encuentra ligeramente por encima de la media recomendada. No obstante, las presiones mínimas en la red se distribuyen de la siguiente forma:

- 53% entre 10 mca y 20 mca
- 33% entre 20 mca y 30 mca
- 8% entre 30 mca y 40 mca
- 6% entre 40 mca y 50 mca

Con base en la información anterior donde se informa que más de la mitad de las presiones se encuentran en el rango inferior dentro de los límites recomendados, se infiere que el modelo original presenta una alta sensibilidad ante la instalación de las VAs ya que dichas intervenciones podrían provocar que las presiones descendan por debajo de los 10 mca, valor establecido como presión mínima en el algoritmo de optimización. Debido a ello, el algoritmo determina que resulta más factible instalar una mayor cantidad de VCFs que de VAs con el fin de asegurar el suministro a los usuarios, aun cuando el costo de las sectorizaciones sea más elevado. De lo expuesto previamente, se desprende que los casos (a) y (b) requieren el mayor número de válvulas; si bien, desde el punto de vista numérico la zona central se considera como una única comunidad, en términos operativos dicha zona se conforma por cuatro partes separadas, lo que genera un mayor número de fronteras.

En el modelo hidráulico original la presión mínima registrada en un nodo es 11.15 mca, tras la optimización de los modelos (a) a (d), la presión mínima se mantiene por encima de 10 mca, en concordancia con lo establecido en la función de ajuste de la Ec. [11].

Derivado del enfoque metodológico adoptado, se destacan los siguientes puntos clave:

- El enfoque de ECP hace posible desvincular las regiones estratégicas de la red de las obras civiles necesarias para ejecutar el aislamiento de los DMAs.
- El enfoque de EC en las sub-gráficas periféricas de la red posibilita agrupar los nodos dentro de comunidades bien conformadas con base en sus características hidráulicas y estructurales.
- La optimización hidráulica de las fronteras de los DMAs mediante el algoritmo PSO contribuye a reducir el costo de las sectorizaciones asegurando la preservación del rendimiento hidráulico con base en los estándares establecidos.

Los algoritmos de detección de ECP convergen hacia una clasificación uniforme de los nodos dentro de sus respectivas clases, siempre que las simulaciones se ejecuten durante un periodo de tiempo suficiente para garantizar la estabilización de las condiciones operativas. El algoritmo *Fast-Greedy* para detección de comunidades tiende a converger también a un agrupamiento uniforme de los nodos dentro de los mismos grupos siempre que el parámetro de resolución que determina el tamaño de las comunidades se mantenga constante. Los algoritmos de detección demandan tiempos computacionales reducidos, en el orden de un par de minutos para la detección de ECP o prácticamente instantáneos para la detección de

EC. En contraste, el algoritmo PSO presenta tiempos de ejecución que varían entre quince y treinta minutos para el caso de la red Modena, que es de pequeña dimensión.

En consecuencia, puede inferirse que, al aplicarse en redes de mayor tamaño, los tiempos de ejecución de dicho algoritmo aumenten de manera significativa. En ese sentido, se propone evaluar diferentes valores de los parámetros de búsqueda del algoritmo con la finalidad de reducir los tiempos de optimización.

3.1 Definición de la Estructura del Enjambre

Como primer método, se propone orientar el enjambre inicial, $S_{i_{mxn}}$, hacia una solución deseada, con el fin de reducir la aleatoriedad en la distribución de las partículas. Como se mencionó previamente en la sección 2.4, *Algoritmo de optimización: Particle Swarm Optimization*, el PSO busca la convergencia hacia la solución óptima a partir de $S_{i_{mxn}}$, acercando iterativamente a las partículas hacia g_b^t , que representa la mejor solución global encontrada.

En ese sentido, se plantea que cada una de las partículas iniciales de $S_{i_{mxn}}$ contenga únicamente una VCF por cada DMA. De esta manera, considerando un diseño conformado por tres DMAs, donde cada uno de ellos dispone de 3 fronteras, el arreglo que representa a cada partícula adopta la siguiente estructura:

$$[\underline{1\ 0\ 0}\ \underline{0\ 1\ 0}\ \underline{0\ 0\ 1}]$$

De este modo, la estructura de la partícula en cuestión se compone de tres subpartes, cada una de las cuales contiene una VCF. En consecuencia, en $S_{i_{m \times n}}$, el parámetro m debe tener la dimensión necesaria para asegurar la existencia de, al menos, una partícula en la que únicamente una de las tres entradas correspondientes a cada distrito se encuentre abierta. Tomando como ejemplo la primera subparte de la partícula anterior resaltada en color azul, m debe tener una dimensión mínima de 3, de tal manera que se garantice la presencia de las siguientes configuraciones:

$$\begin{aligned} &[\underline{1\ 0\ 0}\dots] \\ &[\underline{0\ 1\ 0}\dots] \\ &[\underline{0\ 0\ 1}\dots] \end{aligned}$$

De esta forma, para cada subparte de la partícula se construye una matriz con valores unitarios en la diagonal principal. El mismo procedimiento se aplica a las dos subpartes restantes. Esta estrategia se adopta con el fin de buscar que la mejor posición global g_b^t contenga únicamente una VCF por distrito y, en consecuencia, que el resto de las partículas del enjambre converjan hacia dicha configuración.

Siguiendo el ejemplo del caso (d) de la Tabla 3, en el cual se requieren 25 válvulas de frontera, la matriz $S_{i_{mxn}}$ presenta la estructura de la Tabla 4.

Tabla 4. Estructura de $S_{i_{mxn}}$ del caso (d).

Partícula	Fronteras																								
	DMA1					DMA2					DMA3					DMA4									
1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Como se muestra en la Tabla 4, el parámetro m adopta la dimensión correspondiente al distrito que presenta el mayor número de fronteras, en este caso el DMA4. De este modo, se garantiza que en cada una de las partículas exista únicamente una VCF por distrito. La diagonal de valores unitarios, que representa las entradas abiertas, se resalta en color azul.

Siguiendo este planteamiento, los resultados de la optimización no han sido favorables, ya que la estructura de los DMAs obtenida resultada idéntica a la que se reporta en la Tabla 1, correspondiente al caso en el que no se orienta la matriz $S_{i_{mxn}}$ hacia una configuración

específica. Al orientar $S_{i_{mxn}}$ con una única VFC por distrito, se esperaba que las presiones en la red se mantuviesen por debajo de la presión requerida $P_{req(j,k)}$, dado que las presiones originales presentan valores medios a bajos; en ese contexto, la instalación de un número elevado de VAs tiende a generar un impacto significativamente negativo sobre este parámetro. Bajo este enfoque se esperaba obtener una solución con una única entrada por distrito; sin embargo, la solución obtenida resulta idéntica a la solución original. Esto se debe a que, a pesar de que cada partícula fue estructurada en subpartes, el algoritmo continúa evaluándolas como una sola partícula. En consecuencia, en la solución orientada de $S_{i_{mxn}}$ predominan las VCFs con el fin de preservar $P_{req(j,k)}$, de manera análoga a lo observado en las simulaciones originales.

Esta limitación motiva la adopción de un segundo enfoque, en el cual el proceso de optimización se aborda de forma independiente para cada distrito. Mediante esta descomposición, se busca reducir la dependencia entre fronteras de distintos DMAs y permitir que el algoritmo explore configuraciones alternativas que no pueden ser alcanzadas mediante la optimización conjunta del sistema completo.

3.2 Descomposición del Problema y Optimización por DMAs Individuales

Como segundo método se propone la optimización de cada distrito de manera individual, en lugar de obtener g_b^t como resultado de la optimización conjunta de las fronteras de todos los

DMAs, en este enfoque g_b^t se construye a partir de la conjunción de la mejor solución obtenida para cada distrito de forma independiente. De modo que en $S_{i_{mxn}}$, n adopta la dimensión correspondiente al número de fronteras de un único DMA.

La estructura de los DMAs analizados por este método se basa en las mismas comunidades que conforman a los DMAs de la Tabla 3, los cuales se optimizaron conjuntamente. En la Tabla 5 se contrastan los resultados entre dicha optimización conjunta y la optimización individual.

Tabla 5. Comparación entre optimización conjunta e individual.

Caso	No. DMA	No. Válvulas	Optimización conjunta		Optimización individual	
			Tipo de válvula			
			VCF	VA	VCF	VA
(a)	3	26	22	4	23	3
(b)	4	28	24	4	24	4
(c)	3	24	19	5	20	4
(d)	4	25	20	5	20	5

En la Tabla 5 se muestra que para conformar los casos (a) y (c) mediante una optimización individual se requiere de una VCF más que en la optimización conjunta. En los casos (b) y (d) se requiere el mismo número que en la solución conjunta. A continuación, se enlistan los motivos debido a los cuales se atribuye la obtención de los resultados anteriores.

- Falta de sinergia hidráulica entre DMAs: en la optimización individual cada distrito se diseña como un sistema independiente por lo que no se aprovechan las

interacciones favorables entre DMAs vecinos como reducir VCFs redundantes en el funcionamiento global del sistema.

- Soluciones localmente óptimas, pero globalmente ineficientes: al optimizarse por separado, la solución óptima local ignora que esa decisión puede generar sobrepresiones o déficits en distritos adyacentes, mientras que la optimización conjunta evalúa el impacto global de cada válvula y prefiere soluciones que minimizan el número total de intervenciones.
- Rigidez en el cumplimiento de restricciones: en la optimización individual las restricciones de presión y continuidad del flujo deben cumplirse estrictamente dentro de un DMA, pero no se permite que el funcionamiento de dicho distrito se apoye hidráulicamente en otros. En la optimización global se admite una redistribución de cargas piezométricas y demandas entre DMAs, en consecuencia, se toleran ligeras variaciones locales mientras el sistema global cumple.
- Naturaleza del espacio de búsqueda del algoritmo: en la optimización individual el espacio de búsqueda es más pequeño, pero más restrictivo, lo que favorece soluciones con más VCFs para cumplir con esas restricciones. En la optimización conjunta, el espacio es más amplio, permitiendo configuraciones con menos VCFs y mejor balance hidráulico.

3.3 Análisis de la Exploración y Explotación del Espacio de Búsqueda

De acuerdo con la Ec. [10], el parámetro w controla el equilibrio entre la exploración (búsqueda global) y la explotación (búsqueda local) dentro del espacio de búsqueda. Valores elevados de w permiten que las partículas recorran distancias mayores y, por lo tanto, exploren regiones más amplias del espacio de búsqueda. Por el contrario, valores bajos hacen que las partículas permanezcan más cercanas a la mejor posición encontrada. En ese sentido, la selección adecuada de w permite alcanzar un balance entre la exploración de nuevas soluciones y la explotación de las mejores soluciones identificadas, lo cual incrementa la probabilidad de convergencia hacia una solución óptima.

La función *particleswarm*, incluida en la paquetería básica de MATLAB, ejecuta la optimización numérica con base en los parámetros de búsqueda propuestos por Kennedy *et al.* (1995), Mezura-Montes *et al.* (2011) y Pedersen (2010). Dicha función emplea un esquema de inercia adaptativa, en el cual el parámetro w puede tomar valores dentro de un rango predefinido. En este esquema, si el valor de aptitud de una partícula no resulta favorable, se actualiza la inercia como $w^{t+1} = 2 * w^t$, lo que induce a la partícula a explorar el espacio de búsqueda. Por el contrario, cuando el valor de aptitud es favorable, la inercia se actualiza como $w^{t+1} = w^t / 2$, promoviendo la explotación de la región previamente identificada. En consecuencia, en este tercer método se propone evaluar distintos rangos de valores para w con el objetivo de analizar su influencia en el desempeño del proceso de optimización.

La función *particleswarm* configura por defecto la opción *InertiaRange*, la cual controla los valores del parámetro de inercia w dentro del intervalo $[0.1, 1.1]$. Eberhart *et al.* (1995) evaluó valores de w entre $[0.5, 2.0]$, mientras que Pedersen (2010) analizó valores comprendidos entre $[-0.1832, 0.6571]$. En este trabajo, el parámetro w se evalúa en el intervalo $[0.0, 2.0]$, considerando incrementos de 0.2, 0.5, 1 y 2. La Tabla 6, presenta los resultados obtenidos.

Tabla 6. Mejores soluciones obtenidas para diferentes intervalos del parámetro de inercia w .

Incremento	<i>Inertiara</i> range	Mejor solución (costo en euros)			
		Caso			
		(a)	(b)	(c)	(d)
Original	$[0.1, 1.1]$	107,482	111,378	116,064	152,208
0.2	$[0.0, 0.2]$	115,406	109,613	120,284	158,148
	$[0.2, 0.4]$	109,737	113,143	118,279	155,178
	$[0.4, 0.6]$	112,014	111,378	118,279	155,178
	$[0.6, 0.8]$	109,737	111,378	118,279	155,178
	$[0.8, 1.0]$	112,014	113,143	116,064	158,623
	$[1.0, 1.2]$	109,737	115,918	122,169	155,416
	$[1.2, 1.4]$	109,737	111,378	118,279	155,416
	$[1.4, 1.6]$	109,737	113,143	116,064	155,303
	$[1.6, 1.8]$	115,406	113,143	116,064	155,303
	$[1.8, 2.0]$	117,161	111,378	118,279	155,178
0.5	$[0.0, 0.5]$	109,737	113,143	116,064	155,303
	$[0.5, 1.0]$	115,406	115,918	125,134	164,088
	$[1.0, 1.5]$	113,341	115,918	118,279	155,178
	$[1.5, 2.0]$	117,571	115,918	118,279	155,178
1	$[0.0, 1.0]$	116,542	113,143	118,279	155,178
	$[1.0, 2.0]$	117,161	111,378	122,169	152,208
2	$[0.0, 2.0]$	111,066	111,378	118,279	155,178

En la Tabla 6 se resaltan en color azul los costos originales para cada escenario, obtenidos de acuerdo con la E. [10] empleando los valores de búsqueda establecidos por defecto de la función *particleswarm*. Del mismo modo, se resaltan en color azul las celdas correspondientes a los intervalos del parámetro w en los que se ha obtenido un valor igual al costo original. Las celdas resaltadas en color verde indican costos inferiores a la solución original, es decir, soluciones más favorables que los costos de referencia.

En el caso (a) no se ha logrado igualar ni mejorar el valor de la solución original. En el caso (b) se ha igualado el valor original en seis ocasiones y, en una de ellas, se ha obtenido una solución con un costo inferior al original. En el caso (c) se ha igualado el valor de la solución original en cuatro ocasiones. Por su parte, en el caso (d) el costo original se ha igualado en una ocasión. En todos los casos en los que el valor original ha sido igualado o mejorado, el parámetro de inercia w no adopta un valor único, sino que presenta variaciones dentro de distintos intervalos. Encontrar una solución con menor costo para un mismo número de válvulas implica una reducción en el número de las VCFs y un incremento en el número de las VAs, lo que conlleva a una disminución en el número de entradas a los DMAs. La solución original del caso (b) requiere de 24 VCFs y 4 VAs, mientras que la nueva solución obtenida empleando valores del rango $[0.0, 0.2]$ requiere de 23 VCFs y 5 VAs, lo que representa una reducción de 1,765 euros. Cabe destacar que distintos rangos del parámetro de inercia pueden conducir al mismo valor de la mejor solución; sin embargo, el número de iteraciones necesarias para alcanzar el mismo resultado puede variar.

En las figuras 23 a 26 se muestra el número de iteraciones necesarias para alcanzar la mejor solución en los cuatro casos (a), (b), (c) y (d), considerando incrementos de 0.2 del parámetro de inercia w , rango en el cual se obtuvo una solución más favorable que la original en el caso (b). En todas las figuras se resalta mediante marcador diferenciado el valor correspondiente a la mejor solución encontrada. En todos los casos se presentan once puntos de datos: diez correspondientes a las evaluaciones de los valores del parámetro de inercia y uno asociado al valor por defecto de la función *particleswarm*; sin embargo, en algunas figuras varios de estos puntos se encuentran solapados, por lo que visualmente puede apreciarse una menor cantidad.

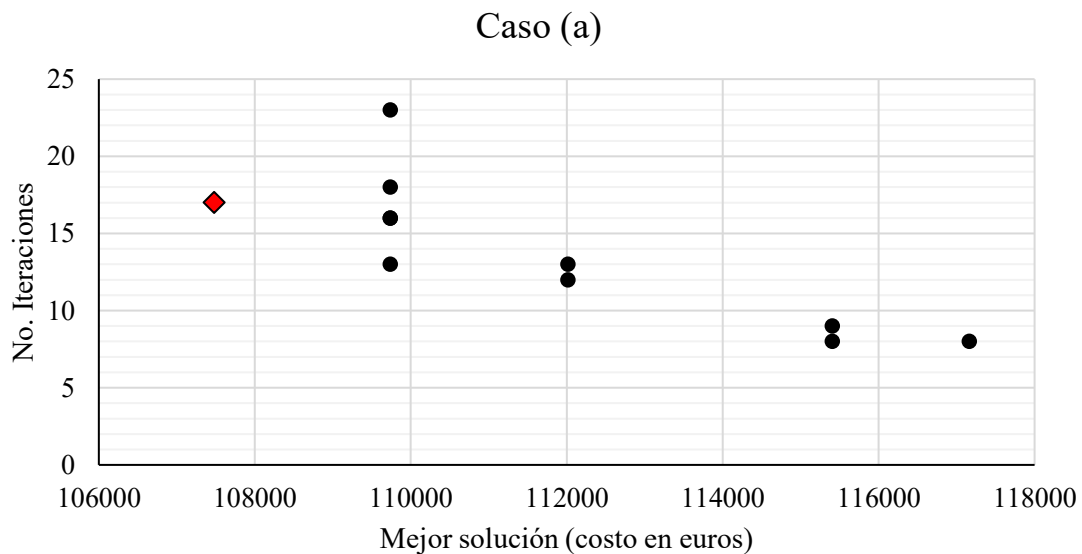


Figura 23. Número de interacciones vs mejor solución: caso (a).

En la Fig. 23, correspondiente al caso (a), la mejor solución se alcanzó en 17 iteraciones empleando los valores por defecto del parámetro de inercia de la función *particleswarm*, definidos en el intervalo $[0.1, 1.1]$. En algunas simulaciones, la mejor solución se obtuvo en un mínimo de 8 iteraciones, dichos resultados no alcanzaron el costo mínimo registrado entre todas las simulaciones.

