

# Trabajo Fin de Máster

## SECTORIZACIÓN ÓPTIMA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA, COLOMBIA UTILIZANDO LOS ALGORITMOS METIS.

**Intensificación: HIDRÁULICA URBANA**

**Autor:**

OLMEDO ANDRÉS ABRIL ORELLANA

**Tutor:**

DR. F. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO

**Cotutor:**

DR. PEDRO L. IGLESIAS REY

FEBRERO, 2018



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

mihma  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente

Página dejada en blanco deliberadamente

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> SECTORIZACIÓN ÓPTIMA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA, COLOMBIA UTILIZANDO LOS ALGORITMOS METIS.
<b>Título del TFM en inglés:</b> OPTIMAL SEGMENTATION OF THE WATER DISTRIBUTION NETWORK OF THE COLOMBIAN CITY OF SANTA MARTA USING METIS ALGORITHMS.
<b>Título del TFM en valenciano:</b> SECTORITZACIÓ ÒPTIMA DE LA XARXA DE DISTRIBUCIÓ D'AGUA POTABLE DE LA CIUTAT DE SANTA MARTA, COLÒMBIA UTILITZANT ELS ALGORITMES METIS.
<b>Alumno:</b> OLMEDO ANDRÉS ABRIL ORELLANA
<b>Tutor:</b> DR. F. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO
<b>Cotutor/es:</b> DR. PEDRO L. IGLESIAS
<b>Fecha de Lectura:</b> FEBRERO, 2018

Resumen
<b>En español:</b>
<p>El agua potable es un recurso indispensable para la vida, es un producto de primera necesidad para la actividad doméstica, así como para las actividades urbanas, agrícolas e industriales. La disponibilidad del agua potable está ligada al bienestar y prosperidad de cualquier sociedad, pero ésta es un recurso escaso y sumado a los efectos del cambio climático en las aguas naturales, obligan a que se deba gestionar de una manera eficiente. De ahí la importancia que cobra la buena gestión de las Redes de Abastecimiento de Agua Potable (RDAP).</p> <p>El principal problema que afrontan las RDAP es el agua no registrada (ANR), es decir el sub-registro de los contadores y las fugas en las tuberías, acometidas y unidades de almacenamiento. El control de éstas pérdidas en los sistemas de abastecimiento genera un aumento en el rendimiento de la red, así como un mejor aprovechamiento por parte de la población. Una de las soluciones para contrarrestar éstas pérdidas es la sectorización de la red.</p> <p>La sectorización, implica la subdivisión de la red en subredes con una entrada de agua controlada llamadas District Metered Areas (DMA). La búsqueda de una sectorización óptima para definir los DMA es un tema desafiante y crucial en el análisis, planificación y gestión de las redes de distribución de agua. El mayor beneficio de su implementación es el aumento de la facilidad para detectar cualquier anomalía dentro de la red debido a la reducción de su tamaño, además, no sólo permite aplicar técnicas particulares de control de fugas, sino permite la implementación de modelos de gestión.</p> <p>El presente estudio trata sobre obtener una sectorización óptima para el sector sur de la RDAP de la ciudad de Santa Marta, Colombia. En donde se busca que todos los DMA cumplan con la semejanza de la demanda y uniformidad en las presiones minimizando a su vez el agua extraída desde el embalse principal que alimenta la red, es decir optimizando el agua disponible. Para ello se utilizan los algoritmos implementados en METIS, los cuales se basan en esquemas de partición recursivos bi-seccionales multinivel, multinivel en varias direcciones y multi-restricción.</p>

**En valenciano:**

L'aigua potable és un recurs indispensable per a la vida, és un producte de primera necessitat per a l'activitat domèstica, així com per a les activitats urbanes, agrícoles i industrials. La disponibilitat de l'aigua potable està lligada al benestar i prosperitat de qualsevol societat, però aquesta és un recurs escàs i sumat als efectes del canvi climàtic en les aigües naturals, obliguen a que s'hagi de gestionar d'una manera eficient. D'aquí la importància que cobra la bona gestió de les Xarxes d'Abastament d'Aigua Potable (RDAP).

El principal problema que afronten les RDAP és l'aigua no registrada (ANR), és a dir el sub-registre dels comptadors i les fuites a les canonades, escomeses i unitats d'emmagatzematge. El control d'aquestes pèrdues en els sistemes d'abastament genera un augment en el rendiment de la xarxa, així com un millor aprofitament per part de la població. Una de les solucions per contrarestar aquestes pèrdues és la sectorització de la xarxa.

La sectorització, implica la subdivisió de la xarxa en subxarxes amb una entrada d'aigua controlada trucades District Metered Àrees (DMA). La recerca d'una sectorització òptima per definir els DMA és un tema desafiant i crucial en l'anàlisi, planificació i gestió de les xarxes de distribució d'aigua. El major benefici de la seva implementació és l'augment de la facilitat per detectar qualsevol anormalitat dins de la xarxa a causa de la reducció de la seva mida, a més, no només permet aplicar tècniques particulars de control de fuites, sinó permet la implementació de models de gestió.

El present estudi tracta sobre obtenir una sectorització òptima per al sector sud de la RDAP de la ciutat de Santa Marta, Colòmbia. A on es busca que tots els DMA compleixin amb la semblança de la demanda i uniformitat en les pressions minimitzant al seu torn l'aigua extreta des de l'embassament principal que alimenta la xarxa, és a dir optimitzant l'aigua disponible. Per a això s'utilitzen els algoritmes implementats en METIS, els quals es basen en esquemes de partició recursius bi-seccionals multinivell, multinivell en diverses direccions i multi-restricció.

**En inglés:**

“Water is an indispensable resource for life, it is a product of prime necessity for domestic activity, as well as for urban, agricultural and industrial activities. The availability of water is linked to the well-being and prosperity of any society, but this is a scarce resource and added to the effects of climate change in natural waters, require that it must be managed in an efficient way. Hence the importance of the good management of Water Distribution Networks (WDN).

The main problem faced by WDN is unregistered water, that is, meters sub-registration and leaks in pipelines, connections and storage units. The control of these losses in the supply systems generates an increase in the performance of the network, as well as a better use by the population. One of the solutions to counter these losses is the segmentation of the network.

Segmentation involves sub-dividing the network into subnets with a controlled water input named District Metered Areas (DMA). The search for optimal segmentation aimed at defining DMA is a challenging and crucial issue in the analysis, planning and management of WDN. The greatest benefit of its implementation is the increase of the facility to detect any abnormality within the network due to the reduction of its size, furthermore, it not only allows to apply particular leaks control techniques, but allows the implementation of management models.

This study deals with obtaining an optimal segmentation for the southern sector of the WDN of the Colombian city Santa Marta. In which it is sought that all the DMA comply with demand similarity and pressure uniformity minimizing the water extracted from the main reservoir that feeds the network, that is to say optimizing the available water. For this purpose, the algorithms implemented in METIS are used, which are based on the multilevel recursive-bisection, multi-level k-way, and multi-constraint partitioning schemes.

**Palabras clave español:** Sectorización, Red de Distribución de Agua Potable, METIS

**Palabras clave valenciano:** Sectorizació, Xarxa de Distribució d'Aigua Potable, METIS

**Palabras clave inglés:** Segmentation, Water Distribution Network, METIS

Página dejada en blanco deliberadamente

Para mi padre, Olmedo.

Página dejada en blanco deliberadamente



## **Agradecimientos**

Al Doctor Javier Martínez Solano por su brillante dirección, su constante aporte de conocimiento, motivación y apoyo en el desarrollo del presente proyecto. Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia y a todos sus integrantes que colaboraron en el proyecto. A los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por todos los conocimientos brindados, en especial al Doctor Pedro Iglesias Rey

# Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Objetivos .....	17
1.3. Estructura del documento.....	17
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
2.1. El software EPANET.....	19
2.1.1. Introducción.....	19
2.1.2. Descripción del modelo .....	19
2.1.3. Capacidades de EPANET.....	20
2.1.4. Información requerida por EPANET.....	21
2.1.5. Limitaciones de EPANET.....	22
2.1.6. El Toolkit de EPANET.....	22
2.2. La sectorización.....	22
2.2.1. Conceptualización .....	22
2.2.2. Historia de la sectorización .....	23
2.2.3. Diseño de la sectorización .....	24
2.2.4. Casos de aplicación.....	28
2.2.5. Criterios de evaluación de la sectorización .....	32
2.3. El algoritmo METIS.....	33
2.3.1. Introducción.....	33
2.3.2. Particionado de un grafo con METIS .....	34
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	37
3.1. La ciudad de Santa Marta.....	37
3.2. La red de distribución de Santa Marta .....	39
3.3. El sector sur de Santa Marta .....	41
4. METODOLOGÍA.....	45
4.1. Descripción general.....	45
4.2. Análisis previo .....	47
4.3. Análisis de los depósitos de regulación .....	49
4.4. Análisis de las tuberías principales .....	51
4.5. Análisis de las bombas .....	51
4.6. Sectorización con criterio ingenieril.....	52
4.6.1. Casos especiales .....	55
4.7. Sectorización con los algoritmos METIS.....	59
4.7.1. Librería de acceso a METIS .....	61
4.7.2. Análisis de los pesos de las tuberías .....	63