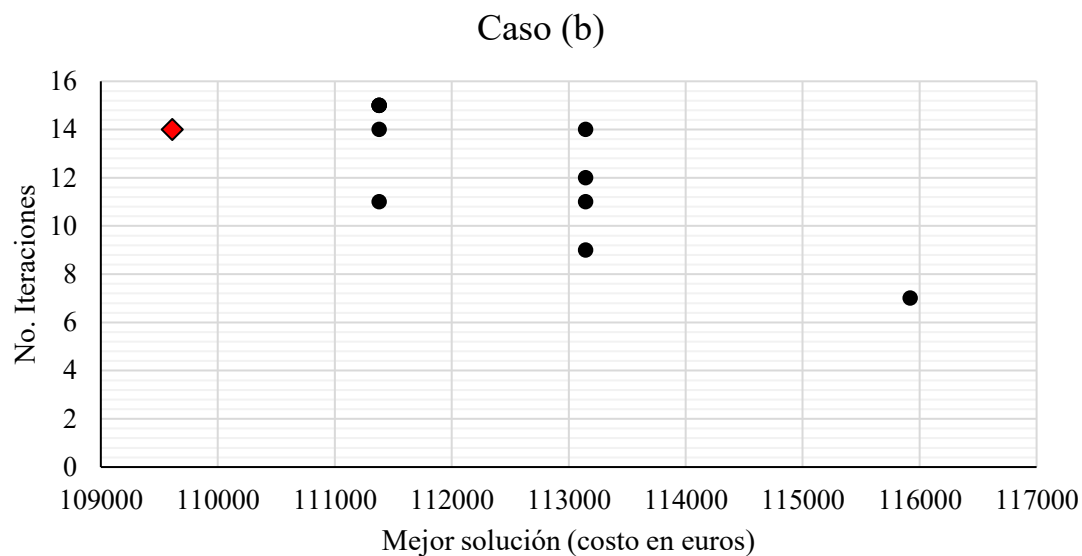


Figura 24. Número de interacciones vs mejor solución: caso (b).

En la Fig. 24, correspondiente al caso (b), se encontró en catorce iteraciones una solución más favorable que la solución original, encontrada en once iteraciones. Además, considerando incrementos de 0.2 se igualó el valor original hasta en cuatro ocasiones dentro de intervalos y número de iteraciones variados.

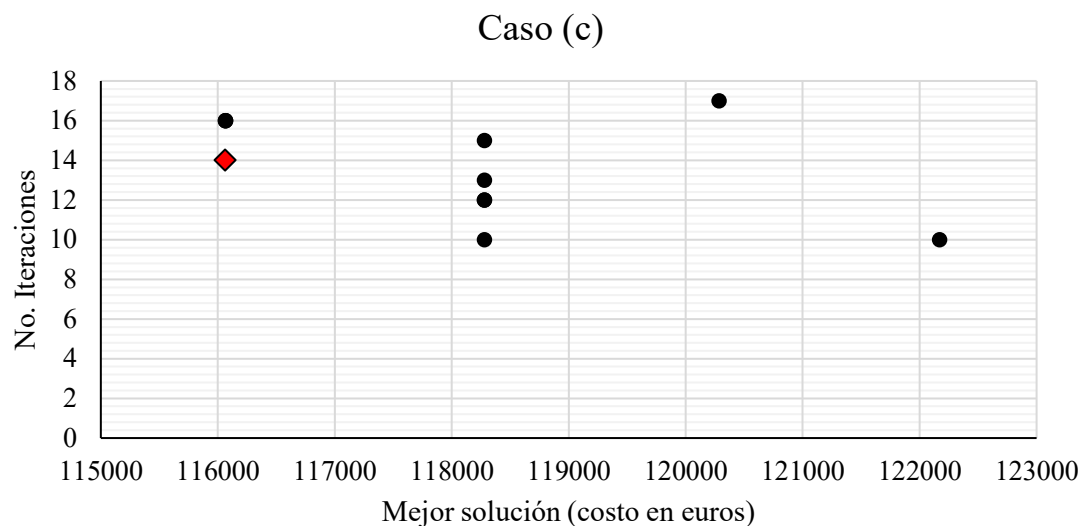


Figura 25. Número de interacciones vs mejor solución: caso (c).

En la Fig. 25, correspondiente al caso (c), el valor de la mejor solución se alcanzó en una ocasión en 14 iteraciones, dentro del intervalo del parámetro de inercia $[1.6, 1.8]$, y en tres ocasiones en 16 iteraciones, correspondientes a los intervalos $[0.8, 1.0]$, $[1.4, 1.6]$ y $[1.6, 1.8]$.

En la Fig. 26, correspondiente al caso (d), en algunas simulaciones el valor de la mejor solución se encontró en un mínimo de 8 iteraciones, pero sin alcanzar el costo mínimo registrado entre todas las simulaciones.

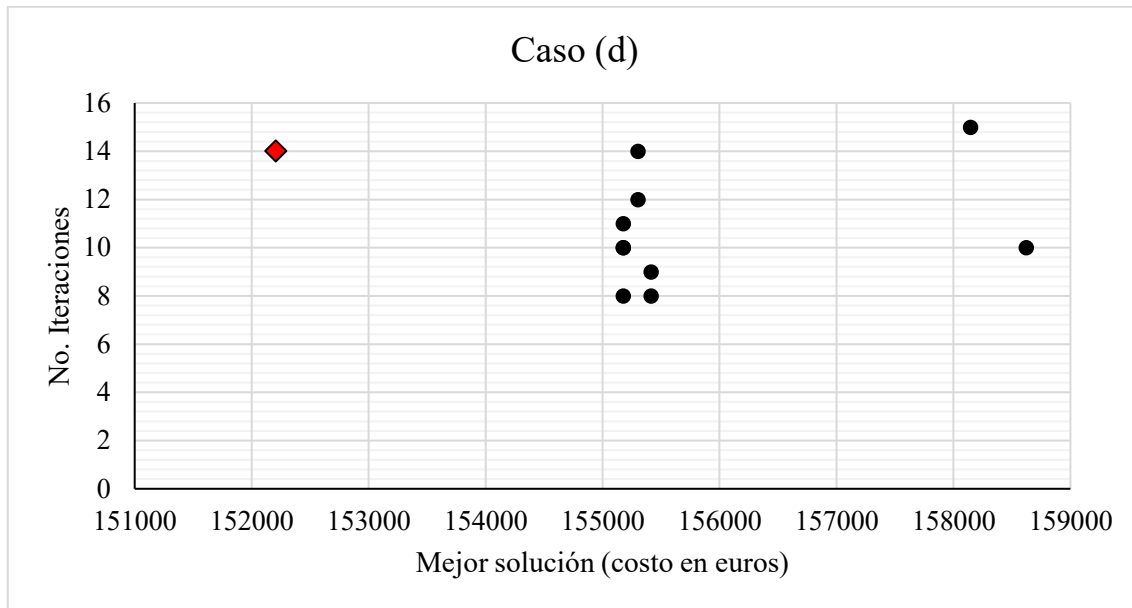


Figura 26. Número de interacciones vs mejor solución: caso (d).

Del análisis de los resultados se desprenden algunas observaciones metodológicas relacionadas con el desempeño del algoritmo, las cuales se presentan a continuación.

- La velocidad de convergencia no determina la calidad de la solución: alcanzar una solución en pocas iteraciones no garantiza obtener el costo mínimo global.
- Más iteraciones no implican mejores resultados: en varios casos, la mejor solución no se alcanzó en un número intermedio de iteraciones, mientras que ejecuciones más largas no produjeron mejoras adicionales.
- El parámetro de inercia w influye en la trayectoria de búsqueda: distintos intervalos de w pueden conducir a soluciones equivalentes con diferentes dinámicas de convergencia, por lo que existen múltiples trayectorias hacia soluciones similares.

En consecuencia, considerando que el valor de la mejor solución se alcanzó en distintos intervalos dentro del rango $[0.0, 2.0]$, y dada la existencia de múltiples trayectorias de convergencia hacia soluciones equivalentes, en el caso de estudio real se adoptará dicho intervalo ampliado para el parámetro de inercia w , en lugar del rango por defecto $[0.1, 1.1]$ establecido por la función *particleswarm*.

CAPÍTULO IV

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4. DESCRIPCIÓN DE REDES DE AGUA TEÓRICAS

Tal como se describe en la Sección 3, *Caso de estudio teórico de la RDA Modena*, dicho caso de estudio se compone de los elementos más básicos de un modelo hidráulico: nodos, enlaces y reservorios. A partir de ello, se seleccionaron otros casos de estudio teóricos de mayor complejidad con el propósito de complementar el ajuste de la metodología. Los casos seleccionados forman parte del catálogo de redes de la EPANET-Matlab-Toolkit y fueron definidos con base en tres criterios. El primer criterio de selección es contar con una mayor cantidad de nodos que la RDA Modena (272 nodos), para la cual el tiempo de ejecución del algoritmo de optimización PSO oscila entre 15 y 20 minutos, mientras que el algoritmo de búsqueda de EC es instantáneo y el de detección de ECP requiere de apenas un par minutos. Esto indica que la carga computacional y temporal asociada a dicho caso de estudio es relativamente baja. Por lo tanto, se considera que existe un margen suficiente para trabajar con RDAs de mayor dimensión que demanden una mayor carga computacional. El segundo criterio de selección corresponde a la variedad en la distribución espacial de los nodos, mientras que el tercer criterio considera la diversidad en los rangos de presión. En algunos casos, las redes se encuentran configuradas para simulaciones en estado estacionario, es decir, para una única hora específica, por lo que no incluyen una curva de variación horaria de la demanda. En tales casos, se añade de manera aleatoria uno de los 41 patrones de consumo proporcionados por el organismo operador de la ciudad de Guanajuato, los cuales representan variaciones reales de consumo de la ciudad. De este modo, las RDAs

originalmente configuradas en régimen estático se adaptan para simulaciones dinámicas con una duración de 24 horas.

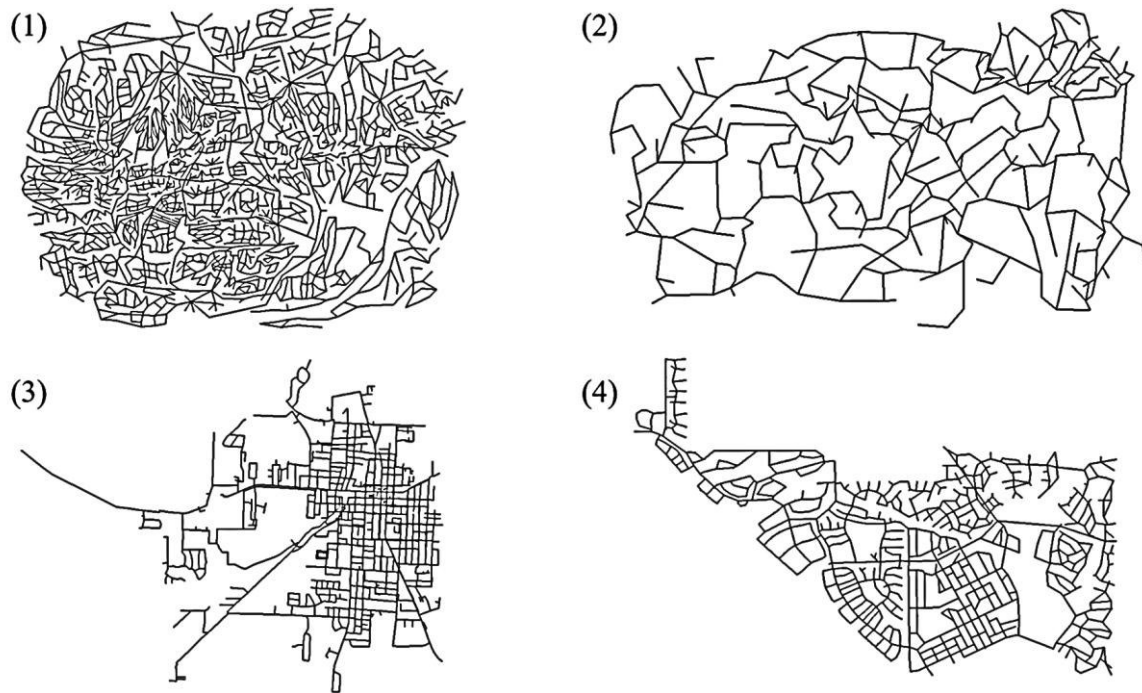


Figura 27. Casos de estudio teóricos: (1) Exnet; (2) RuralNetwork; (3) ky2; (5) wolf-initial-fig.

La Fig. 27 muestra la estructura de los casos de estudio seleccionados; en ella se observa que las estructuras de las RDAs seleccionadas son variadas e incluyen configuraciones malladas, ramificadas y mixtas. En la Tabla 7 se presentan las características principales de las redes.

En algunos casos, las unidades de los modelos hidráulicos se encuentran configurados en el Sistema Inglés de unidades; para estos casos se realizó la conversión al Sistema Internacional de Unidades con el fin de uniformizar el análisis bajo un mismo sistema de medida. Cabe resaltar que, al modificar el sistema de unidades en EPANET, el programa no realiza automáticamente una conversión de las unidades. Es decir, si se considera un diámetro de 1 pulgada y posteriormente se cambia el sistema de unidades al Sistema Internacional, el valor del diámetro no se transforma a 0.0254 metros, sino que permanece como 1 metro. En consecuencia, la información presentada en esta sección corresponde a valores que han sido previamente convertidos al Sistema Internacional de Unidades.

Tabla 7. Características de los casos de estudio empleados para complementar el ajuste de la metodología.

Caso	Nodos	Reservorios	Tanques	Tuberías	Bombas	Válvulas	Media de presiones (mca)
(1) Exnet	1,891	2	0	2,465	0	2	12-48
(2) RuralNetwork	379	2	0	476	0	0	45-64
(3) ky2	811	1	3	1,124	1	0	12-50
(4) wolf-initial-fig	1,782	4	0	1,985	6	4	28-91

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las optimizaciones, las cuales se ejecutaron exitosamente.

4.1 Resultados de las Optimizaciones

A continuación, se describen los resultados obtenidos mediante las optimizaciones ejecutadas en el conjunto de RDAs teóricas para validación.

Tabla 8. Resultados de las optimizaciones en los casos de estudio teóricos de validación de la metodología.

Caso	ECP	Modularidad Q	No. DMAs	Tiempo Optimización	Válvulas			Costo (euros)
				(horas)	VCF	VA	Total	
(1)	H	0.8052	7	3.85	24	9	33	923,032
Exnet	T	0.7574	6	3.4	22	9	31	794,582
(2)	H	0.7317	5	0.5	4	22	26	593,802
RuralNetwork	T	0.6948	5	0.37	3	30	33	683,533
(3)	H	0.7605	6	2.58	7	43	50	97,187
ky2	T	0.7469	6	3.15	19	41	60	152,691
(4)	H	0.8085	6	0.85	7	9	16	221,517
wolf-initial-fig	T	0.8012	6	1.63	11	24	35	376,818

En la Tabla 8, la primera columna muestra el caso de estudio; la segunda indica la perspectiva de ponderación de los nodos empleada para la detección de ECP, donde H corresponde a la ponderación hidráulica y T a la ponderación topológica. La tercera columna presenta el valor de Modularidad Q de la gráfica dividida en comunidades, el cual en todos los casos es superior a 0.6; recuérdese que valores mayores a 0.3 indican que las comunidades están adecuadamente conformadas. La cuarta columna indica el número de

DMAs obtenidos. En la quinta columna se reporta el tiempo de las optimizaciones: para la red Modena, dicho tiempo alcanza hasta 0.33 minutos; como era de esperarse, en redes de mayor dimensión el tiempo de optimización aumenta, superando las tres horas en el caso (1) Exnet, que presenta la mayor cantidad de nodos (1891) entre los casos de validación, así como en el caso (3) ky2, el cual requiere el mayor número de válvulas de frontera. Las columnas siete a nueve presentan el número y tipo de válvulas requeridas para el aislamiento de los DMAs; la proporción entre las VCFs y las VAs varía según el caso de estudio. Por ejemplo, en el caso (1) Exnet se requieren 24 VCFs y 9 VAs en el escenario de ponderación hidráulica, y 22 VCFs y 9 VAs en el escenario de ponderación topológica; en este caso, la proporción de VCFs con respecto a las VAs es superior a dos a uno. En contraste, en los casos (2) a (4) el número de VAs es mayor que el de VCFs, siendo el caso (3) RuralNetwork aquel en el que la presencia de las VAs es más notable, ya que requiere únicamente de 7 VCFs y 43 VAs en el escenario de la ponderación hidráulica, y 19 VCFs y 41 VAs en el escenario topológico.

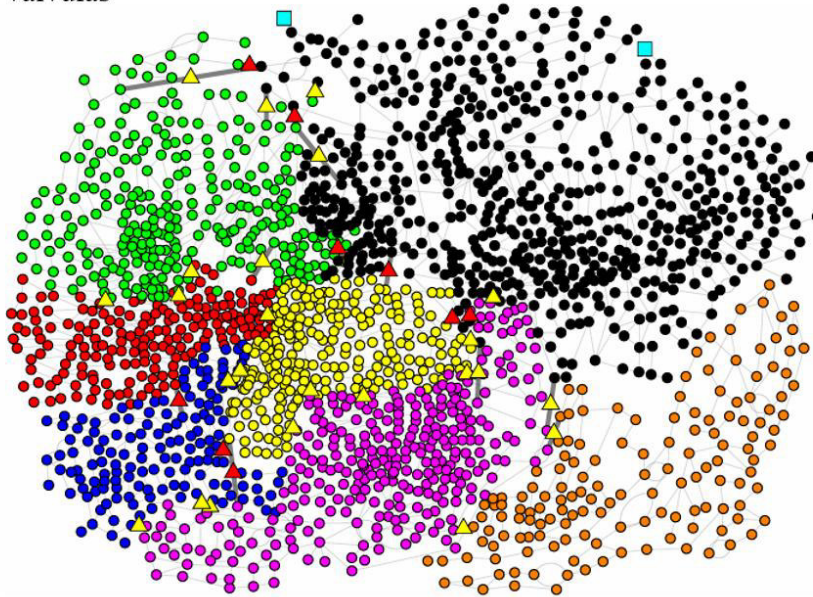
En la última columna de la Tabla 8 se muestra el costo de las sectorizaciones. El caso (3) ky2 exhibe los costos más bajos en ambos escenarios, hidráulico y topológico, a pesar de requerir el mayor número de válvulas de frontera. En contraste, el caso (1) Exnet presenta los costos de sectorización más elevados, particularmente al compararse con los costos correspondientes a ambos escenarios del caso (2) RuralNetwork, las cuales requieren un número similar de válvulas, así como la sectorización basada en la ECP topológica del caso (4) wolf-initial-fig, que incluso demanda de un mayor número de válvulas. Esta diferencia se explica porque, como se describió previamente, en las sectorizaciones de la red Exnet el

número de VCFs es mayor que el de VAs en una proporción mayor a dos a uno. En las figuras 28 a 31 se presentan las sectorizaciones de los casos de estudio de validación.