4.7.3.	Análisis de los límites de los DMAs .....	65
4.8.	Análisis para el cambio de tuberías .....	65
4.9.	Análisis de la configuración .....	66
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
5.1.	Sectorización óptima .....	67
5.2.	Expansión de los depósitos de regulación .....	70
5.3.	Semejanza de la demanda .....	70
5.4.	Uniformidad de las presiones .....	72
5.5.	Límites de extracción.....	73
5.5.1.	Caudales procedentes del embalse de El Roble.....	74
5.5.2.	Caudales procedentes de la estación de bombeo de Gaira .....	74
5.5.3.	Caudales procedentes del embalse de Toribio .....	75
6.	CONCLUSIONES.....	77
6.1.	Conclusiones .....	77
6.2.	Indicios de calidad .....	79
7.	REFERENCIAS .....	81

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Punto óptimo de control de fugas.....	25
Figura 2.2. Fases de una partición multinivel de un grafo. ....	34
Figura 2.3. Formato de entrada de METIS para varios tipos de gráficos.....	36
Figura 3.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Santa Marta .....	38
Figura 3.2. Fuentes de agua de la ciudad de Santa Marta.....	38
Figura 3.3. Red hidráulica de Santa Marta.....	39
Figura 3.4. Embalses y depósitos de la red de distribución de Santa Marta.....	40
Figura 3.5. Patrón de consumo de la red de Santa Marta. ....	41
Figura 3.6. Áreas principales de la red.....	42
Figura 3.7. Sector Sur de la red. ....	43
Figura 3.8. Estación de bombeo Gaira.....	43
Figura 4.1. Esquema de la metodología de trabajo.....	46
Figura 4.2. Configuración de la zona Sur de la red de Santa Marta. ....	47
Figura 4.3. Zonas Sur I y II de la red de Santa Marta.....	48
Figura 4.4. Diagrama de configuración de los depósitos de regulación.....	49
Figura 4.5. Evolución temporal de un depósito cuando sus entradas y salidas están balanceadas. ....	50
Figura 4.6. Redes de alimentación, transporte y distribución del sector sur de la red. ....	51
Figura 4.7. Análisis de las bombas. ....	52
Figura 4.8. Tuberías cerradas para dividir la red en las zonas Sur I y II. ....	53
Figura 4.9. Tuberías cerradas para desviar el caudal de la estación de bombeo de Gaira. ....	54
Figura 4.10. Tuberías que conectan la estación de bombeo de Gaira con la zona Sur II. ....	55
Figura 4.11. Casos especiales de la red. A) ramificaciones en la configuración de DMAs; B) nudos con presión superior a la máxima; C) nudos que no pertenecen a ningún DMA. ....	56
Figura 4.12. Casos especiales de la red. Detalle A: casos de ramificaciones en la configuración de DMAs.....	56
Figura 4.13. Casos especiales de la red. Detalle B: casos de nudos con presión superior a la máxima. ....	57
Figura 4.14. Casos especiales de la red. Detalle C: casos con nudos que no pertenecen a ningún DMA. ....	57
Figura 4.15. Casos en los que la diferencia de cota es muy elevada. ....	58
Figura 4.16. Solución a los casos de DMAs con nudos con diferencia de cota elevada. (I).....	58
Figura 4.17. Solución a los casos de DMAs con nudos con diferencia de cota elevada. (II) .....	59
Figura 4.18. Cierre de tuberías en el sector 10 y configuración de las PRV. ....	60
Figura 4.19. Red de la zona Sur II. ....	60
Figura 4.20. Esquema del script para sectorizar la red utilizando METIS.....	61
Figura 4.21. Algoritmo implementado en MATLAB para el cambio de formato de EPANET a METIS. ....	62
Figura 4.22. Algoritmo implementado en Visual NET para ejecutar la librería de METIS. ....	63
Figura 4.23. Gradiente hidráulico de las tuberías de la red. ....	63
Figura 4.24. Resultado del algoritmo para el análisis de los límites de cada DMA. ....	65
Figura 5.1. Solución para la configuración óptima de la zona sur de Santa Marta. ....	68

Figura 5.2. Número de nudos con presión mayor a la máxima permitida con respecto al número de DMAs.....	69
Figura 5.3. Resultados de la semejanza de la demanda para cada configuración de sectorización de la red.....	70
Figura 5.4. Resultados de la semejanza de la demanda en los DMAs encontrados utilizando criterio ingenieril.....	71
Figura 5.5. Resultados de la semejanza de la demanda en los DMAs encontrados utilizando METIS.....	71
Figura 5.6. Resultados de la uniformidad de las presiones para cada configuración de sectorización de la red.....	72
Figura 5.7. Resultados de la uniformidad de presiones para los DMAs obtenidos mediante criterio ingenieril.....	72
Figura 5.8. Resultados de la uniformidad de presiones para los DMAs obtenidos mediante METIS.....	73
Figura 5.9. Esquema de funcionamiento de la red.....	74