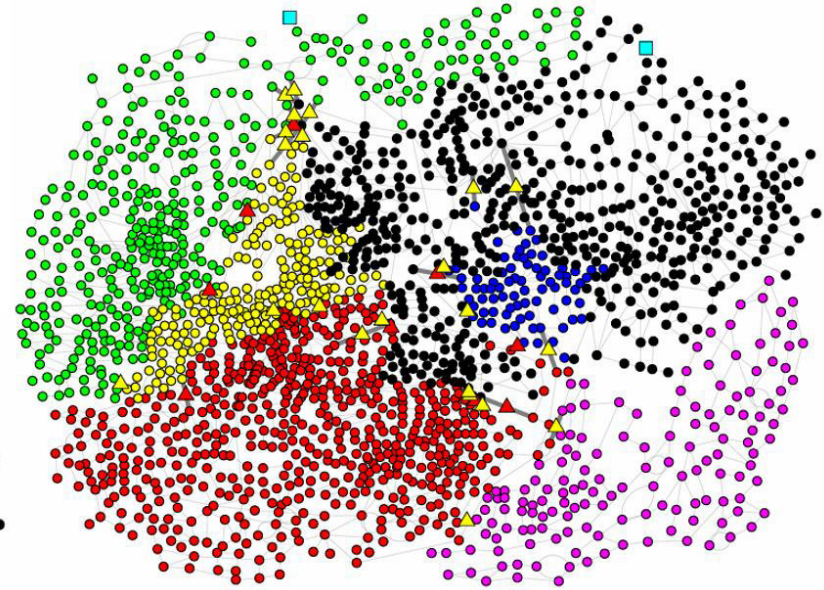
Caso (1) **Exnet**

Características:

- 1891 nodos
- 2461 tuberías
- 2 reservorios
- 2 válvulas



ECP Hidráulica



ECP Topológica

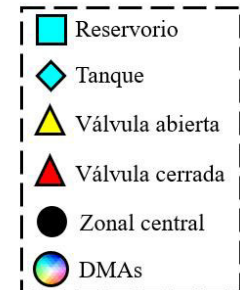


Figura 28. Sectorización de caso de estudio de validación (1) Exnet.

Caso (2) **RuralNetwork**

Características:

- 379 nodos
- 476 tuberías
- 2 reservorios

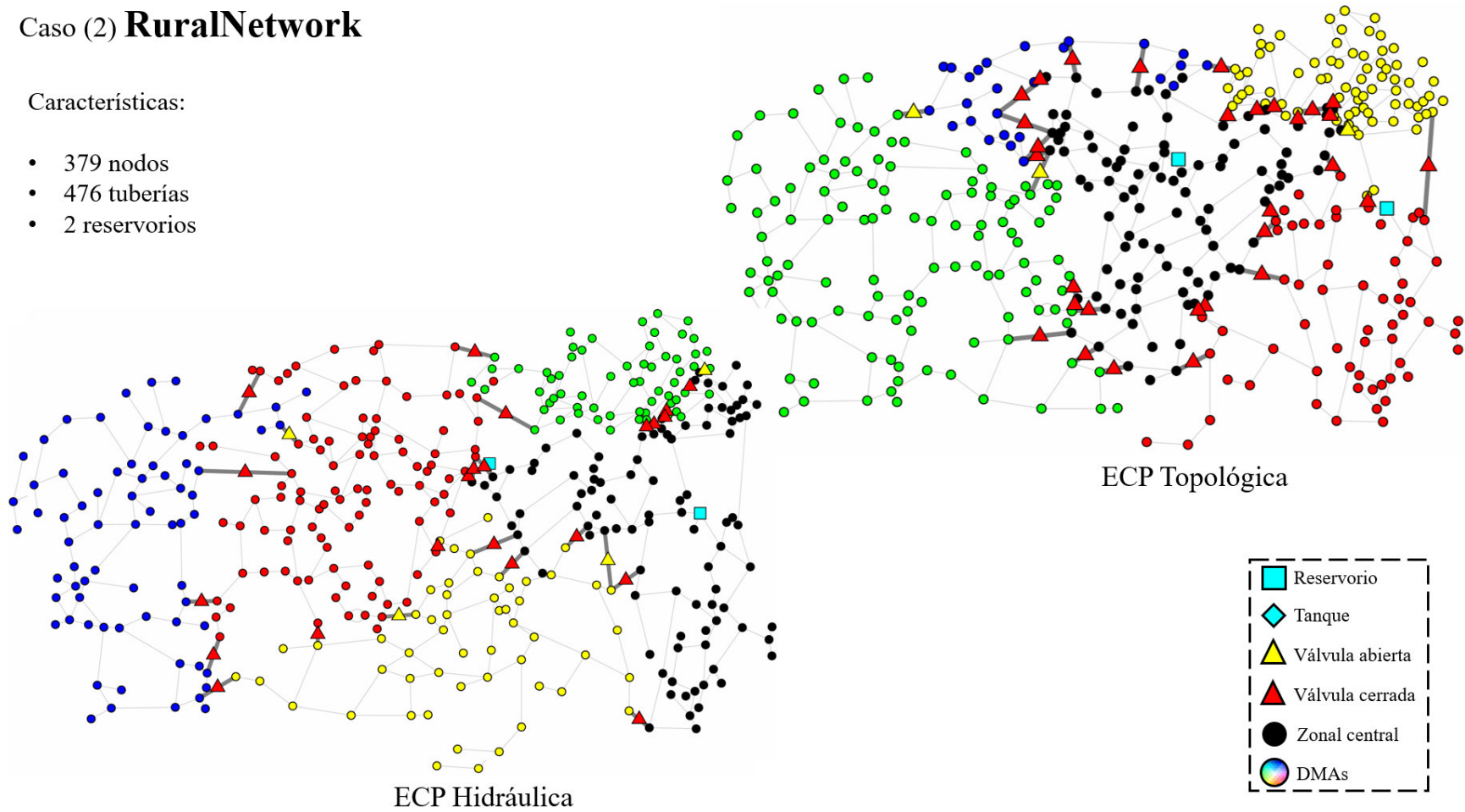


Figura 29. Sectorización de caso de estudio de validación (2) RuralNetork.

Caso (3) **Ky2**

Características:

- 811 nodos
- 1124 tuberías
- 1 reservorios
- 3 tanques
- 1 bomba

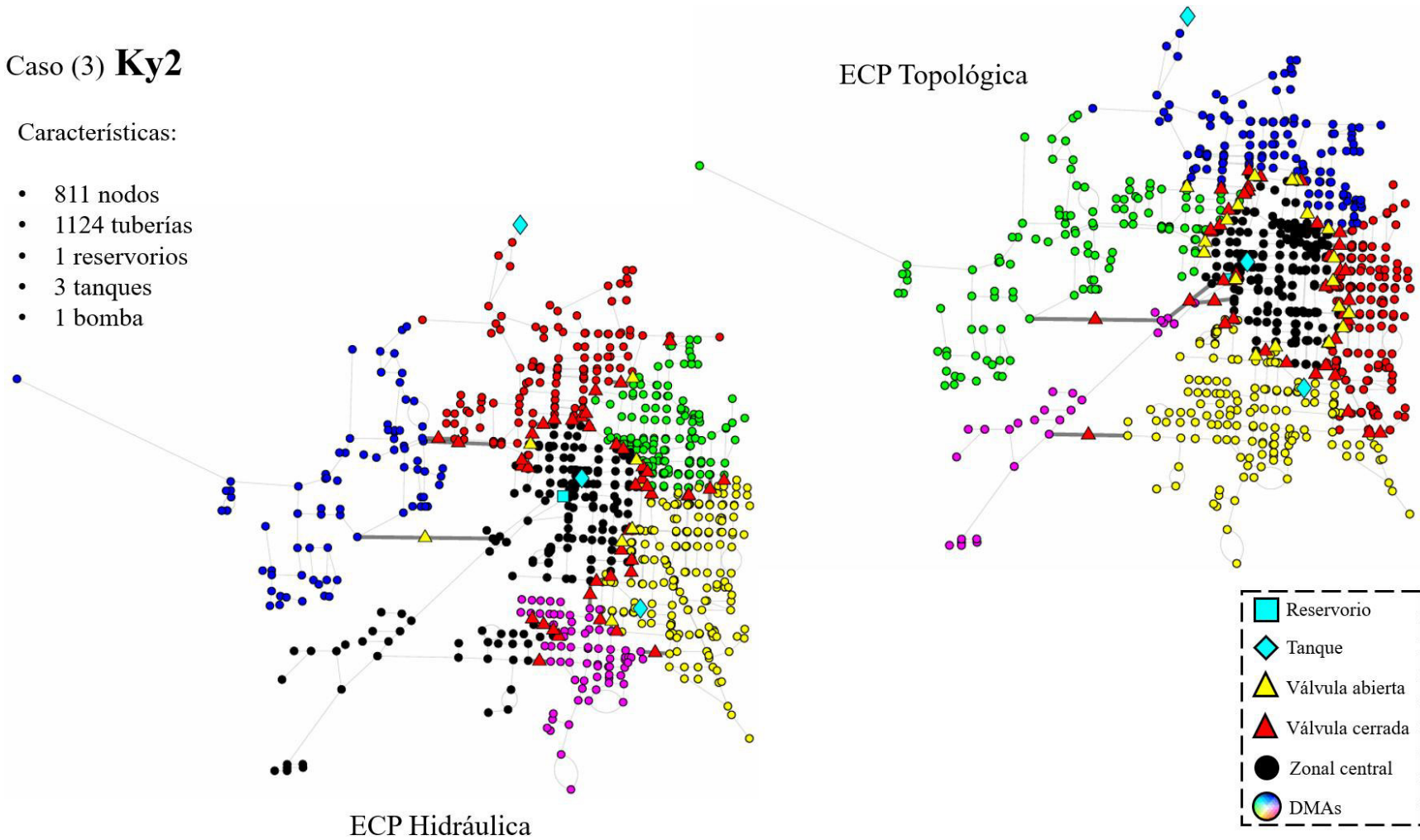


Figura 30. Sectorización de caso de estudio de validación (3) ky2.

Caso (4) **wolf-initial-fig**

Características:

- 1782 nodos
- 1985 tuberías
- 4 reservorios
- 4 válvulas
- 6 bombas

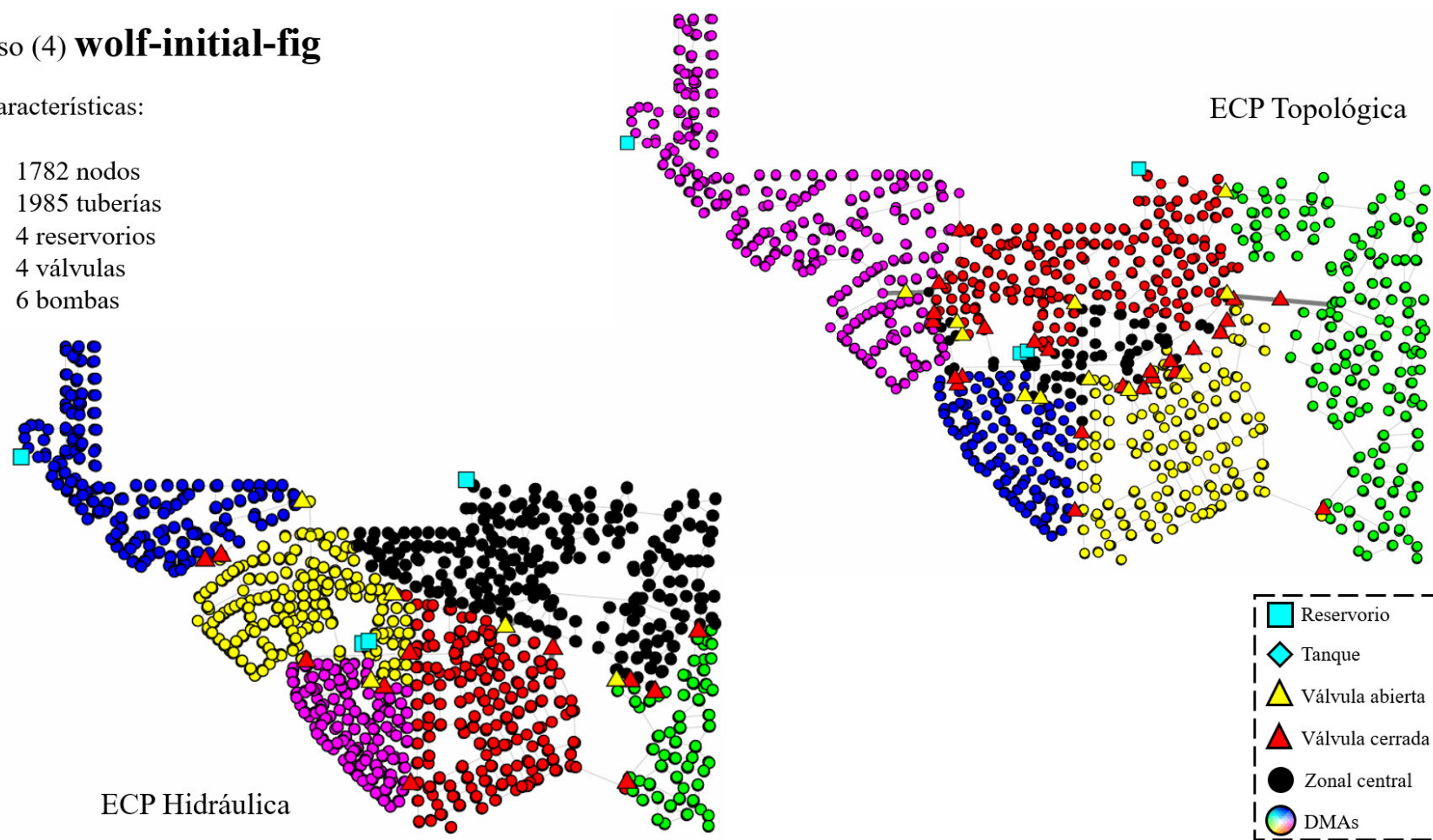


Figura 31. Sectorización de caso de estudio de validación (4) *wolf-initial-fig*.

4.2 Análisis de las Optimizaciones

En las figuras 28 a 31, la leyenda indica que la zona central se representa mediante nodos de color negro; en contraste, los DMAs se muestran a través de nodos en colores diferenciados. Las fuentes de agua se señalan en color azul cian; los nodos de forma cuadrada representan reservorios y los de forma romboidal, tanques. Las válvulas de frontera abiertas (VCFs) se presentan mediante triángulos amarillos, mientras que las válvulas cerradas (VAs) se muestran como triángulos rojos. Con base en las optimizaciones ejecutadas en los casos de validación se desprenden algunas observaciones metodológicas.

En los modelos hidráulicos, los enlaces pueden representar tuberías, válvulas y bombas. En EPANET, tanto las tuberías y válvulas incluyen la característica de diámetro, en contraste, las bombas no la poseen. En MATLAB, la función *getLinkDiameter* permite obtener el diámetro de los enlaces, asignando un valor igual a cero en el caso de las bombas. Por ende, con base en la Ec. [11], el costo asociado a las fronteras localizadas sobre enlaces correspondientes a bombas es nulo; no obstante, desde el punto de vista operativo, el costo de instalar una válvula de frontera no puede ser cero. En consecuencia, se recomienda descartar aquellas fronteras que se localicen sobre una bomba, ya que no es factible ni recomendable instalar válvulas inmediatamente aguas arriba o aguas debajo de estos elementos, por razones hidráulicas y operativas.

La instalación de una VA aguas arriba de una bomba interrumpiría completamente el flujo de agua, dejando a la bomba fuera de operación. Por su parte, la instalación de una VA aguas

abajo contradice el propósito hidráulico de la bomba, cuya función es añadir energía al sistema; colocar una VA inmediatamente después del punto de inyección de energía implica un desperdicio económico y energético. Adicionalmente, las bombas incorporan mecanismos de cierre propios, si bien es posible interrumpir el suministro mediante el apagado de la bomba, emplearla como elemento de cierre permanente representa un uso inadecuado de este equipo. Dado que la función de los DMAs es aislar zonas de consumo, y considerando que una bomba actúa como una frontera energética y no como una frontera hidráulica, la instalación de válvulas inmediatamente aguas arriba o aguas debajo de una bomba no mejora el control de fugas ni la medición del caudal, por lo que no cumple con los objetivos de la sectorización y no se considera una solución factible. Por ende, se recomienda excluir a las bombas de los enlaces candidatos a conformar fronteras entre DMAs.

Se destaca que cuando la simulación del modelo hidráulico en EPANET no es exitosa, debido a errores en las condiciones operativas o en la modelación, el algoritmo PSO no es ejecutable. En consecuencia, para llevar a cabo un proceso de optimización adecuado, el modelo hidráulico debe ser funcional.

La aplicación de los algoritmos de detección de ECP puede conducir, en algunos casos, a la identificación de nodos con peso reducido ubicados dentro de las zonas denominadas como centrales, lo que propicia la generación de distritos de pequeña dimensión sin beneficios operativos claros y con un impacto negativo en los costos de sectorización. Para mitigar este efecto, los algoritmos fueron ajustados con el fin de identificar e integrar estos nodos periféricos dispersos en las zonas centrales, mejorando así la coherencia espacial y la factibilidad de los DMAs resultantes.

Tanto el caso de Modena, como los casos empleados para la validación de la metodología corresponden a redes teóricas, las cuales no permiten incorporar restricciones ni criterios urbanísticos propios de sistemas reales. En consecuencia, con el objetivo de evaluar la aplicabilidad práctica de la metodología propuesta, en el siguiente capítulo se presenta su implementación en un caso de estudio real, donde es posible considerar de manera explícita tanto las condiciones operativas de una RDA como las condiciones urbanísticas de la ciudad a la que abastece.

CAPÍTULO V

CASO DE ESTUDIO REAL RDA SIMAPAG

5. CARACTERÍSTICAS DE LA RDA SIMAPAG

La red SIMAPAG (Fig. 32) es un caso real de gran extensión. Dicha red recibe su nombre del organismo operador responsable de su administración: el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG), ubicado en la ciudad de Guanajuato, Gto., México.