## Índice de tablas

Tabla 3.1. Límites de extracción de embalses y pozos de la ciudad de Santa Marta. .	41
Tabla 4.1. Demandas de la zona sur y centro de la red de Santa Marta. ....	47
Tabla 4.2. Caudal máximo de cada depósito. ....	50
Tabla 4.3. Ponderación de los bordes para diferentes diámetros.....	64
Tabla 5.1. Resultados de la demanda y presión media de cada uno de los sectores de la red. ....	69
Tabla 5.2. Caudales medios durante el funcionamiento de la red y límites de extracción. ....	74

Página dejada en blanco deliberadamente

# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Antecedentes

El agua potable es un recurso indispensable para la vida, es un producto de primera necesidad para las actividades domésticas, urbanas, agrícolas e industriales. Su disponibilidad está ligada al bienestar y la prosperidad de cualquier sociedad, pero el agua potable es un recurso escaso, que, sumando a los efectos del cambio climático en las aguas naturales, obligan a gestionar el agua potable de una manera eficiente. De ahí la importancia que tiene la buena gestión de las Redes de Abastecimiento de Agua Potable (RDAP). Estas infraestructuras permiten transportar el agua desde las fuentes naturales hasta su destino final en los consumidores, es decir que a través de ellas se da el proceso de abastecimiento de agua potable a la población. En tal sentido, existe una relación directa entre la calidad del servicio de abastecimiento de agua potable de una ciudad y su grado de desarrollo.

Cuando hablamos de una RDAP óptima, hacemos referencia a una red que cumple a lo largo de su extensión con las condiciones de presiones mínimas preestablecidas de acuerdo a normativas y reglamentos técnicos establecidos para cada región. Asumiendo una apropiada gestión administrativa, los principales problemas de las RDAP pueden resumirse como: fugas y agua no registrada, daños en la integridad física de la red y la calidad del agua a distribuir.

En una RDAP las principales causas para la existencia de agua no registrada (ANR) son: el sub-registro de los contadores y las fugas que se producen en tuberías,

acometidas y unidades de almacenamiento. El control de éstas pérdidas en los sistemas de abastecimiento genera un aumento en el rendimiento de la red, así como un mejor aprovechamiento por parte de la población (Pilcher et al. 2007).

En países en vías de desarrollo, las pérdidas por fugas pueden llegar a representar más del 50 por ciento del agua inyectada en la red (Kingdom et al. 2006; SAWUADB 2007). En una red con estas características se deberá inyectar el doble de agua para que esta pueda llegar a los usuarios. Se estima que el volumen anual de pérdidas de agua alcanza los 26.7 miles de millones de metros cúbicos, lo que representa casi 5.9 millones de dólares. Con sólo reducir este valor a la mitad se podría abastecer hasta a 90 millones de personas (WWC 2009). La *International Water Association* estima que reducir las pérdidas a la mitad del nivel actual, representarían 11 mil millones de metros cúbicos, lo que permitiría el acceso de agua potable a 130 millones de personas, implicando ingresos de más de 4 mil millones de dólares para las empresas operadoras de agua (Alegre et al. 2006).

En países desarrollados la situación es muy diferente, el porcentaje de pérdidas no suele superar el 15% (Kingdom et al. 2006); no obstante las previsiones no indican una mejora a corto plazo. Un estudio conducido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), estima que para el año 2025 dos tercios de la población mundial será objeto de estrés hídrico, bien sea moderado o alto. También se estima que en los Estados Unidos las extracciones de agua pasarán a duplicarse hasta cerca del 40% del agua disponible (Thornton et al. 2008).

Retornando a los países en vías de desarrollo es muy común que cerca de la mitad de los consumidores sufran de un servicio intermitente y de baja calidad (Kingdom et al. 2006). Esta situación se agrava si se tiene en cuenta que a la hora de valorar los costes del agua perdida solamente se tienen en cuenta los costos marginales, es decir, los costos asociados al proceso operativo que implica llevar el agua desde las fuentes hasta los usuarios; sin embargo, existen otros procesos que representan los costos no asociados a la producción y que no están reflejados en el precio de mercado.

Cifras de esta naturaleza resaltan la necesidad de una gestión sostenible del agua potable con el fin de hacer frente a la creciente demanda del recurso a nivel mundial. Hoy en día no existen redes sin ningún tipo de pérdidas, tanto por las implicaciones técnicas como económicas que esto representa; no obstante, se han desarrollado grandes avances en el conocimiento y desarrollo de equipos y técnicas que permiten realizar un seguimiento mucho más exhaustivo de las fugas (Pilcher et al. 2007), entre las que podemos destacar:

- Subdivisión de las redes en pequeñas subredes mediante el cierre temporal de válvulas e instalación de caudalímetros.
- Métodos tradicionales de cierres controlados de válvulas.
- Uso de grabadores acústicos como herramientas de búsqueda.
- Búsquedas sonoras.

La sectorización, es una opción estratégica e implica la subdivisión de la red en subredes con una entrada de agua controlada llamadas *District Metered Areas* (DMA). Cada DMA se maneja con un valor máximo de demanda y se trata de mantener una homogeneidad en lo que a elevación de terreno se refiere (Laucelli et al. 2016). El mayor beneficio de su implementación es el aumento de la facilidad para detectar cualquier anomalía dentro de la red debido a la reducción de su tamaño (Laucelli et al. 2016; Herrera Fernández et al. 2011; Morrison et al. 2007). Contar con una red sectorizada no



sólo permite aplicar técnicas particulares de control de fugas, sino además permite la implementación de modelos de gestión (Campbell 2013).

El concepto de sectorización se introdujo a principios de la década de 1980 en el reporte 26 del Control de Pérdidas y Prácticas de la Asociación de Autoridades del Agua de Inglaterra (Morrison et al. 2007). En la actualidad es una técnica empleada en muchos países alrededor del mundo, especialmente en Europa y América Latina.

En la mayor parte de los casos en los que se ejecutan proyectos de sectorización no se suele seguir un proceso de rigor científico-técnico y, por el contrario, suele basarse en aproximaciones de prueba y error (Di Nardo et al. 2013). Esto sumando a que, a nivel normativo, no existen directrices claras respecto a la sectorización. Los criterios recomendados en la actualidad se basan en el número de acometidas o en la longitud de la red, sin tener en cuenta el contexto en el que se desarrolla el proceso; trayendo como consecuencia el hecho de que en muchos casos su implementación se ejecute de manera casi empírica acarreando consecuencias negativas como: desabastecimiento, pérdidas de carga innecesarias y la disminución de la calidad del agua (Di Nardo et al. 2014).

Es importante destacar que la sectorización cambia el comportamiento hidráulico de cualquier RDAP, debido a que se encuentra en conflicto con el criterio de diseño de redes malladas, que permite a las RDAP ser más confiable ante condiciones de fallo mecánico e hidráulico (Di Nardo & Di Natale 2011; Mays 2000).

En los últimos años se han desarrollado un gran número de estudios sobre la sectorización de RDAP, en donde se le ha dado un enfoque que incluya la optimización dentro del proceso, para no solo implementarla como una herramienta para el control de ANR, sino también como una herramienta de gestión sostenible de RDAP. Por todo lo anterior expuesto nace la motivación de este trabajo, en donde se deja claro que la implementación de la sectorización de una RDAP, siempre deberá apoyarse en un análisis apropiado.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo del presente estudio es obtener una sectorización óptima para la zona sur de la RDAP de la ciudad de Santa Marta, Colombia. En donde se busca que todos los DMA cumplan con la semejanza de la demanda y la uniformidad en las presiones minimizando a su vez el agua extraída desde el embalse principal que alimenta la red, es decir optimizando el agua disponible.

El objetivo específico del estudio es implementar METIS para la sectorización de la red, un conjunto de algoritmos para el particionamiento de grafos, división de mallas de elementos finitos y para rellenar matrices dispersas; los cuales se basan en esquemas de partición recursivos bi-seccionales multinivel, multinivel en varias direcciones y multi-restricción.

## **1.3. Estructura del documento**

El capítulo 2 trata sobre los fundamentos teóricos en los cuales se encuentra basado el presente estudio. Describe una breve introducción al software EPANET, sus capacidades, limitaciones y el Toolkit para MATLAB con el que se desarrolló el trabajo. A continuación, habla sobre la sectorización, su conceptualización, historia y pautas para su diseño; además incluye una recopilación de casos de aplicación alrededor del mundo, así como los criterios de evaluación utilizados para encontrar un óptimo. Finalmente, se habla sobre los algoritmos METIS, sus principios matemáticos básicos y

O. Andrés Abril O.

su funcionamiento para particionar un grafo, termina describiendo los archivos de entrada y salida necesarios para poder utilizar éstos algoritmos con cualquier red de nudos.

El capítulo 3 es una descripción del problema a tratar, presenta una visión general sobre la situación actual de la ciudad de Santa Marta y su red de distribución de agua potable con especial detalle al sector sur de la misma, caso de estudio del proyecto.

El capítulo 4 presenta la metodología utilizada para resolver el problema de la sectorización de la red. Se encuentra dividida en una descripción general, análisis previo, análisis de los depósitos de regulación, de las tuberías principales, de la estación de bombeo, de los cambios de tuberías y de la configuración de la sectorización. Incluye además la descripción de los procesos de sectorización con criterio ingenieril y con los algoritmos METIS, así como todos los casos especiales de la red.