En la Fig. 32 se muestra la estructura de la red SIMAPAG, la cual presenta una configuración predominantemente ramificada a nivel general. No obstante, es posible identificar algunas regiones malladas dentro de la red, particularmente en zonas correspondientes a ciertos fraccionamientos. Esto se debe a que el modelo hidráulico incluye no solo a la ciudad de Guanajuato, sino también a diversas comunidades en las zonas conurbadas, principalmente ubicadas en la zona sur del sistema donde también se sitúan algunos de los pozos que lo abastecen.

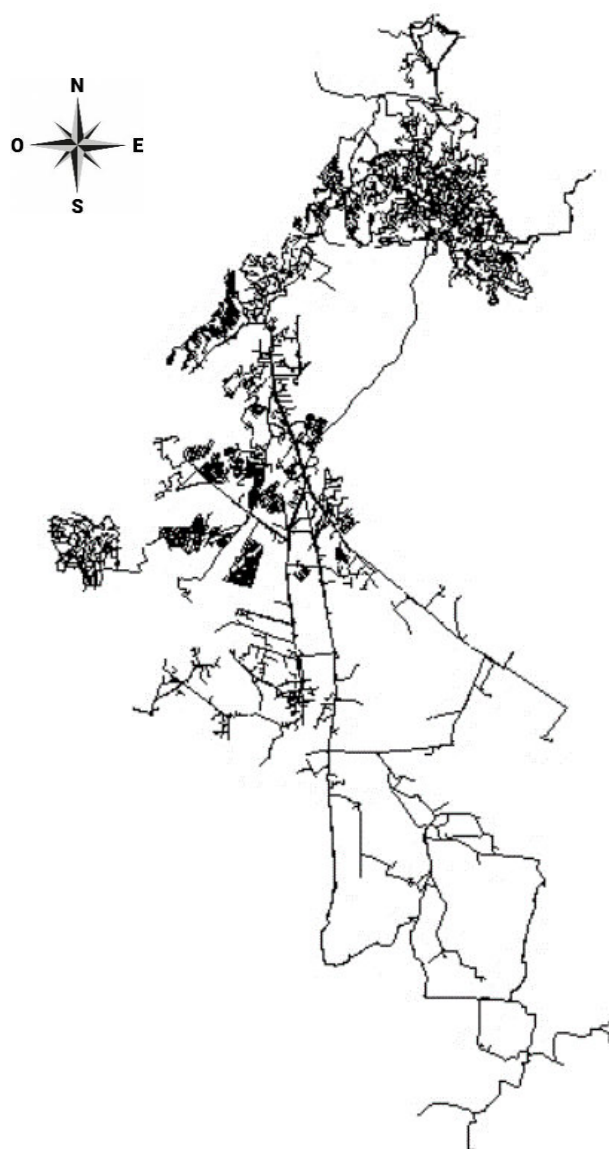


Figura 32. Modelo hidráulico de la RDA SIMAPAG.

Este caso de estudio permite aprovechar el acceso a la información cartográfica de los rasgos territoriales de la ciudad, lo que posibilita la incorporación de características urbanísticas en un nuevo escenario, donde la zona central de la red se define con base en la actividad

socioeconómica urbana. Dicha información cartográfica se encuentra disponible en la página web del Instituto Municipal de la Planeación de Guanajuato (IMPG). En la Tabla 9 se compara la cantidad de componentes que conforman a las redes Modena (caso teórico inicial) y SIMAPAG (caso real), con la final de evidenciar la magnitud del escalamiento de la metodología propuesta.

Tabla 9. Tipo y número de componentes las RDAs Modena y SIMAPAG.

Componente	Caso de estudio	
	Modena	SIMAPAG
Nodos	268	21,791
Reservorios	4	35
Tanques	0	24
Tuberías	317	19,978
Bombas	0	32
Válvulas	0	2521

De acuerdo con la Tabla 9, el número de nodos de la red SIMAPAG es 81 veces mayor que el de la red Modena; de manera similar, el número de tuberías es 63 veces superior. En la red Modena, las 317 tuberías representan una longitud de 71.80 km, mientras que en la red SIMAPAG las 19,978 tuberías alcanzan una longitud de 661.7 km.

5.1 Ajuste de Modelo Hidráulico

Las condiciones reales de operación de la red SIMAPAG corresponden a un esquema de suministro discontinuo en algunas regiones de la ciudad. Durante los periodos del interrupción del servicio, las tuberías permanecen vacías, por lo que las presiones toman valores nulos. Bajo este escenario, EPANET interpreta que la simulación no se ejecuta de manera exitosa y, en consecuencia, reporta diversos errores y advertencias, entre los cuales se incluyen:

- Bombas y válvulas que cambian abruptamente de estado entre abierto y cerrado.
- Válvulas que no permiten la entrega de flujo.
- Bombas que no aportan la carga hidráulica requerida.
- Presiones negativas en las tuberías.
- Sistema inestable, en el cual se excede el número máximo de iteraciones para el cálculo de las variables hidráulicas sin alcanzar la convergencia.
- Desconexión de la red.

En total, EPANET detecta 5,576 errores y advertencias que, tal como se describió en la sección 5.6, *Validación de la Metodología en un Conjunto de RDAs Teóricas*, impiden una optimización adecuada de la red.

Dichos errores se asocian principalmente a los niveles de operación de los tanques, los cuales están configurados para simular la interrupción del suministro en algunas zonas de la red; así como a los controles de bombas y válvulas, definidos con el mismo propósito. Por ende, para

llevar a cabo una optimización adecuada, es necesario ajustar el modelo hidráulico de forma que la simulación en EPANET se ejecute de manera exitosa.

El ajuste del modelo hidráulico se orienta hacia su simplificación, dado que los errores y advertencias son derivados principalmente de los niveles de operación de los tanques. En ese contexto, la simplificación consiste en:

- Reemplazo de tanques por reservorios, los cuales cumplen con la misma función de suministrar agua a la red; sin embargo, se consideran como fuentes de caudal infinito y no de esta manera se evitan los controles de operación.
- Eliminación de las líneas de conducción: el modelo hidráulico integra tanques conectados directamente entre sí; por lo tanto, los reservorios se ubican únicamente en los tanques conectados a la red de distribución, mientras que el resto de elementos que localizados sobre las líneas de conducción son eliminados.
- Apertura de válvulas: se mantienen abiertas las válvulas de la red con el fin de obtener un modelo completamente abierto, ya que la presencia de válvulas cerradas genera presiones negativas.

Los reservorios que remplazan a los tanques se sitúan sobre la misma posición geográfica y aportan la misma carga hidráulica. Adicionalmente, se eliminan los nodos desconectados de la red, correspondientes a pozos o tanques que ya no se encuentran en operación; se asignan elevaciones a los nodos que no cuentan con este parámetro definido; y se eliminan los controles de operación asociados a las bombas, válvulas y tanques removidos.

Tabla 10. Cantidad de elementos de RDA SIMAPAG original y RDA SIMAPAG ajustada.

Elemento	SIMAPAG original	SIMAPAG ajustada	Diferencia
Nodos	21,791	21,432	-359
Tanques	24	0	-24
Reservorios	35	26	-9
Tuberías	19,978	19,685	-293
Válvulas	2,521	2,429	-92
Bombas	32	1	-31

Después de realizar los ajustes, la red se abastece en su totalidad por reservorios, como se presenta en la Tabla 10. Asimismo, el número de reservorios del modelo hidráulico se redujo, ya que en algunos casos estos elementos se encontraban conectados entre sí. El modelo hidráulico actualizado se ejecuta de manera exitosa en EPANET; por ende, ya no se reportan errores ni advertencias y se encuentra listo para su optimización.

En un sentido estricto, resulta complejo establecer la similitud entre el modelo hidráulico original y el modelo ajustado, ya que los valores de presión en los nodos calculados para el modelo original no convergen a un mismo resultado en las distintas simulaciones realizadas. Como se describió en esta misma sección, EPANET reporta que el sistema es inestable y, por lo tanto, no proporciona datos confiables de las variables hidráulicas. En consecuencia, no se dispone de valores de referencia fijos que permitan evaluar la similitud entre ambos modelos.

Con el fin de evaluar el impacto de la sustitución de tanques por reservorios en el comportamiento hidráulico de la red, se realizó una prueba adicional en una RDA simple. En dicho ejercicio, un tanque con una elevación y un nivel inicial definidos abastece a dos nodos

de demanda. Posteriormente, se construyó un modelo equivalente en el que el tanque fue reemplazado por un reservorio localizado en la misma posición y con una carga piezométrica igual a la aportada por el tanque. Los resultados mostraron que las presiones calculadas en los nodos de ambos modelos son idénticas. Este comportamiento se explica porque, bajo condiciones de carga constante, y en ausencia de procesos de llenado o vaciado, así como de controles operativos dependientes del nivel, un tanque se comporta hidráulicamente como un reservorio. En este escenario, la solución hidráulica es única y, por tanto, las presiones y caudales resultantes coinciden exactamente. Las diferencias entre ambos esquemas de modelación se manifiestan únicamente cuando se consideran periodos de simulación extendidos en los que el nivel del tanque varía con el tiempo, o cuando existen controles de operación asociados a dicho nivel, situaciones que introducen efectos de almacenamiento y dinámica hidráulica que no pueden ser reproducidos mediante un reservorio.

En el presente estudio, al sustituir los tanques por reservorios, a estos últimos se les asignó la carga piezométrica máxima que los tanques pueden aportar durante su operación. Esto permite representar un escenario hidráulico favorable y estable, en el cual la red dispone de la mayor energía disponible, evitando así las variaciones inducidas por los vaciados de los tanques y los controles operativos asociados. Si bien esta simplificación implica sacrificar la representación dinámica real de almacenamiento y regulación de la red, constituye un compromiso necesario para garantizar la estabilidad numérica del modelo y su correcta optimización.

Bajo este enfoque, el modelo hidráulico ajustado se plantea como una solución metodológica para solventar las inconsistencias numéricas derivadas de las condiciones operativas del modelo original, permitiendo obtener una representación estable y coherente del comportamiento hidráulico de la red. Esta aproximación posibilita contar con un panorama general confiable del sistema, libre de errores y advertencias de simulación en EPANET, lo cual resulta indispensable para las siguientes etapas del análisis.

La Fig. 33 presenta los valores de presión del modelo hidráulico original y los del modelo hidráulico ajustado, los cuales se clasifican dentro de cinco categorías:

- Negativas, menores a 0
- Bajas, menores a 10 mca
- En rango, entre 10 mca y 50 mca
- Altas, entre 50 mca y 100 mca
- Críticas, mayores a 100 mca

En la red original, la presión mínima reportada es de -3,946,505.75 mca, mientras que la máxima alcanza 6,458,578.50 mca. Estos valores no son representativos del comportamiento real de la red, la cual se encuentra correctamente modelada y abastece adecuadamente a la ciudad. En la operación real, las presiones mínimas únicamente pueden descender hasta cero durante interrupciones del suministro, cuando las tuberías se encuentran vacías; valores negativos de tal magnitud implicarían la implosión de las tuberías, situación que no ocurre en la práctica. De manera similar, aunque presiones superiores a 50 mca ya rebasan el límite recomendado por la normatividad mexicana (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos

Hídricos, 2000), valores máximos del orden de millones implicarían estallidos generalizados, lo que no se observa en la operación real. Estos resultados se deben a que, bajo condiciones de suministro intermitente, EPANET no alcanza convergencia en los cálculos hidráulicos y, en consecuencia, reporta presiones que no concuerdan con el comportamiento real de la red. Inclusive, los cálculos hidráulicos varían entre simulaciones.

En cuanto a las presiones mínimas, responsables de los problemas reportados por EPANET, el modelo original, del caso de la Fig. 33 (a), presenta 12,030 nodos con presiones en rango adecuado, mientras que en el modelo ajustado del mismo caso (a) únicamente 8,403. Asimismo, el modelo original registra 6,002 nodos con presiones altas, frente a 10,702 del modelo ajustado, lo que indica que, desde un punto puramente hidráulico, los valores de presión resultan más favorables en el modelo original. No obstante, este modelo presenta 3,059 nodos con presiones negativas, las cuales generan errores en EPANET e impiden una adecuada optimización de la red. En contraste, el modelo ajustado registra únicamente 43 nodos con presiones negativas, con magnitudes cercanas a cero, las cuales no generan reportes de error, por lo que las simulaciones son exitosas y la optimización hidráulica puede ejecutarse correctamente.

Una vez que el modelo hidráulico del caso real de SIMAPAG se encuentra listo para su optimización, en la siguiente sección se presentan los resultados de la aplicación de la metodología para dicho caso de estudio.

Presiones RDAs SIMAPAG original vs SIMAPAG ajustada

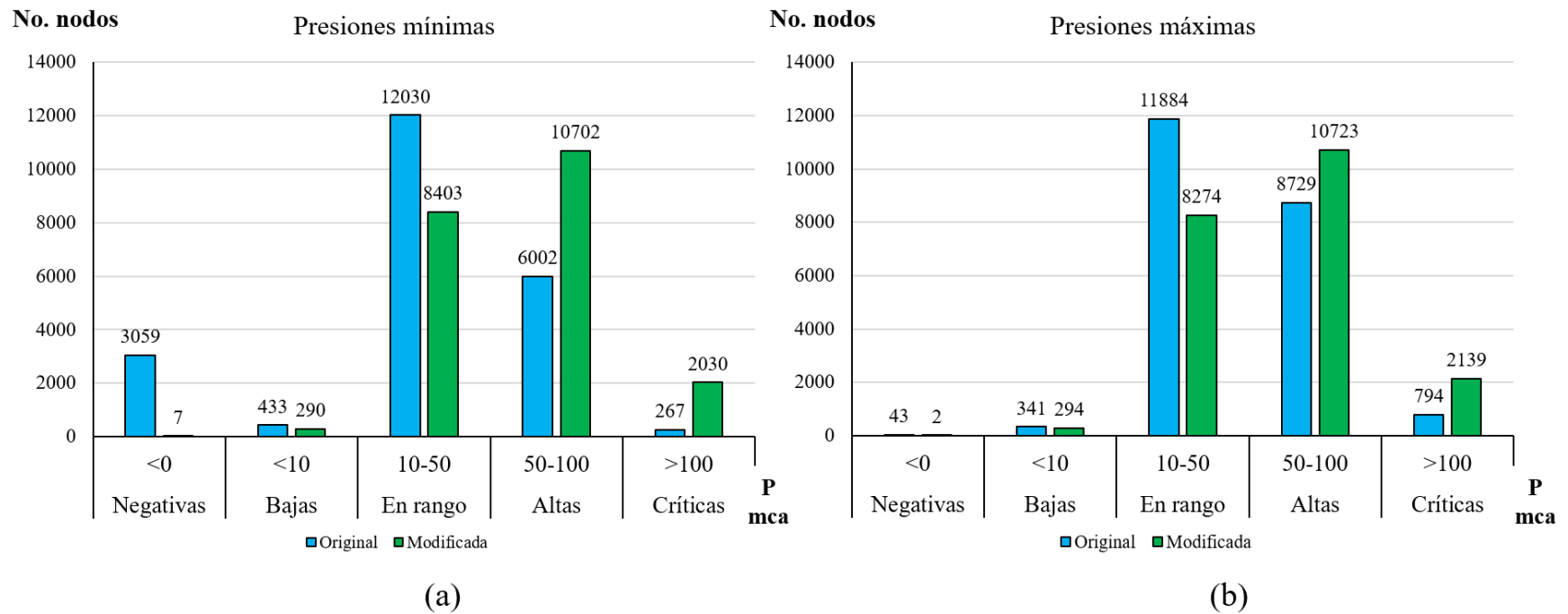


Figura 33. Presiones máximas y mínimas en el modelo hidráulico original y el modelo hidráulico ajustado.

5.2 Detección del Centro Urbanístico

En la sección 5.2, *Estructura Centro-Periferia*, se planteó que las obras hidráulicas necesarias para la conformación de los DMAs resultan más factibles de ejecutar conforme se alejan de las zonas principales de la red, tanto desde la perspectiva hidráulica como de la perspectiva topológica. El caso real de SIMAPAG permite incorporar una tercera perspectiva de análisis: la urbanística.

Para identificar la ubicación de dicha, o dichas zonas, se hará uso del Sistema de Información Geográfica QGIS, de acceso libre, ya que la información cartográfica disponible en el portal del IMPG se encuentra en archivos compatibles con ese software. Adicionalmente, QGIS cuenta con el complemento QEPANET, el cual proporciona un conjunto de herramientas de edición específicas para la construcción de modelos hidráulicos al estilo de EPANET, así como para la importación de modelos preexistentes, la ejecución de simulaciones y la representación de resultados mediante herramientas gráficas y mapas temáticos. El organismo operador de la ciudad, SIMAPAG, proporcionó una capa denominada *sectores*, la cual está conformada por polígonos que, como su nombre lo indica, representan las subzonas en las que dicho organismo ha subdividido la red.

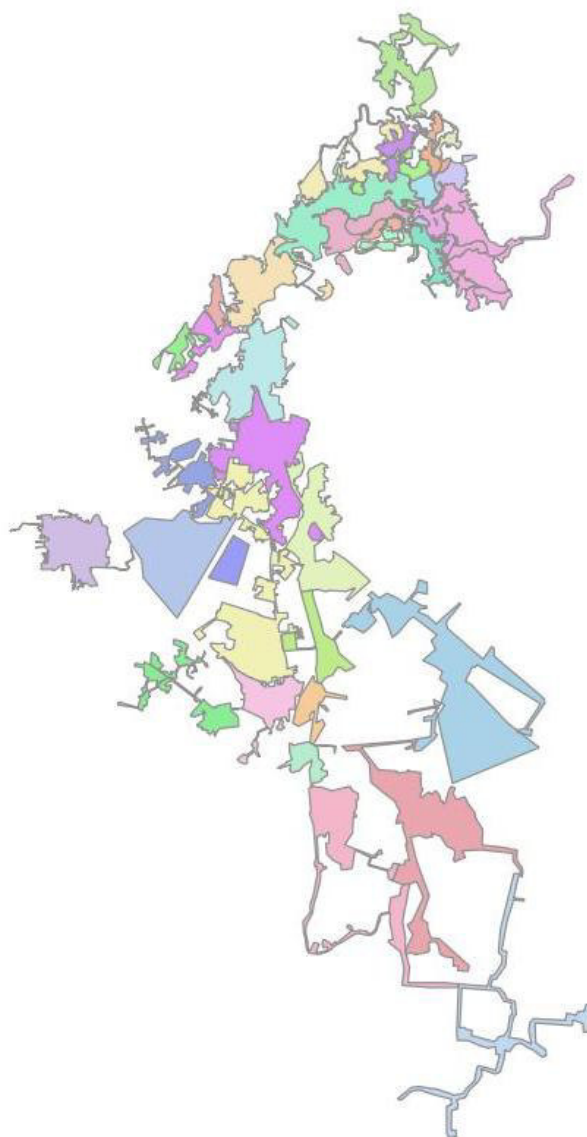


Figura 34. Capa de sectores de la red SIMAPAG.