El capítulo 5 describe el análisis y la discusión de los resultados obtenidos. Muestra la sectorización óptima encontrada para la red, los resultados de la expansión de los depósitos de regulación, así como un estudio detallado de la semejanza de la demanda y la uniformidad de presiones en los que se basó el estudio para seleccionar la configuración óptima. Finalmente muestra el análisis de los resultados de los límites de extracción de las fuentes de abastecimiento de la red luego de aplicar la sectorización.

El capítulo 6 presenta las conclusiones encontradas con el presente estudio, así como los indicios de calidad del mismo. Finalmente, el capítulo 7 muestra las referencias utilizadas.

## Capítulo 2:

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

### 2.1. El software EPANET

#### 2.1.1. Introducción

EPANET es un programa de simulación para el análisis hidráulico y de calidad de un sistema de distribución de agua durante periodos de operación prolongados o cuasi-estáticos. Para esto se debe definir un conjunto completo de elementos que constituyen la red: tuberías, nudos, válvulas, bombas, depósitos, embalses; tanto como en su ubicación espacial, así como a sus propiedades físico-hidráulicas. Lo que permite seguir la evolución del flujo del agua en las tuberías, la presión en los nudos de demanda, el nivel del agua en los depósitos, la concentración de cualquier sustancia, los tiempos de permanencia del agua en la red y su procedencia desde los distintos puntos de alimentación. El modelo deberá considerar hipótesis de carga y de regulación del sistema con las que se pretenda simular el modelo.

EPANET es de libre distribución y permite acceder al código fuente para ser modificado por el usuario y adaptarlo a sus necesidades particulares, fue desarrollado originalmente por la *Water Supply and Water Resources Division* de la *United States Environmental Protection Agency* (EPA) y en países de habla hispana la versión más difundida es la desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

#### 2.1.2. Descripción del modelo

EPANET fue concebido como una herramienta de la evolución de la calidad del agua, mientras discurre por las redes de distribución. Pero desde un punto de vista físico, la calidad del agua es consecuencia de los procesos de transporte, mezcla y reacción de los contaminantes disueltos en ella, esto significa que antes de resolver el

problema de calidad, hay que resolver el problema hidráulico para conocer los caudales circulantes por las tuberías y la evolución de los volúmenes almacenados en los depósitos. Éstos a su vez dependen de las demandas de la red, de las características físicas del sistema y su regulación, por ende, resolver el problema hidráulico es más complejo de resolver que el problema de calidad.

El modelo está compuesto por un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento dinámico de la red bajo determinadas leyes de operación. Admite tuberías, bombas de velocidad fija y variable, válvulas de estrangulación, reductoras, sostenedoras, controladoras de caudal, rotura de carga, depósitos de nivel fijo o variables, leyes de control temporales o por consignas de presión o nivel, curvas de modulación, etc. El módulo de calidad del agua permite modelar fenómenos tales como la reacción de los constituyentes del agua, la reacción con las paredes de las tuberías y el transporte e masa entre las paredes y el fluido trasegado, admite contaminantes reactivos y no reactivos, el cálculo de concentraciones, procedencias y tiempos de permanencia.

### **2.1.3. Capacidades de EPANET**

Un modelo de una red de distribución de agua es una representación matemática que permite reproducir su comportamiento para simular distintos escenarios y anticipar soluciones a problemas futuros.

Dentro las capacidades del modelo de EPANET se deben destacar las capacidades del modelo hidráulico y de las del modelo de calidad de agua.

#### **2.1.3.1. Capacidades del modelo hidráulico**

- No existe límite en el tamaño de la red que se desea analizar.
- Calcula las pérdidas por fricción en las conducciones mediante las expresiones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.
- Incluye pérdidas menores en elementos como codos, acoplamientos, etc.
- Modela bombas funcionando tanto a velocidad de giro constante como a velocidades de giro variables.
- Calcula la energía consumida y el coste de bombeo de las estaciones.
- Modela diferentes tipos de válvulas, incluyendo las de regulación, retención, aislamiento, reductoras de presión, de control de caudal, etc.
- Permite el almacenamiento de agua en depósitos que presenten cualquier geometría (sección del depósito variable con la altura del mismo).
- Posibilidad de establecer diferentes categorías de consumo en los nudos, cada una de ellas con su propia curva de modulación.
- Modela consumos dependientes de la presión que salen al exterior del sistema a través de emisores (rociadores, aspersores, fugas).
- Permite utilizar controles de tiempo o sistemas de regulación más complejos mediante consignas.