En la Fig. 34 se presenta la capa de polígonos en la que SIMAPAG ha delimitado un total de 55 sectores, los cuales llevan por nombre las colonias de la ciudad. En sentido estricto, un sector no es equivalente a un DMA, ya que puede corresponder únicamente a una zona de

referenciación. No obstante, en el caso de la red SIMAPAG, los sectores se encuentran físicamente aislados, por lo que pueden también ser considerados como DMAs. A partir de este punto, y con el fin de diferenciar las zonas delimitadas por SIMAPAG de aquellas propuestas en este trabajo, las primeras serán denominadas como DMAs SIMAPAG. Cabe señalar que dichos DMAs no han sido estructurados con base en técnicas numéricas, sino únicamente a partir de zonas de referencia de la ciudad.

Cuando se exporta un modelo preexistente de EPANET hacia QGIS, se generan automáticamente capas correspondientes a los elementos que integran el modelo hidráulico. Cada capa se compone por cuatro tipo de archivos:

- El archivo *.shp* contiene la representación espacial de los objetos de la capa, definiendo la forma y posición de cada elemento en el espacio.
- El archivo *.shx* funciona como un índice de acceso rápido al *.shp*, permitiendo una carga y visualización eficientes de la información espacial.
- El archivo *.dbf* almacena la información descriptiva de cada elemento, incluyendo identificadores, diámetros, demandas, entre otros parámetros hidráulicos.
- El archivo *.prj* define la manera en que deben interpretarse las coordenadas del archivo *.shp*, especificando el sistema de referencia espacial necesario para la correcta ubicación de la capa.

En síntesis, el archivo *.dbf* contiene las propiedades hidráulicas de los elementos, el archivo *.shp* representa su geometría, el archivo *.shx* permite un acceso eficiente a dicha geometría,

y el archivo *.prj* garantiza la correcta georreferenciación de la capa, siendo clave para que la RDA coincida con la cartografía proporcionada por el IMPG.

Dentro de la información cartográfica disponible en el portal del IMPG se incluyen las ubicaciones de escuelas, zonas de comercio, espacios destinados a la promoción cultural, hospitales, entre otros, representados mediante nodos. No obstante, por sí mismos, no permiten identificar una zona central claramente definida, ya que se encuentran altamente dispersos a lo largo de la ciudad. La Fig. 35 muestra la zona norte de la ciudad de Guanajuato. A diferencia de las locaciones descritas con anterioridad, la capa de Inmuebles Catalogados (polígonos en color naranja) permite identificar un área urbana bien conformada. Dichos inmuebles integran el centro histórico de la ciudad, el cual es considerado uno de los destinos turísticos prioritarios a nivel nacional (Secretaría de Turismo, 2015).

En el centro histórico de la ciudad de Guanajuato se concentra una elevada cantidad de actividades socioeconómicas; por lo tanto, no resulta factible interrumpir el suministro de agua para la ejecución de las obras hidráulicas necesarias para la conformación de los DMAs, debido a que ello podría generar una importante inconformidad social. Derivado de lo anterior, el centro histórico de la ciudad se considera como la zona principal desde la perspectiva urbanística.



Figura 35. Zona norte de la ciudad de Guanajuato y ubicación de los inmuebles catalogados.

Posterior a la identificación de la zona central, empleando las herramientas de QGIS, se genera un polígono denominado como *polígono principal*, que integra a los polígonos correspondientes de los Inmuebles Catalogados. El polígono principal integra el atributo *sector*, lo que permite identificar a los nodos del modelo hidráulico ubicados dentro de esa región.

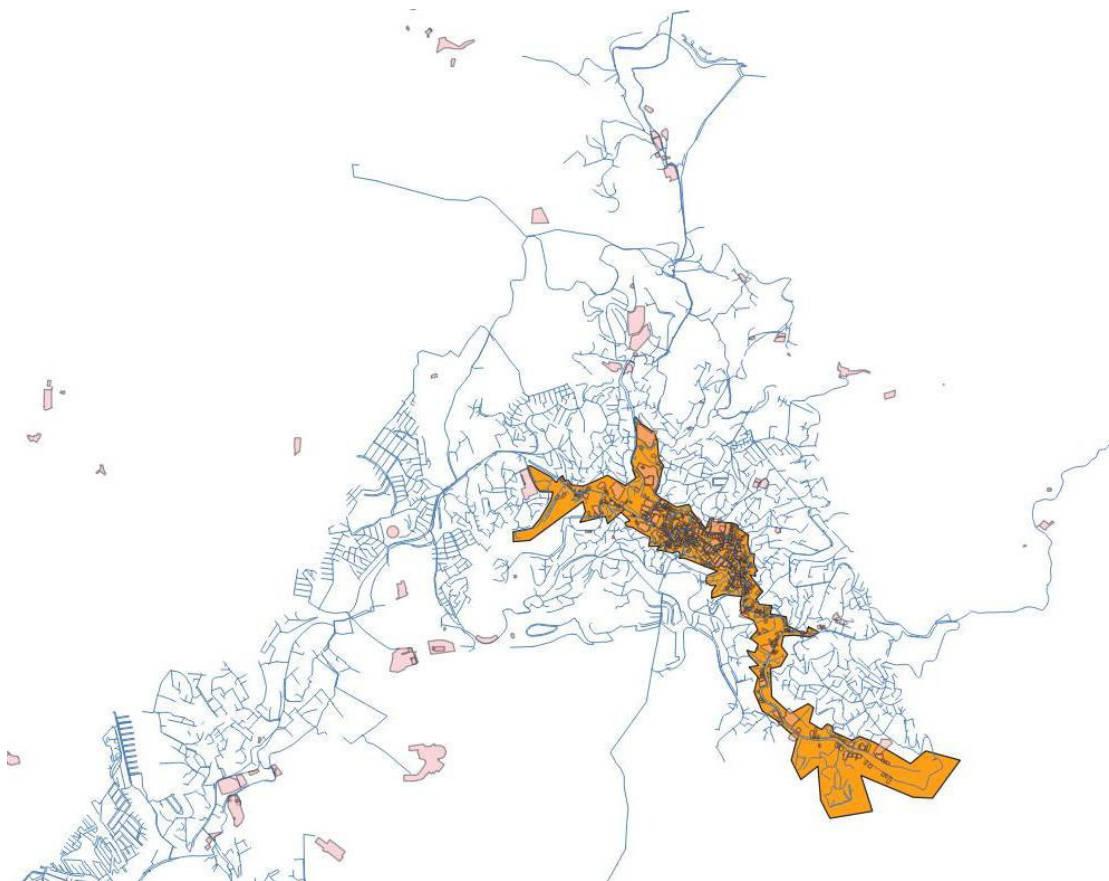


Figura 36. Polígono principal.

La Fig. 36 muestra la capa del polígono principal, el cual concentra a la mayoría de los inmuebles catalogados, con excepción de aquellos que se encuentran dispersos en zonas más alejadas.

En el software QGIS, la herramienta vectorial *Intersección* permite combinar los atributos de dos capas; en este caso, de la capa de nodos del modelo hidráulico y la capa del polígono principal. Como resultado de esta operación se genera una nueva capa que conserva los atributos de la capa de nodos como el índice, el nombre, entre otros, incluyendo el sector al

que pertenecen, que ahora incorpora adicionalmente el nuevo sector *polígono principal*. Posteriormente, la capa de nodos del modelo hidráulico en QGIS se cargó en MATLAB empleando la función *shaperead*, que permite cargar y acceder a los documentos en formato *.shp*.

Al cargar el modelo de red de EPANET en QGIS, el software asigna un índice por defecto a los nodos; de manera análoga, al cargar el modelo de red de EPANET en MATLAB, ocurre el mismo procedimiento. No obstante, los índices de los nodos en QGIS no coinciden con los del modelo de red en MATLAB. Por ello, empleando las funciones del propio MATLAB se realizó un cruce de información entre el atributo *nombre* de la capa de nodos del modelo en QGIS y el nombre de los nodos definido en EPANET, el cual se conserva en MATLAB.

A partir de este cruce, fue posible identificar los índices de los nodos comprendidos dentro del sector *polígono principal* y, finalmente, separar la gráfica de SIMAPAG en dos subclases: central y periférica.

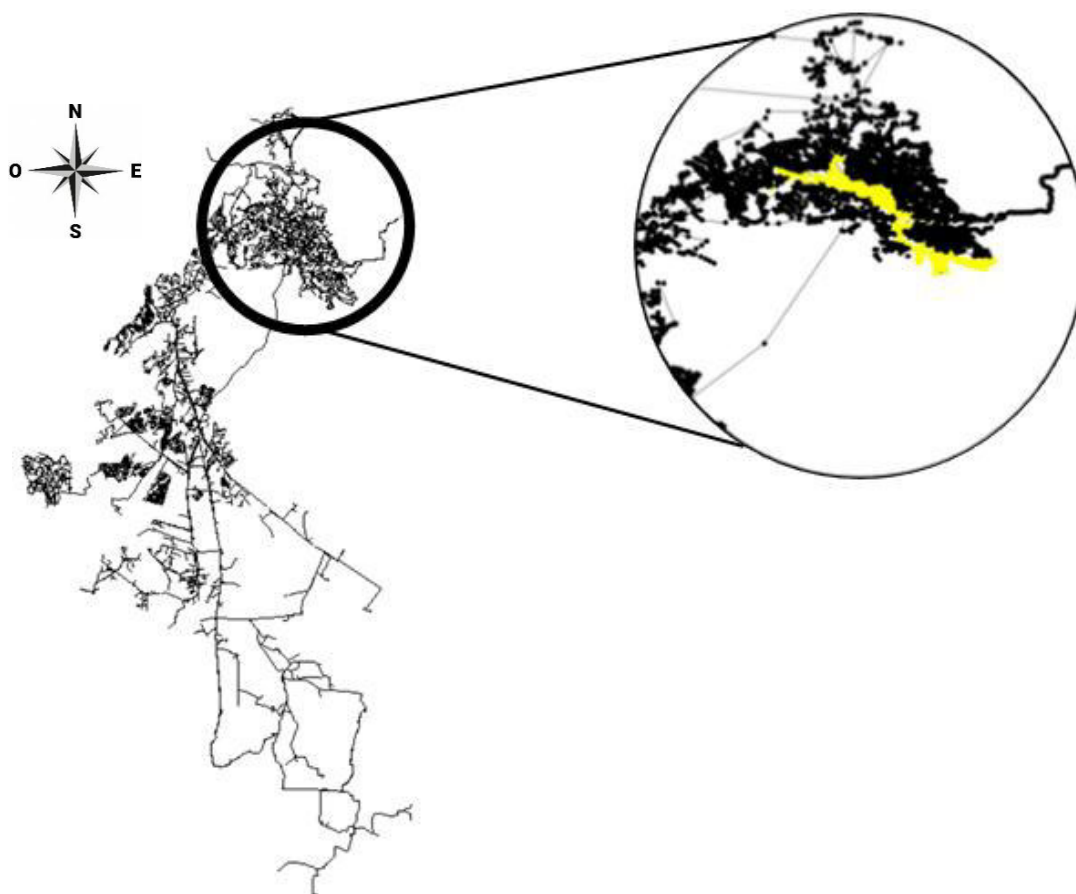


Figura 37. Gráfica SIMAPAG: zona central desde la perspectiva urbanística.

En la Fig. 37 se muestra la representación de la gráfica de la red SIMAPAG, en la cual los nodos centrales están, resaltados en color amarillo, delimitan la región que será excluida en el proceso de detección de comunidades.

5.3 Detección del Centro Hidráulico

Siguiendo la metodología de la sección 2.2, *Estructura Centro-Periferia*, la cual es empleada para identificar a los nodos centrales respecto a su peso hidráulico considerando como variables de ponderación su carga piezométrica y su demanda, se detectó que la zona norte de la red es donde se concentra la mayoría de dichos nodos centrales.

En la Fig. 38 se resaltan en color amarillo los nodos centrales ubicados en la región norte de la gráfica, cuya preponderancia se atribuye a su elevación topográfica, la cual ronda los 2,000 msnm, que incrementa el valor de su carga piezométrica. En contraste, en la región media las elevaciones oscilan alrededor de los 1,900 msnm, mientras que en la región sur se sitúan aproximadamente en los 1,800 msnm.

Dado que la red SIMAPAG se abastece por un sistema a base de gravedad, se espera que una gran proporción significativa del caudal que circula por las tuberías fluya en dirección norte-sur, condicionada por el gradiente topográfico. En consecuencia, la ejecución de obras hidráulicas en la región norte podría generar pérdidas de carga relevantes, por lo que, desde una perspectiva hidráulica, resulta más factible excluir dicha región del proceso de detección de comunidades.

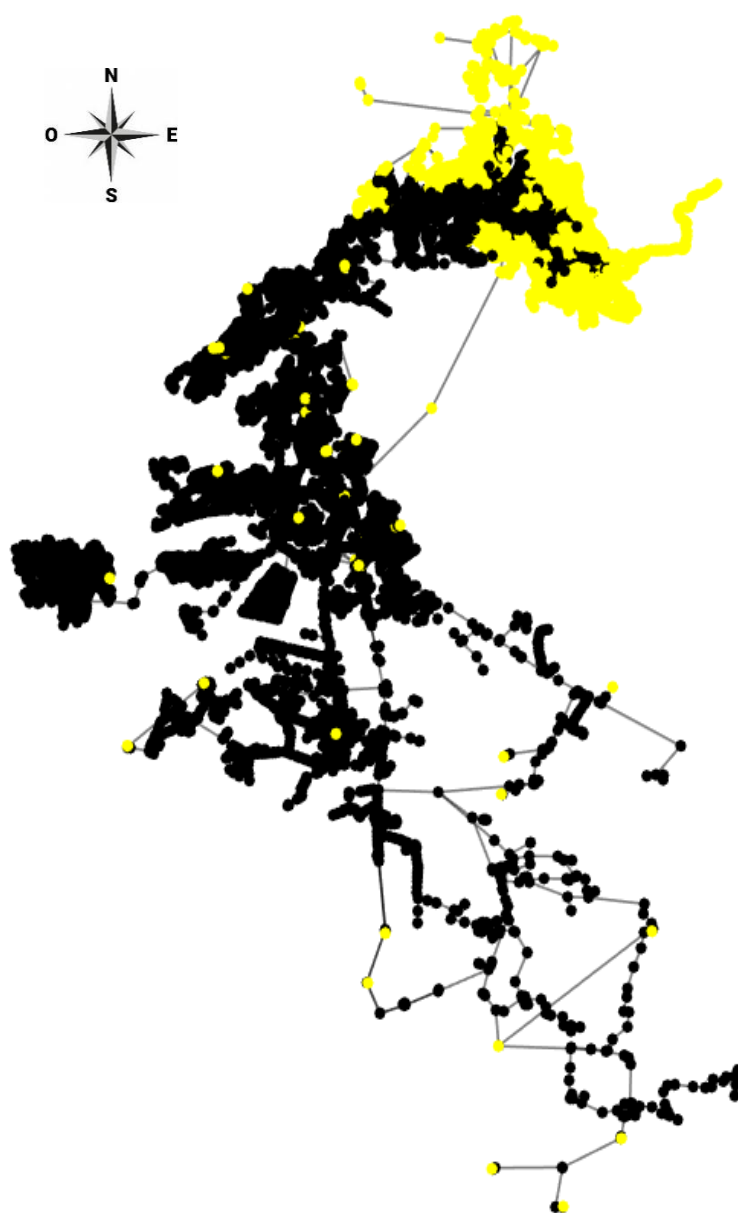


Figura 38. Gráfica SIMAPAG: zona central desde la perspectiva hidráulica.

Asimismo, en la Fig. 38 se observa que, además de los nodos centrales de la región norte, algunos nodos de la misma clase se encuentran dispersos a lo largo de la gráfica. Estos nodos

corresponden a los tanques de almacenamiento, los cuales se ubican a elevaciones considerables para permitir la distribución del agua por gravedad. Siguiendo el procedimiento operativo estándar, se instalan VAs en las tuberías de la salida de los tanques, lo que permite su desconexión hidráulica mediante el cierre de dichas válvulas cuando se requiere suspender su aporte a la red. Por lo tanto, no es necesario considerar el costo de instalar nuevas VAs a la salida de los tanques y, en consecuencia, los nodos centrales asociados a los tanques ubicados en la región media y sur se reclasifican como periféricos. En contraste, los nodos asociados a los tanques de la región norte conservan su clasificación, ya que, dado que su entorno inmediato está conformado predominantemente por nodos de la misma clase, lo que elimina la necesidad de instalar nuevas VAs en sus tuberías de salida.

5.4 Detección del Centro Topológico

Para determinar el centro topológico de la red, se sigue el procedimiento descrito en la sección 2.2, *Estructura Centro-Periferia*, en el cual el peso de los nodos se calcula mediante una ponderación basada en Medidas de Centralidad, considerando tanto el caso de la gráfica dirigida como el de la gráfica no dirigida.

En la Fig. 39 se muestra el peso de los nodos obtenido a partir de las distintas gráficas analizadas. A modo de tabla, la Fig. 39 se organiza en filas y columnas: la primera columna indica el tipo de Medida de Centralidad empleada en la ponderación; la segunda corresponde a las gráficas no dirigidas; y la tercera a las gráficas dirigidas.

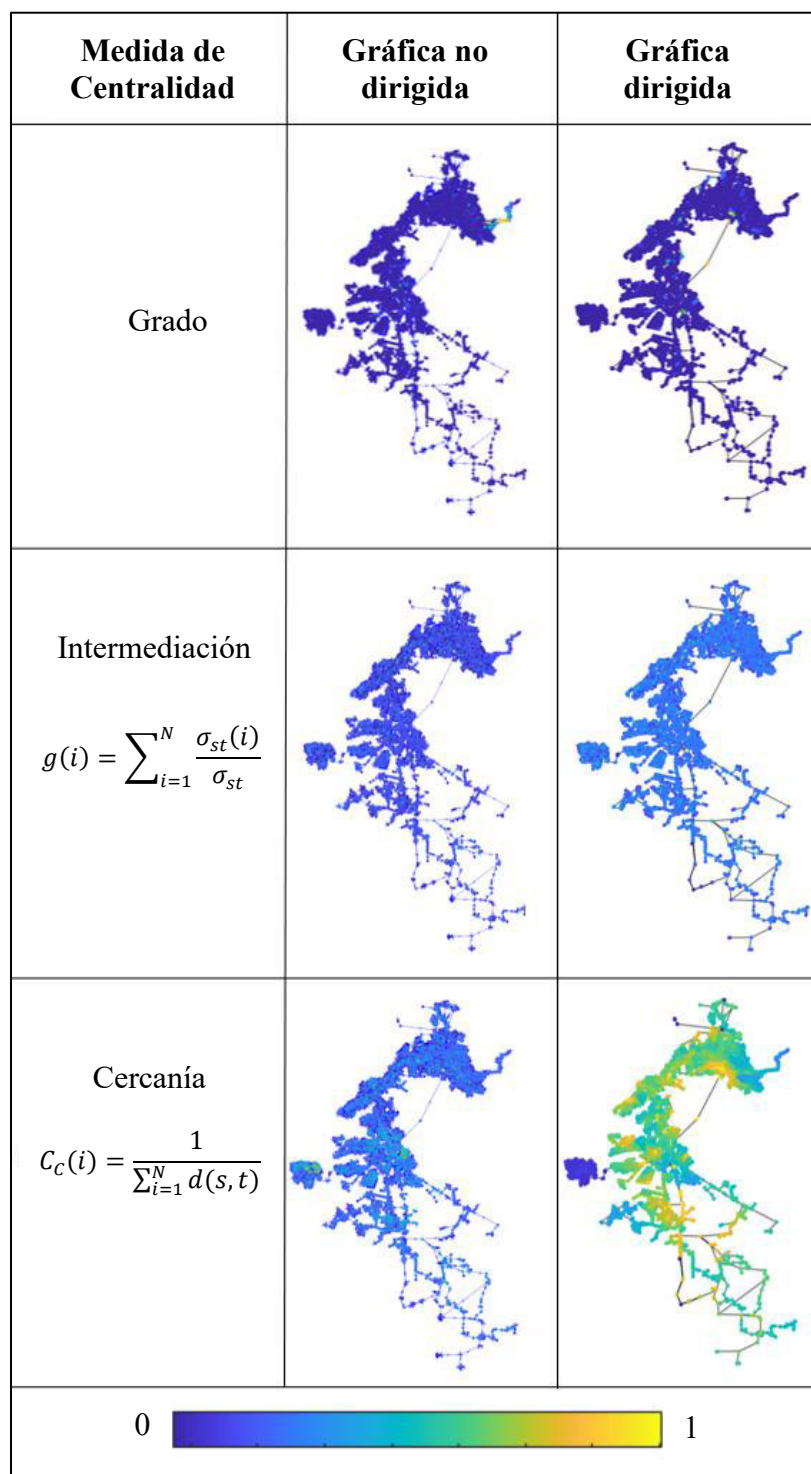


Figura 39. Gráfica SIMAPAG: peso de nodos desde la perspectiva topológica.

En la última fila de la Fig. 39 se muestra la escala de colores que indica el peso de los nodos; los pesos de los distintos casos fueron normalizados con el fin de establecer una base común de comparación. Los nodos con menores pesos se representan en tonos azules, mientras que aquellos con pesos mayores se muestran en tonos amarillos; los tonos verdes corresponden a nodos con pesos intermedios.

Con excepción del caso de la gráfica dirigida ponderada por la Centralidad de Cercanía $C_c(i)$, las gráficas se caracterizan por una marcada homogeneidad en los pesos de los nodos, lo que impide la identificación de una zona central. En contraste, en la gráfica dirigida ponderada por $C_c(i)$, los pesos de los nodos presentan una distribución heterogénea.

En la Fig. 40 se presentan dos casos en los que los nodos centrales se resaltan en color amarillo. En la Fig. 40 (a), se consideran como nodos centrales aquellos cuyo peso es superior al tercer cuartil; sin embargo, dichos nodos se encuentran dispersos por lo que no es posible identificar un centro claramente definido. En la Fig. 40 (b), los nodos centrales se determinaron incrementando el valor del umbral a partir del cual se clasifican dentro de esta categoría; no obstante, como se observa en la Fig. 40 (b), tampoco es posible distinguir un centro bien conformado. Un comportamiento similar se observa al evaluar distintos umbrales.

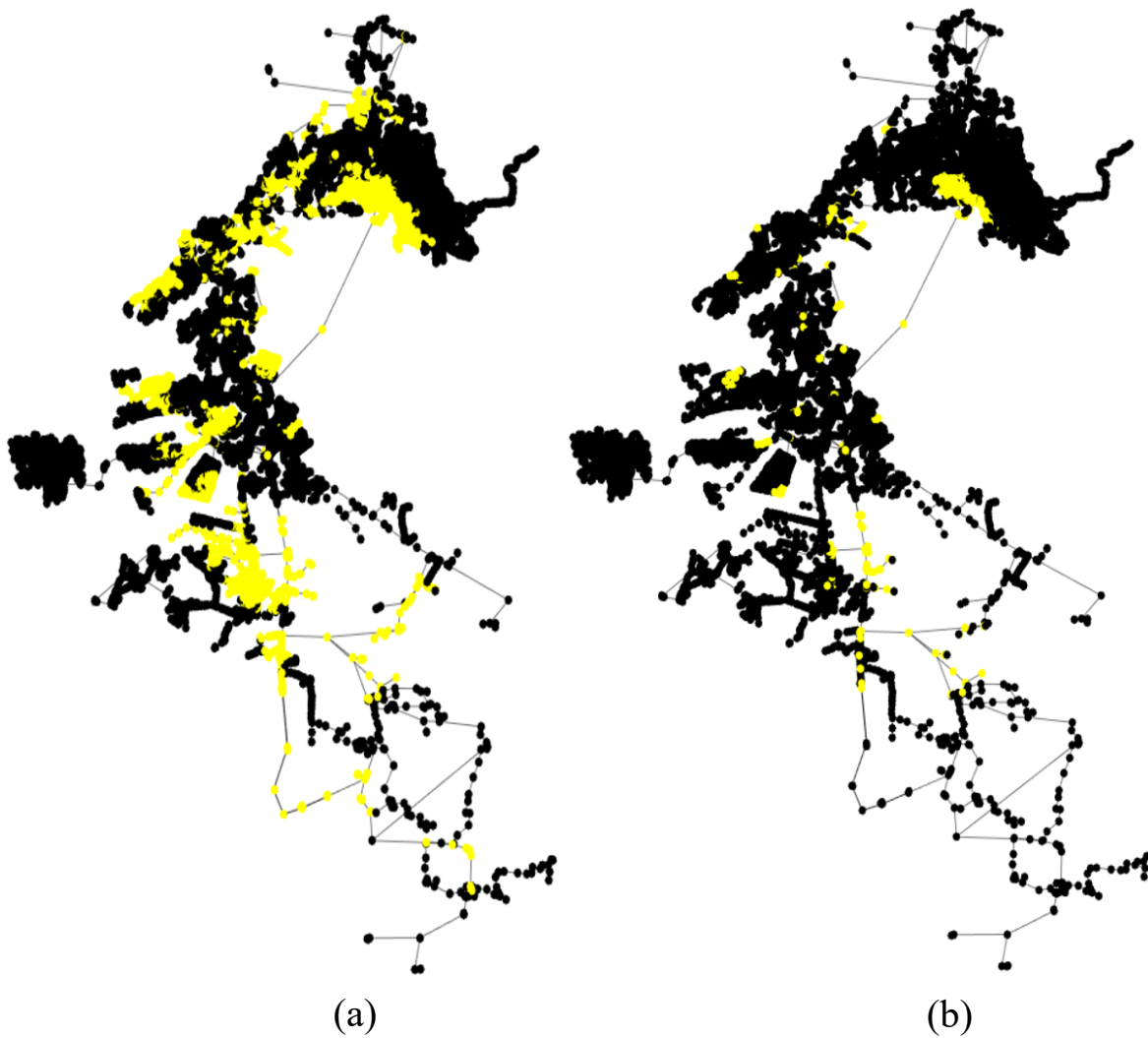


Figura 40. Nodos principales bajo perspectiva topológica.

Los resultados obtenidos indican que las Medidas de Centralidad no permiten identificar de manera clara un centro topológico de la red analizada. Esto se debe principalmente a su gran dimensión y alto grado de interconectividad, características que favorecen la existencia de múltiples trayectorias alternativas entre los nodos, evitando la formación de caminos predilectos. En este contexto, el cierre de un enlace puede ser compensado fácilmente por

rutas adyacentes, sin afectar de forma significativa la conectividad global de la red. En consecuencia, para la identificación de zonas centrales se opta por emplear únicamente las perspectivas urbanística e hidráulica.

5.5 Estructura de los DMAs: Detección de Comunidades

En la Tabla 11 se muestran los resultados de la aplicación del algoritmo *Fast-Greedy* para detección de EC en las sub-gráficas periféricas de la red SIMAPAG.

Tabla 11. Resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo Fast-Greedy en la gráfica SIMAPAG.

ECP	γ	Modularidad Q	No. Comunidades	No. Fronteras
Hidráulica	0.1	0.9199	44	66
Urbanística	0.1	0.9708	60	105
Topológica	--	--	--	--

En ambos casos, perspectiva hidráulica y perspectiva topológica, se maximizó el valor de Modularidad Q , con el fin de dividir la gráfica en el número de comunidades más conveniente de acuerdo con la estructura de la red. Los valores obtenidos de este parámetro fueron $Q = 0.9199$ y $Q = 0.9708$, respectivamente. Estos resultados indican la presencia de comunidades altamente definidas, ya que dichos valores se asocian con redes que presentan una fuerte separación estructural entre sus subcomponentes. En consecuencia, se concluye

que la ECP permite, en ambos casos, la conformación de DMAs bien definidos en las subgráfica periféricas, de tal manera que se evita la ejecución de obras hidráulicas en las zonas prioritarias de la red. La Fig. 41 muestra la estructura de las comunidades detectadas mediante el algoritmo *Fast-Greedy*; recuérdese que los DMAs siguen la estructura determinada por dicho algoritmo. El caso (1) presenta la estructura de los Sectores SIMAPAG, el caso (2) corresponde a los obtenidos bajo la ECP hidráulica, y el caso (3) a los DMAs obtenidos bajo la ECP urbanística.

En los casos (2) y (3) se señalan con una flecha a las regiones centrales, en las cuales los nodos se representan en color marrón. En algunos casos, la estructura de las comunidades es similar a la de los Sectores SIMAPAG, especialmente en aquellas regiones donde los nodos representan zonas como fraccionamientos o comunidades, ya que el organismo operador las clasifica como sectores y el algoritmo *Fast-Greedy* los detecta como comunidades bien definidas. Esto se debe a que dichas zonas se encuentran, en cierta medida, alejadas del resto de la red y, por lo general, conectadas mediante un único enlace, el cual se asocia urbanísticamente con la carretera que conecta a dichas zonas con el resto de la ciudad.

En el caso de la zona sur, para los casos (2) y (3) el algoritmo agrupa los nodos en una y dos comunidades, respectivamente, mientras que en los Sectores SIMAPAG se identifican hasta cinco comunidades. Esta diferencia se debe a que el organismo operador delimitó los sectores con base al crecimiento poblacional y conexión a la red de la ciudad desde las comunidades, dado que en esa región se localizan algunas comunidades aledañas a la ciudad integradas dentro del modelo hidráulico.

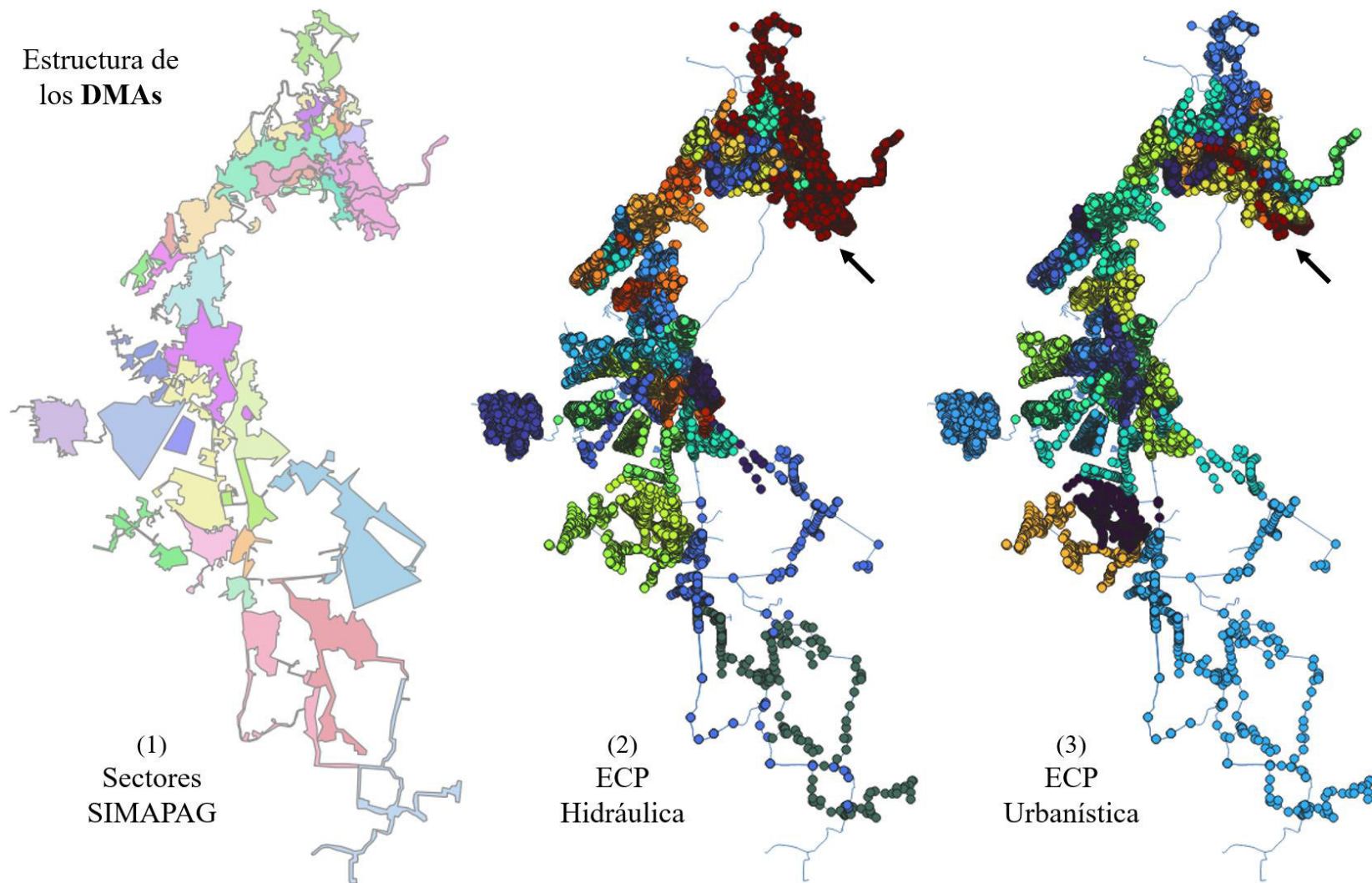


Figura 41. Estructura de los DMAs: (1) Sectores SIMAPAG; (2) ECP Hidráulica; (3) ECP Topológico.

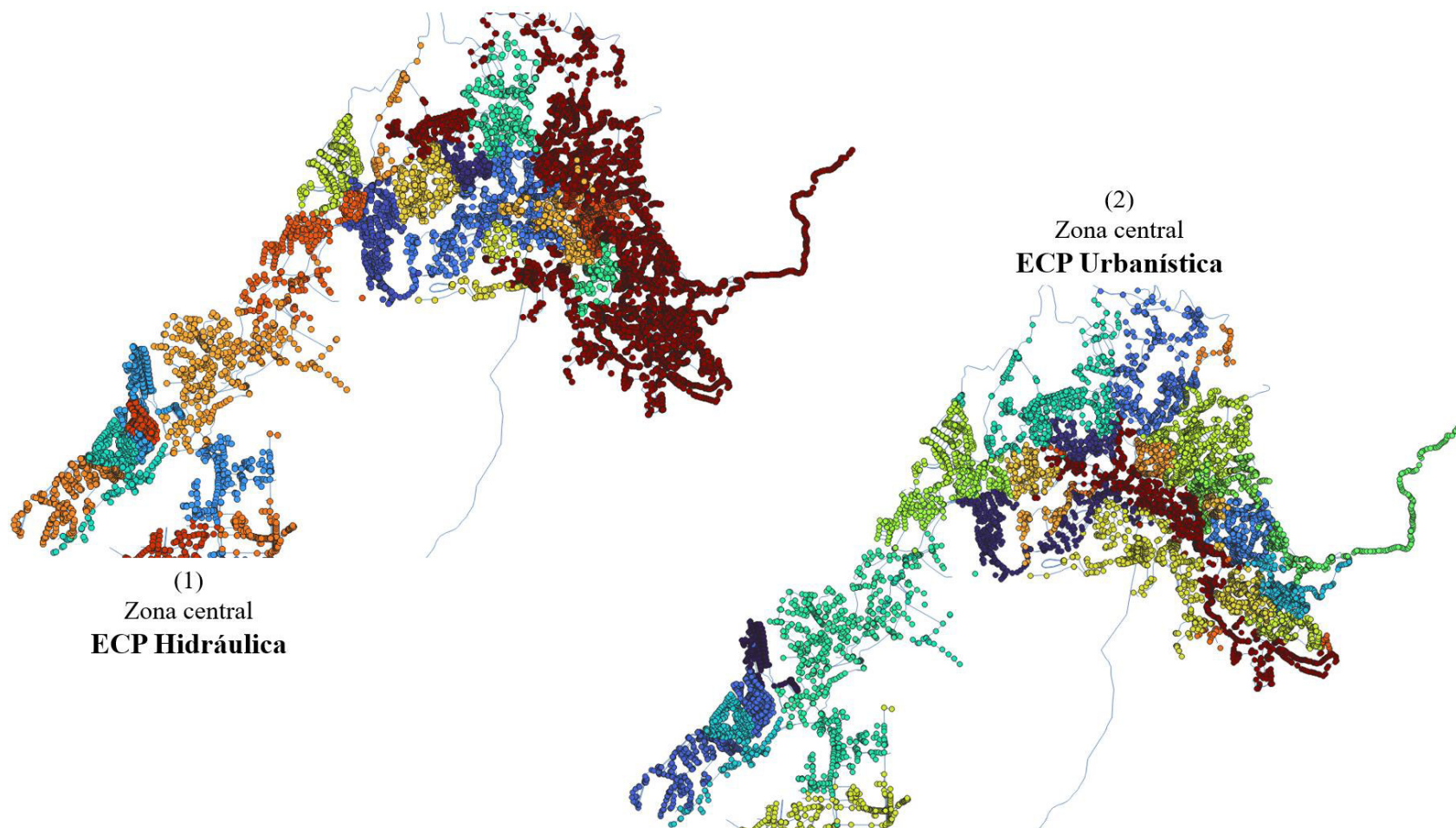


Figura 42. Zona central: (1) ECP Hidráulica; (2) ECP Urbanística.