### **2.1.3.2. Capacidades del modelo de calidad del agua**

- Seguimiento en el tiempo de sustancias no reactivas que se encuentran en la red.
- Modelación del comportamiento de una sustancia reactiva a lo largo del tiempo.
- Modelación del tiempo de permanencia del agua en red (edad del agua).
- Seguimiento del porcentaje de fluido procedente de un nudo (procedencia del agua).
- Modelación de reacciones cinéticas: Reacciones en el seno de fluido mediante ecuaciones de orden  $n$  y reacciones con la pared interior de la tubería mediante reacciones de orden 0 o 1.
- Considera las limitaciones de transferencia de masa cuando modela reacciones en la pared de tubería.
- Permite reacciones de crecimiento o decaimiento de una sustancia hasta alcanzar una concentración límite.
- Permite correlacionar los coeficientes de reacción en la pared de la tubería con la rugosidad de la misma.
- Permite la adición de sustancias en forma de concentración o de caudal másico variables a lo largo del tiempo en cualquier punto de la instalación.
- Modela los depósitos como cuatro tipos distintos de reactores: de mezcla completa, de flujo en pistón (FIFO), en cortocircuito (LIFO) o con dos compartimentos de mezcla.
- Capacidades de estudio de fenómenos de calidad:
  - Mezclado de aguas de diferentes fuentes.
  - Edad o tiempo de permanencia del agua en el sistema.
  - Disminución del cloro residual.
  - Crecimiento de los subproductos de la desinfección.
  - Seguimiento de posibles situaciones de propagación de contaminante.

### **2.1.4. Información requerida por EPANET**

Para construir el modelo es necesario primero confeccionar el esquema de la red mediante la sucesiva inclusión de los elementos constitutivos de la misma. Editando las propiedades de dichos elementos, determinando las cualidades fundamentales que definen su comportamiento. A continuación, se deberá caracterizar el modo de funcionamiento con las correspondientes leyes de control, curvas de modulación de la demanda, etc. Por último, se seleccionan las opciones de simulación y se ejecuta el modelo para obtener una serie de resultados que podrán ser analizados.

De toda la información requerida por el modelo se puede diferenciar entre componentes físicos y no físicos. Los primeros son aquellos que definen la configuración de la red tales como: tuberías, nudos, bombas, válvulas, etc. Cada uno de estos tendrá una serie de atributos como su posición, estado, caudal, altura piezométrica entre otros.

Los componentes no físicos, son aquellos que complementan la descripción del comportamiento de cada uno de los elementos físicos, así como las condiciones de operación de la red tales como: las curvas de modulación de la demanda, curvas de características de las bombas, leyes de control de los componentes, etc.

### **2.1.5. Limitaciones de EPANET**

En EPANET los modelos pueden ser inerciales y no-inerciales. Los no-inerciales asumen condiciones de cuasi-equilibrio, es decir que no hay cambios bruscos en la red. Esto es cierto en gran medida, ya que muchos kilómetros de tubería tienen mucha resistencia al cambio y los usuarios no abren y cierran los grifos todos al unísono. Sin embargo, no se consideran fenómenos reales y rápidos como la rotura de tuberías o diversos fenómenos transitorios generados por maniobras repentinas en los elementos de la red.

Se debe mencionar también que EPANET supone que el total del agua demandada es igual a la inyectada en la red, con lo cual no se consideran las pérdidas debido a fugas en el modelo, debiendo implementar modificaciones en la red para considerarlas.

### **2.1.6. El Toolkit de EPANET**

Este módulo de herramientas, o Toolkit, permite conectar la librería de cálculo de EPANET a cualquier otra aplicación externa, abriendo así un campo de posibilidades enorme para cualquier técnico o investigador que quiera ir más allá de lo que actualmente la aplicación ofrece. Básicamente es una librería de enlace dinámico con una serie de funciones agrupadas por tareas y accesibles al usuario desde casi cualquier entorno de programación (Vegas 2012).

La librería de cálculo de Epanet cuenta con un elevado número de funciones que nos ayudan a recuperar y modificar determinados parámetros del modelo de red, antes y después de realizar una simulación hidráulica, permitiendo además controlar el proceso de simulación paso a paso.

La Toolkit de Epanet puede integrarse en cualquier entorno de programación nativo o en las propias herramientas de programación que ofrecen muchos paquetes de software propietario, ya sean de pago como Excel, AutoCad, ArcGIS, etc o bien libres como OpenOffice, gvSIG, QSIG, etc. De hecho, es lo que han hecho algunos programas comerciales desarrollados por empresas o universidades, orientados al diseño y análisis de redes de distribución de agua (Vegas Niño et al. 2017). Marios Kyriakou y Demetrios Eliades (Vegas Niño et al. 2017) desarrollaron una Toolkit de MATLAB para conectar EPANET con esta aplicación, la cual es de dominio público y está accesible en un repositorio gestionado por la asociación Open Water Analytics desde el portal de software libre Github, la misma que será utilizada en el presente proyecto.