En la Fig. 42 se muestra la zona norte de la red, donde se concentra la mayor cantidad de nodos. En algunos casos, la estructura de las comunidades mediante los enfoques ECP puede ser similar; no obstante, no se observa una tendencia clara a agrupar los nodos dentro de las mismas comunidades. Esto se debe a que la zona central, representada en color marrón, segmenta al resto de los nodos en distintas distribuciones.

Una vez determinada la estructura de los distritos, en la siguiente sección se presentan los resultados de la optimización de las fronteras del caso de estudio.

5.6 Optimización de las Fronteras de los DMAs

La Tabla 12 presenta los resultados obtenidos mediante el algoritmo de optimización PSO para la red SIMAPAG, así como los correspondientes a los casos de estudio de validación. Por su parte, la Tabla 13 muestra los costos de las válvulas en función del diámetro de la tubería en la que se instalan, los cuales, junto con la información de los casos de validación, permiten ampliar el análisis de las sectorizaciones del caso de SIMAPAG. El tiempo de ejecución de los algoritmos de detección de ECP es del orden de cinco minutos para los casos de validación y de hasta treinta minutos para el caso de SIMAPAG. Por su parte, el algoritmo *Fast-Greedy* requiere apenas unos minutos en los casos de validación, mientras que para SIMAPAG puede alcanzar hasta 4 horas. Finalmente, el algoritmo PSO presenta tiempos de ejecución de entre media hora y cuatro horas para los casos de validación, y de entre siete y doce horas para el caso SIMAPAG.

Tabla 12. Resultados de la optimización de la RDA SIMAPAG ajustada y de los casos de validación.

Caso	ECP	Modularidad Q	No. DMAs	Costo (euros)	Válvulas			Diámetro de las Válvulas		
					VFC	VA	Total	$\bar{x}$	Frecuencia Mayor	Frecuencia Menor
(1) Exnet	H	0.8052	7	923,032	24	9	33	0.33	0.31	0.16
	T	0.7574	6	794,582	22	9	31	0.32	0.31	0.10
(2) RuralNetwork	H	0.7317	5	593,802	4	22	26	0.45	0.45	0.45
	T	0.6948	5	683,533	3	30	33	0.45	0.45	0.45
(3) ky2	H	0.7605	6	97,187	7	43	50	0.14	0.10	0.25
	T	0.7469	6	152,691	19	41	60	0.15	0.10	0.30
(4) Wolf-initial-fig	H	0.8085	6	221,517	7	9	16	0.28	0.20	0.41
	T	0.8012	6	376,818	11	24	35	0.26	0.20	0.41
(5) SIMAPAG	H	0.9199	44	275,454	50	16	66	0.12	0.10	0.04
	U	0.9708	60	3,633,001	77	28	105	0.12	0.05	0.06

Tabla 13. Costo de las válvulas respecto al diámetro.

Diámetro	(m)	0.05	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
Costo	VCF	510	1194	2184	5118	9365	14963	21943	30330	40148	51414	64146
	VA	153	368	685	1644	3061	4957	7349	10252	13680	17643	22,152

Como era de esperarse, el caso (5) SIMAPAG requiere el mayor número de válvulas, ya que en los demás casos el número de DMAs varía entre cinco y siete, mientras que en SIMAPAG se generan 44 y 60 distritos para los casos de ECP hidráulica y ECP urbanística, respectivamente. En ese contexto, es esperable que estos dos escenarios representen los mayores costos. En efecto, la ECP urbanística es el escenario que requiere el mayor número de válvulas, con un total de 105, lo que se traduce en un costo superior a tres millones y medio de euros. Por su parte, la ECP hidráulica requiere 66 válvulas, lo que representa aproximadamente el 63% de las válvulas necesarias en la ECP urbanística. No obstante, el costo total de la sectorización mediante ECP hidráulica es de 257,454 euros, equivalente a apenas el 7.58% del costo de la ECP urbanística. En consecuencia, este escenario resulta significativamente más económico y, de los diez escenarios presentados en la Tabla 12, corresponde al tercer caso de menor costo, incluso por debajo de la mayoría de las sectorizaciones de los casos de validación, a pesar de que estos últimos presentan un menor número de DMAs y, por ende, de fronteras. Esta diferencia entre el costo de ambas sectorizaciones se atribuye al número de VCFs.

La Tabla 13 muestra el costo de las válvulas en función del diámetro de la tubería, evidenciando que, a medida que el diámetro aumenta, los incrementos del costo se vuelven progresivamente mayores. Por ejemplo, en el caso de las VCF, que son las válvulas de mayor costo, el incremento al pasar de un diámetro de 0.1 m a 0.2 m es de 7,181 euros; de 0.2 m a 0.3 m es asciende a 12,578 euros; de 0.3 m a 0.4 m es de 18,205 euros; y de 0.4 m a 0.5 m alcanza 23,998 euros, valores equivalentes aproximadamente al costo de 30 VCF de 0.1 m. Esto indica que la instalación de VCFs en tuberías de gran diámetro incrementa de manera

considerable el costo de las fronteras. Por ende, si bien el costo de la sectorización está asociado al número de válvulas, el diámetro de estas también desempeña un papel fundamental.

A partir de lo anterior, se infiere que el costo de sectorización del caso (1) Exnet para la ECP hidráulica corresponde al segundo más elevado de los diez escenarios analizados, debido a que el diámetro medio de las válvulas es de 0.33 m y el diámetro más frecuente es de 0.31 m. En contraste, en el caso (5) SIMAPAG, la ECP hidráulica presenta un diámetro medio de válvula de 0.12 m, siendo 0.10 m el valor más frecuente. Una situación similar se observa en el caso (2) RuralNetwork, donde ambas sectorizaciones resultan las más costosas en relación con el número de válvulas, ya que todas las tuberías de la red y, por ende, las válvulas de frontera presentan un diámetro de 0.45 m, el mayor de entre todos los casos analizados.

En el caso (5) SIMAPAG, la optimización correspondiente a la ECP urbanística es la que requiere el mayor número de válvulas, de las cuales el 73.33% son VCFs, con una frecuencia dominante de diámetro de 0.10 m. En el mismo caso, para la ECP hidráulica, el porcentaje de VCFs es de 75.76% superior al de la ECP urbanística; sin embargo, la frecuencia dominante del diámetro de las válvulas es de 0.05 m, es decir, la mitad, lo que explica la diferencia observada en los costos de sectorización.

Al analizar exclusivamente los resultados de la red SIMAPAG, se observa una diferencia marcada entre las sectorizaciones obtenidas mediante ECP hidráulica y ECP urbanística. Si bien la ECP urbanística genera un mayor número de DMAs y requiere un mayor número total de válvulas, el costo asociado a esta sectorización resulta considerablemente superior. Esta

diferencia no se explica únicamente por el número de válvulas, sino por la combinación entre el tipo de válvula instalado y el diámetro predominante en las fronteras. En particular, aunque ambas sectorizaciones presentan diámetros medios similares, la ECP urbanística concentra un mayor número de válvulas de control de flujo, mientras que la ECP hidráulica utiliza válvulas de menor diámetro dominante, lo que reduce de manera significativa el costo total de implementación.

En este contexto, la ECP hidráulica se presenta como una alternativa más efectiva para la sectorización de la red SIMAPAG, asociada con un costo menor, evitando problemas en el comportamiento hidráulico. Sin embargo, a pesar de estar asociada a un costo más elevado, la ECP urbanística asegura la continuidad del servicio de agua potable en la zona de mayor actividad socioeconómica de la ciudad, un aspecto de suma relevancia para una ciudad turística como lo es Guanajuato. Asimismo, al comparar estos resultados con los obtenidos en las redes de validación, se observa que el comportamiento de SIMAPAG no sigue una relación lineal entre número de DMAs, número de válvulas y costo, lo que evidencia que, en redes reales de gran escala, el diámetro y la tipología de las válvulas tienen un peso determinante en el costo de la sectorización, incluso por encima del número total de fronteras generadas.

La Fig. 43 presenta los DMAs en la red SIMAPAG bajo las dos perspectivas, ECP hidráulica y ECP urbanística; la Fig. 44 se muestran las presiones de ambos modelos.

DMA's en RDA
SIMAPAG
ajustada

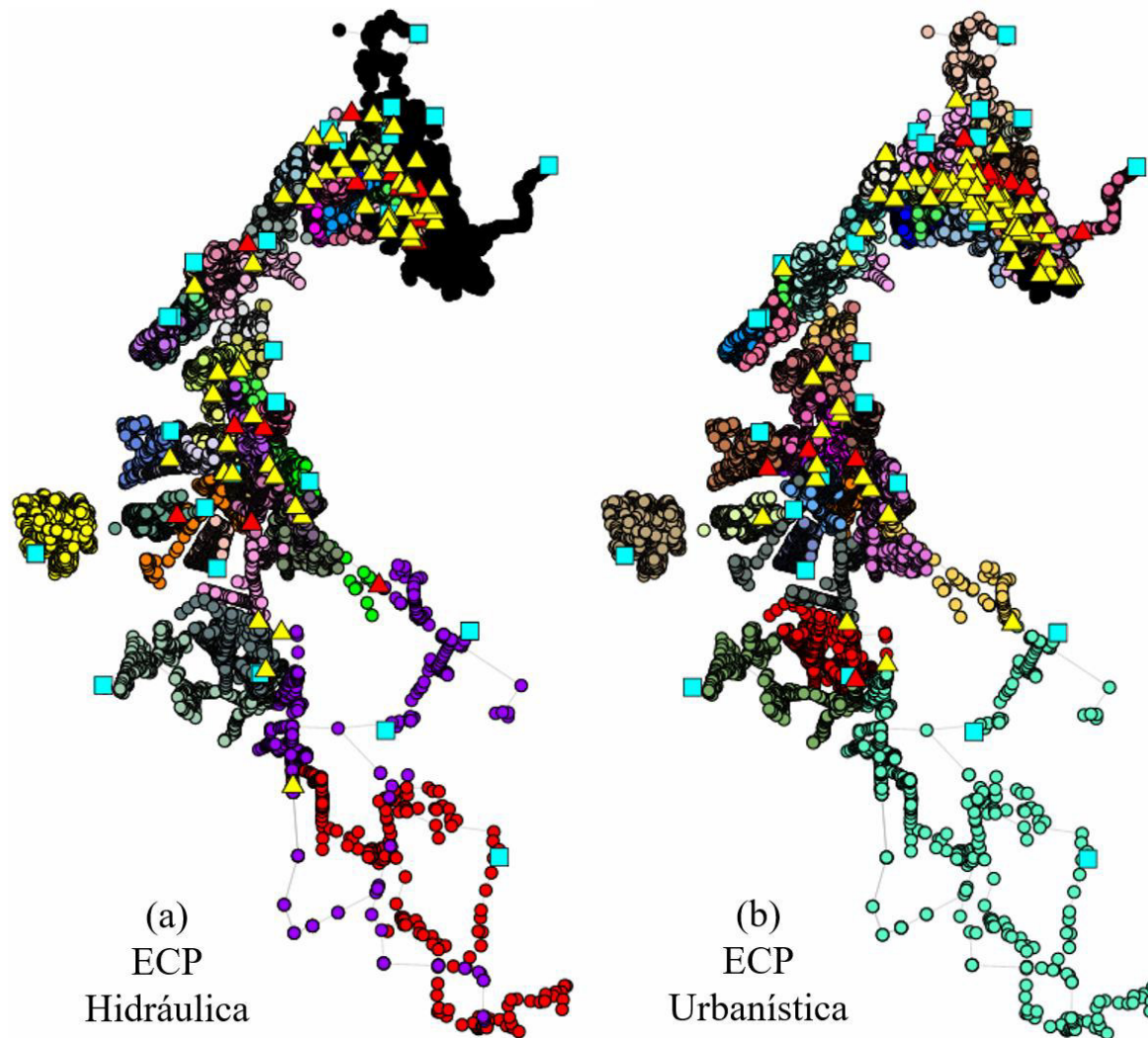
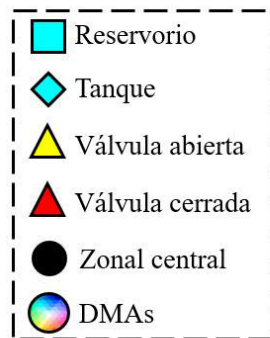


Figura 43. DMAs en RDA SIMAPAG ajustada: (a) ECP Hidráulica; (b) ECP Urbanística.

Presiones de los modelos optimizados ECP Hidráulica y ECP Urbanística

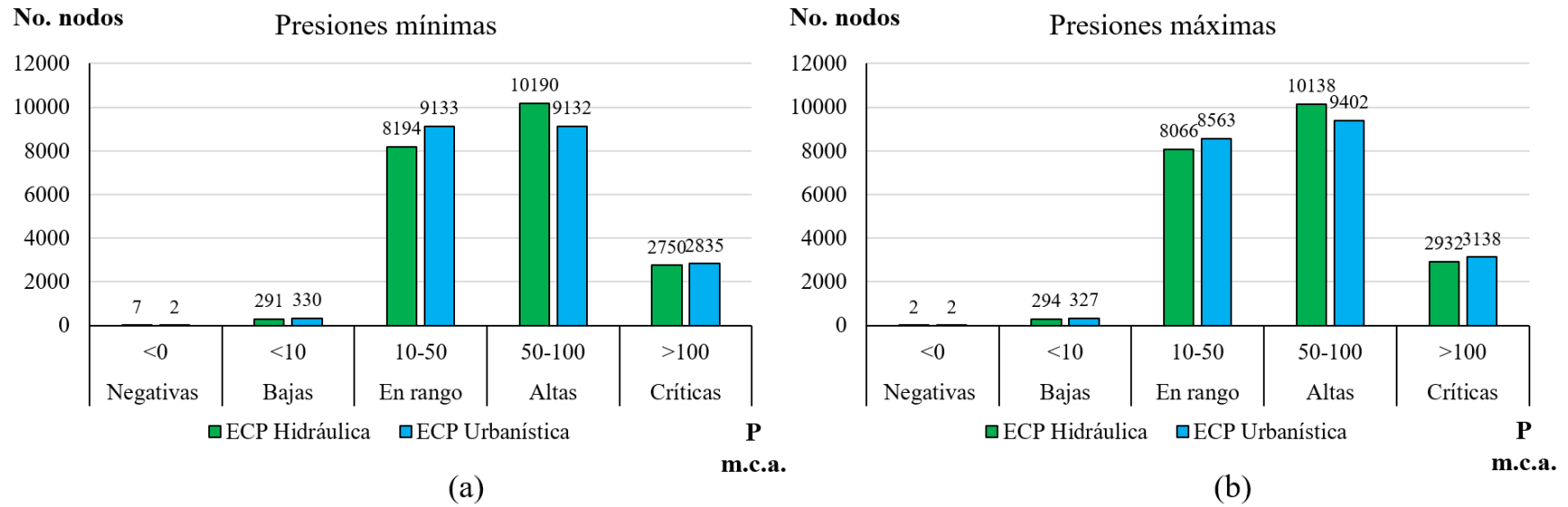


Figura 44. Presiones en los modelos hidráulicos optimizados: (a) ECP Hidráulica; (b) ECP Urbanística.

En cuanto a las presiones de los modelos optimizados, mostradas en la Fig. 44, se observa que la mayoría de los nodos presentan presiones altas, la segunda clase predominante es la de nodos con presiones en rango, y después los nodos con presiones críticas. Por su parte, los modelos optimizados únicamente presentan 7 y 2 nodos con presiones negativas, para el caso (a) ECP hidráulica y (b) ECP urbanística, respectivamente. Estos valores son próximos a cero, por lo que el modelo hidráulico no reporta errores.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La aplicación del enfoque de ECP en RDAs confirma la hipótesis planteada, al demostrar que es posible identificar y preservar zonas prioritarias de la red que deben mantenerse siempre activas sin comprometer de manera significativa su desempeño operativo. En los distintos casos de estudio analizados, el caso inicial de Modena, los casos teóricos de validación y el caso real de la red SIMAPAG, los resultados muestran que los valores de presión presentan afectaciones mínimas tras la aplicación de la ECP, lo que indica que este enfoque permite resguardar en gran medida el rendimiento hidráulico de las redes originales. La integración de la modelación hidráulica con técnicas heurísticas y el uso de algoritmos computacionales permitió evaluar de forma sistemática múltiples configuraciones de la red, consolidándose como una herramienta poderosa en los procesos de optimización de las RDAs.

En relación con la detección de comunidades en la sub-gráfica periférica, los resultados obtenidos confirman la viabilidad de combinar un enfoque global y uno local en el diseño de DMAs. En los distintos casos de estudio, las comunidades detectadas mediante el algoritmo *Fast-Greedy* aplicado a las sub-gráficas periféricas mostraron un desempeño comparable al obtenido al aplicar dicha técnica sobre la gráfica completa, tanto en términos estructurales como hidráulicos, manteniendo variaciones de presión reducidas. Este desempeño fue posible gracias al uso conjunto de técnicas de análisis de gráficas y simulación hidráulica, apoyadas por algoritmos computacionales, lo que refuerza su potencial como herramientas eficaces para el análisis y la optimización de redes de gran escala.

Respecto a la optimización hidráulica de las fronteras entre comunidades, los resultados confirman que el proceso fue exitoso en los distintos casos de estudio considerados. El uso del algoritmo de *Particle Swarm Optimization*, en conjunto con la modelación hidráulica, permitió identificar configuraciones de válvulas que optimizan el comportamiento del sistema sin introducir pérdidas significativas de presión. El desempeño del algoritmo fue consistente con base en la función objetivo propuesta y los parámetros de búsqueda establecidos, destacando que el nuevo rango definido para el parámetro de inercia w favoreció un equilibrio adecuado entre exploración y explotación del espacio de soluciones. La función objetivo fue formulada en moneda europea con el fin de mantener coherencia con los casos de estudio y los parámetros de referencia internacionales considerados. No obstante, dado que los costos asociados a materiales, mano de obra y procesos constructivos dependen fuertemente del contexto económico y regional, se espera que la aplicación de esta metodología en redes de distribución de agua mexicanas implique costos absolutos menores, sin que ello represente una conversión directa o cuantificada. Estos resultados evidencian la capacidad de las técnicas heurísticas y los algoritmos computacionales para resolver problemas complejos de optimización hidráulica.

En lo que respecta a la sectorización de la red SIMAPAG, los resultados ponen de manifiesto tanto las bondades como las limitaciones asociadas a su aplicación en un contexto real. Si bien la metodología permitió conformar DMAs coherentes y preservar zonas prioritarias con afectaciones controladas en los niveles de presión, el análisis evidenció que el modelo hidráulico presenta una alta sensibilidad ante la instalación de válvulas. Esta sensibilidad se encuentra asociada a que la red está modelada para operar bajo condiciones de suministro

intermitente, lo que la hace susceptible a caer en escenarios de presiones negativas cuando se modifican las condiciones de conectividad. Este comportamiento resalta la importancia de integrar modelos hidráulicos representativos de la operación real con algoritmos de optimización adecuados.

Finalmente, los resultados globales de este trabajo confirman la hipótesis general y permiten concluir que la metodología de diseño de DMAs bajo el enfoque de la ECP constituye una aportación relevante y novedosa para la sectorización de RDAs. La integración de la modelación hidráulica con técnicas heurísticas, algoritmos computacionales y enfoques de análisis de gráficas proporciona un marco metodológico sólido y flexible para la optimización de redes, aplicable tanto a casos teóricos como a redes reales de alta complejidad. En conjunto, este enfoque se perfila como una alternativa con alto potencial para apoyar la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad operativa de las RDAs.

RECOMENDACIONES

Derivado del desarrollo metodológico y de los resultados obtenidos en la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas tanto a la aplicación práctica como al desarrollo académico futuro del diseño de DMAs en RDAs.

En primer lugar, se recomienda que la implementación de metodologías de sectorización basadas en la Estructura Centro-Periferia se realice de manera gradual en redes reales, priorizando aquellas zonas identificadas como periféricas. Esta estrategia permite reducir los impactos hidráulicos adversos asociados a la instalación de válvulas de aislamiento en zonas críticas, preservando la continuidad del servicio en los nodos centrales de mayor relevancia estructural e hidráulica. Asimismo, es conveniente que, previo a la aplicación de cualquier esquema de sectorización, se cuente con modelos hidráulicos debidamente calibrados. La precisión en la representación de la red influye directamente en la confiabilidad de los resultados obtenidos durante el proceso de optimización, particularmente en la evaluación de variables como la presión, la resiliencia y la distribución de caudales.

Se recomienda también integrar criterios multiobjetivo en la toma de decisiones, incorporando no solo aspectos hidráulicos, sino también económicos, energéticos y operativos. En este sentido, la minimización del número de tuberías de frontera debe equilibrarse con la conservación del rendimiento hidráulico, evitando configuraciones que comprometan la presión mínima requerida o incrementen significativamente la edad del agua. En el ámbito operativo, se sugiere complementar la sectorización física con sistemas

de monitoreo continuo, como sensores de presión y caudal, que permitan evaluar el comportamiento real de los DMAs una vez implementados. Esto facilitaría la detección oportuna de anomalías, fugas y variaciones en la demanda, fortaleciendo la gestión integral de la red.

Por otra parte, se recomienda considerar las características particulares de cada sistema de abastecimiento, tales como la topografía, la distribución de la demanda y las condiciones urbanísticas. La adaptación del enfoque ECP a estos factores resulta fundamental para garantizar su efectividad en distintos contextos.

Finalmente, se sugiere fomentar la colaboración entre organismos operadores, instituciones académicas y centros de investigación, con el propósito de validar y enriquecer las metodologías propuestas, así como de promover su adopción en proyectos reales de gestión de redes de agua.

PROYECCIÓN Y DESARROLLO FUTURO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación desarrollada en este trabajo, centrada en el diseño de DMAs mediante el enfoque de ECP, presenta un amplio potencial de expansión tanto en el ámbito teórico como en su aplicación práctica.

En el plano metodológico, una de las principales áreas de desarrollo futuro consiste en la incorporación de enfoques de optimización multiobjetivo más avanzados, que permitan considerar de manera simultánea variables hidráulicas, económicas y de calidad del agua. Otra línea de investigación relevante es la inclusión explícita de la calidad del agua dentro del proceso de diseño. En particular, el análisis de la edad del agua y de la concentración de desinfectantes podría integrarse como criterio de optimización, permitiendo evaluar de forma más completa el impacto de la sectorización sobre el desempeño del sistema.

Asimismo, se plantea como área de oportunidad el desarrollo de modelos dinámicos que consideren variaciones temporales en la demanda, tales como patrones diarios, estacionales o condiciones de operación crítica. Esto permitiría diseñar DMAs adaptativos, capaces de responder a cambios en el comportamiento hidráulico de la red.

En el ámbito tecnológico, resulta pertinente explorar la integración del enfoque ECP con herramientas de análisis de datos en tiempo real y sistemas de monitoreo inteligente. La incorporación de tecnologías asociadas al concepto de redes hidráulicas inteligentes

permitiría redefinir los esquemas tradicionales de sectorización, evolucionando hacia configuraciones más flexibles y basadas en información continua.

De igual manera, se propone profundizar en el análisis del enfoque urbanístico dentro de la ECP, incorporando variables socioeconómicas, densidad poblacional y patrones de crecimiento urbano. Esta integración permitiría desarrollar modelos de sectorización más acordes con la realidad de las ciudades y con las necesidades de los usuarios.

Finalmente, se considera fundamental ampliar la validación de la metodología en distintos casos de estudio reales, con configuraciones de red diversas. Esto permitiría evaluar la robustez del enfoque propuesto y establecer lineamientos generales para su implementación en diferentes contextos geográficos y operativos. En conjunto, estas líneas de desarrollo consolidan el enfoque de ECP como una herramienta prometedora en la optimización de RDAs, con potencial para contribuir significativamente a la mejora de su eficiencia, sostenibilidad y resiliencia.

REFERENCIAS

- Abraham E., Gilbert D., Montalvo I. & Piller O. (2017) Iterative Multi-Stage Method for a Large Water Network Sectorization into DMAs under Multiple Design Objectives. *Water Resources Planning and Management*. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000835.
- Algarvio, R., Covas, D. & Monteiro L. (2021). Enhanced Water Age Performance Assessment in Distribution Networks. *Water* 2021, 13,2574. pp. 1-15. doi: 10.3390/13182574.
- Barabási Albert-László (2013) *Network Science*. THE ROYALE SOCIETY PUBLISHING. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0375>.
- Barret, S., Clarke, A., Clarke, S. & Temate, S. (2014). Water Distribution Network Sectorisation Using Structural Graph Partitioning and Multi-Objective Optimization. *Procedia Engineering* (89) 2014. Pp. 11-44 11-51. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.238.
- Barthelemy M. (2011) *Spatial Networks. A Complete Introduction: From Graph Theory and Statistical Physics to Real-World Applications*. *Physics Reports* 499:1-101 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002>
- Barucca, P., Tantari, D., & Lillo, F. (2016). Centrality metrics and localization in core-periphery networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2016(2), 023401.
- Battiston, F., Guillon, J., Chavez, M., Latora, V., & De Vico Fallani, F. (2018). Multiplex core-periphery organization of the human connectome. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(146).
- Behzadian K., Farmani R., Muhammed K. & Rahmani F. (2018) Optimal Operation of Water Distribution Systems using a Graph Theory-Based Configuration of District Metered Areas. *Water Resources Planning and Management*. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000941.
- Berglund E. Z., Mahinthakumar G. & Pesantez J. E. (2018) Automatic Approach to Design District Metered Areas for Water Distribution Systems. *Conference Proceedings 1st WDSA-CCWI 2018*.
- Bianchotti, J. D., Denardi, M., Castro-Gama, M., & Puccini, G. D. (2021). Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. *Water*, 13(2), 131.
- Borgatti S. P. & Everett M. G. (2000) Models of core/periphery structures. *Social Networks* 21 (1999) pp. 375-395
- Brentan, B. M., Campbell, E., Meirelles, G.L., Luvizzoto Jr., E. & Izquierdo, J. (2017). Social Network Community Detection for DMA Creation: Criteria Analysis through Multilevel Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2017. pp. 1-12. doi:10.1155/2017/9053238.
- Brentan, B., Carneiro, J., Covas, D. & Monteiro, L. (2021). Improving Water Age in Water Distribution Systems by Optimal Valve Operation. *J. Water Resour. Plann. Manage.* pp. 1-14. doi: 10.1061/(ASCE)WR.19435452.0001412.
- Bui, X.K., Marlim, M.S. & Kang, D. (2020). Water Network Partitioning into District Metered Areas: A State Of-The-Art Review. *Journal Water* 2020,12,1002. pp. 1-29. doi:10.3390/w12041002.
- Ciaponi, C., Murari, E., & Todeschini, S. (2016). Modularity-based procedure for partitioning water distribution systems into independent districts. *Water resources management*, 30, 2021-2036.

- Clauset, A., Newman, M. E., & Moore, C. (2004). Finding community structure in very large networks. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 70(6), 066111.
- Coelho, S. T., Loureiro, D., & Alegre, H. (2006). *Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água*. Manual, serie IRAR-LNEC. Lisboa: Edições IRAR.
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: MEJORA DE EFICIENCIA FÍSICA*.
- Dantzig, G.B. & Thapa, M.N. (1997). *Linear Programming 1* (1a ed.). Springer New York, NY. doi: 10.1007/b97672.
- Da Silva, M. R., Ma, H., & Zeng, A. P. (2008). Centrality, network capacity, and modularity as parameters to analyze the core-periphery structure in metabolic networks. *Proceedings of the IEEE*, 96(8), 1411-1420.
- De Freitas Anchieta, T. F., Meirelles, G., & Brentan, B. M. (2024). Optimal district metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, 63, 105472.
- Diao, K., Rauch, W. & Zhou, W. (2013). Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2013.139. pp. 184-190. doi: 10.1061/(ASCE)WR.19435452.0000247.
- Dias, V. C., Besner, M. C., & Prévost, M. (2017). Predicting water quality impact after district metered area implementation in a full-scale drinking water distribution system. *Journal-American Water Works Association*, 109(9), E363-E380.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Giudicianni, C., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V., & Varela, J. M. R. (2017). Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks. *Water*, 9(7), 463.
- Di Nardo, A., Giudicianni, C., Greco, R., Herrera, M., & Santonastaso, G. F. (2018). Applications of graph spectral techniques to water distribution network management. *Water*, 10(1), 45.
- Dini, M., Nazif, S., Shokoohi, M. & Tabesh, M. (2016). Water Quality Based Multi-Objective Optimal Design of Water Distribution Systems. *Water Resource Manage.* pp. 1. doi: 10.1007/s11269-016-1512-6.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science* (pp. 39-43). Ieee.
- Everett, M. G., & Borgatti, S. P. (2005). Extending centrality. *Models and methods in social network analysis*, 35(1), 57-76.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*, John Wiley & Sons. Ltd., New York, 330.
- Fanner, P.V., Liemberger, R. Sturm, J. & Thornton, R. (2007). *Leakage Management Technologies*. AWWA Research Foundation and U.S. Environmental Protection Agency.
- Fortunato, S., & Castellano, C. (2007). Community structure in graphs. *arXiv preprint arXiv:0712.2716*.
- Foulds L R (1983). The heuristic problem-solving approach. *Journal of the Operational Research Society* 34: 927-934.
- Gallagher, R. J., Young, J. G., & Welles, B. F. (2021). A clarified typology of core-periphery structure in networks. *Science advances*, 7(12), eabc9800.
- Gestal, M. (2013). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*.

- Girvan, M., & Newman, M. E. (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 99(12), 7821-7826.
- Goldberg, D. E. (1989). *Optimization, and machine learning. Genetic algorithms in Search.*
- Han, Z., Ma, D., Hou, B., & Wang, W. (2020). Seismic resilience enhancement of urban water distribution system using restoration priority of pipeline damages. *Sustainability*, 12(3), 914.
- Heppner, F. (1990). A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. *The ubiquity of chaos.*
- Herrera, M., Giudicianni, C., & Creaco, E. (2024). District Information Areas: A Distributed Decision-Making Approach for Urban Water Systems. *Engineering Proceedings*, 69(1), 64.
- Horn, R. A. (1991). *Topics in matrix analysis.*
- Iglesias, P.L., Mora, D., Martínez, F. & Ribelles, J.V. (2018). Combining Skeletonization, Setpoint Curves, and Heuristic Algorithms to Define District Metering Areas in the Battle of Water Networks District Metering Areas. *J. Water Resour. Plann. Magane.*, 2018, 144(6): 04018023. pp. 1-7. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943.5452.0000938.
- Jacome, R. S., Anchieta, T., Brentan, B. M., Herrera, M., Galvan, X. D., Nevarez, J. A. A., & Rodriguez, J. M. (2025). Core-periphery structure for district metered area partitioning in urban water distribution systems. *Water Science and Engineering.*
- Kanakoudis, V., Kourbasis, N., Patelis, M. & Tsitsifli, S. (2020). Optimizing Water Age and Pressure in Drinking Water Distribution Networks. *Enviromental Sciences Proceedings 2020*,2,51. pp. 1-9. doi: 10.3390/environsciproc2020002051.
- Kanakoudis, V., Kravvari, A. & Patelis, M. (2020). Pressure Regulation vs. Water Aging in Water Distribution
- Kojaku, S., & Masuda, N. (2017). Finding multiple core-periphery pairs in networks. *Physical Review E*, 96(5), 052313.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization (PSO). In *Proc. IEEE international conference on neural networks*, Perth, Australia (Vol. 4, No. 1, pp. 1942-1948).
- Lambiotte, R., Delvenne, J. C., & Barahona, M. (2008). Laplacian dynamics and multiscale modular structure in networks. *arXiv preprint arXiv:0812.1770.*
- Lee, S. H., Cucuringu, M., & Porter, M. A. (2014). Density-based and transport-based core-periphery structures in networks. *Physical Review E*, 89(3), 032810. *Networks. Journal Water* 2020,12,1323. pp. 1-17. doi:10.3390/w12051323.
- Newman, M. E. (2004). Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(6), 066133.
- MirHassani, S. A., & Hooshmand, F. (2019). *Methods and models in mathematical programming.*
- Mezura-Montes, E., & Coello, C. A. C. (2011). Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: past, present and future. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(4), 173-194.
- Morrison, J., Rogers, D. & Tooms, S. (2007). *DMA Management Guidance Notes (1a ed.). International Water Association, Specialist Group, Efficient Operation and Management, Water Loss Task Force.*
- Ostfeld, A. & Salomons, E. (2017). Water age clustering for water distribution systems. *Procedia Engineering* 186 (2017). pp. 470-474. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.256.

- Pedersen, M. E. H. (2010). Good parameters for particle swarm optimization. Hvass Lab., Copenhagen, Denmark, Tech. Rep. HL1001, 1551-3203.
- Pesantez, J. E., & Berglund, E. Z. (2018, July). Automatic approach to design district metered areas for water distribution systems:(186). In WDSA/CCWI joint conference proceedings (Vol. 1).
- Pesantez, J. E., Berglund, E. Z., & Mahinthakumar, G. (2019). Multiphase procedure to design district metered areas for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(8), 04019031.
- Ramos, A., & Cerisola, S. (2005). Optimización estocástica. Pontificia Universidad COMILLAS de Madrid.
- Reichardt, J., & Bornholdt, S. (2006). Statistical mechanics of community detection. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 74(1), 016110.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: users manual.
- Ruggiero VR (1995). *The Art of Thinking*. 4th edition. HarperCollins College Publishers: New York, p.75.
- Saxena, A., & Iyengar, S. (2020). Centrality measures in complex networks: A survey. arXiv preprint arXiv:2011.07190.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2000). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-013CNA-2000, REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE-ESPECIFICACIONES DE HERMETICIDAD Y MÉTODOS DE PRUEBA.
- Shang, F., Rossman, L. A., & Uber, J. G. (2023). EPANET-MSX 2.0 user manual. US Environmental Protection Agency: Cincinnati, Ohio.
- Sharma, A. N., Dongre, S. R., & Gupta, R. (2023). Many-objective optimisation tool for the design of district metered areas in pumped water distribution networks. *Water Supply*, 23(9), 3789-3804.
- Shekofteh, M. R., Yousefi-Khoshqalb, E., & Piratla, K. (2023). Application of Multi-Objective Optimization and Graph Theory Algorithms to Achieve Efficient and Adaptable Partitioning of District Metered Areas in Water Distribution Networks.
- Shen, X., Aliko, S., Han, Y., Skipper, J. I., & Peng, C. (2021). Finding core-periphery structures with node influences. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 9(2), 875-887.
- Silver, E.A. (2004). An Overview of Heuristic Solution Methods.
- Tang, W., Zhao, L., Liu, W., Liu, Y., & Yan, B. (2019). Recent advance on detecting core-periphery structure: a survey. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 1(3), 175-189.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2(2), 115-122.
- Waenerlund, A. K., Gustafsson, P. E., Virtanen, P., & Hammarström, A. (2011). Is the core-periphery labour market structure related to perceived health? findings of the Northern Swedish Cohort. *BMC Public Health*, 11(1), 956.
- Walpole R., Myers R. H. & Myers S. L. (2012) Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Novena Edición. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2012 ISBN: 978-607-32-1417-9
- Wang, D., Tan, D., & Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft computing*, 22(2), 387-408.

Water Authorities Association (1985). Leakage Control Policy and Practice.

WDSA CCWI (2022). Instrucciones de la batalla contra suministro de agua intermitente. https://wdsaccwi2022.upv.es/wp-content/uploads/descargas/BIWS_Instructions.pdf.

Yang, J., & Leskovec, J. (2014). Overlapping communities explain core–periphery organization of networks. *Proceedings of the IEEE*, 102(12), 1892-1902.

Zhang, X., Martin, T., & Newman, M. E. (2015). Identification of core-periphery structure in networks. *Physical Review E*, 91(3), 032803.

Zhang, Q., Wu, Z. Y., Zhao, M., Qi, J., Huang, Y., & Zhao, H. (2017). Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(9), 04017057