## **2.2. La sectorización**

### **2.2.1. Conceptualización**

La sectorización de RDAP es un proceso que implica la subdivisión de la red en subredes con una entrada de agua controlada (que puede ser exclusiva del sector o compartida por varios sectores al mismo tiempo). Este proceso puede perseguir objetivos como el Control Activo de Fugas (CAF) o incluso el control de la calidad del agua (Farley et al. 2008). El contar con una red sectorizada aumenta la facilidad para detectar cualquier anomalía que ocurra dentro de la red, debido a su reducción de tamaño. Aguas de Valencia (AVSA 2017) establece que el objetivo principal de la

sectorización es obtener la información necesaria de la red distribuida y escalada para llevar acciones claves en cada sector, tales como:

- Realizar auditorías para conocer el rendimiento hidráulico o el ANC.
- Caracterizar la curva de demanda, especialmente el caudal nocturno.
- Detectar de la manera más rápida posible fugas mediante el análisis de la evolución de los caudales mínimos nocturnos.
- Comprobación rápida de los resultados de campañas de detección y reparación de fugas.
- Detectar conexiones ilegales, sub-registro y diversos errores de medición.
- Disminuir los costes de mantenimiento.
- Establecer un plan de inversiones para abastecer sectores con mayor índice de ANC.

La sectorización también podría ser considerada para contrarrestar las situaciones de suministro intermitente, debido a que facilitan la detección y reparación de las fugas más importantes (GIZ et al. 2011).

La subdivisión de la red en subredes con una entrada de agua controlada son llamadas áreas discretas de una red de abastecimiento o District Metered Areas (DMA) las cuales pueden ser aisladas del resto de la red ya sea mediante válvulas seccionadoras o mediante el cierre de tuberías. Es interesante destacar que, para aislar un sector, se pueden emplear tuberías nuevas que permitan redistribuir el caudal (Izquierdo et al. 2008).

Morrison et al. (2007) establece una clasificación de tipo topológico en función del tipo de alimentación del que las redes dispongan. Así, estos pueden ser DMA con una sola entrada, con múltiples entradas y con cascadas de sectores. Las cascadas de sectores corresponden a un DMA dentro de otros DMA.

En función de las fuentes disponibles en las RDAP, su división en sectores puede clasificarse tanto en partición como en sectorización. La partición se aplica cuando la RDAP cuenta con un número reducido de fuentes, siendo los DMA separados mediante la instalación de válvulas seccionadoras o mediante cierres de tuberías (Di Nardo et al. 2014). La sectorización en cambio se emplea en redes con un mayor número de fuentes de abastecimiento, de manera tal que se puede asignar fuentes independientes a cada DMA o también llamados DMA-aislados.

Sectorizar una RDAP en DMA o DMA-aislados depende de las características topológicas de la red, así como de las características topográficas del terreno en las que se ubica. En redes que han evolucionado por problemas coyunturales, en lugar de responder a una planificación previa (como el caso de estudio) es muy posible que no se pueda proceder por un único método, sino por una combinación de ambos.

### **2.2.2. Historia de la sectorización**

El concepto de sectorización de RDAP tal como lo conocemos hoy en día fue introducido en la década de 1980 en Inglaterra por parte la Asociación de Autoridades de Agua en el *Report 26 Leakage Control Policy & Practice* (Technical Working Group on Waste Water 1980). En este reporte se establece el concepto de DMA como un área discreta de un sistema de distribución generalmente creadas por el cierre de las válvulas o por la desconexión completa de las tuberías en las que se dosifican las cantidades de agua que entran y salen de la zona (Morrison et al. 2007).

Desde entonces el avance que ha tenido el estudio de la sectorización ha sido relativamente limitado. Walski et al. (2001) proponen el establecimiento de sistemas con medición para apoyar la implementación de la sectorización de agua potable. Morrison et al. (2007) presenta la guía práctica de la *International Water Association* (IWA) para el manejo de DMA, esta guía establece conceptos en torno a la sectorización y brinda pautas generales para llevar a cabo la misma. Hunaidi & Brothers (2007) se concentran en la búsqueda del tamaño óptimo de los DMA basados en diferentes criterios entre ellos los costes económicos. Tzatchkov & Alcocer-Yamanaka (2011) aplica la teoría de grafos para identificar zonas hidráulicamente independientes mientras Saldarriaga et al. (2008) presenta una metodología para evaluar el efecto de la sectorización de redes de abastecimiento empleando como medida de impacto de la misma el índice de resiliencia antes y después de la sectorización.

Di Nardo & Di Natale (2011) proponen una técnica heurística para encontrar sectores a través del camino de mínima disipación de energía. Con esta técnica, los operadores pueden escoger la partición que optimice el consumo energético en la red. Di Nardo et al. (2011) aplica una la técnica de bisección recursiva multinivel para subdividir redes a múltiples niveles, seleccionando la mejor partición con base a índices de eficiencia energética. También en Di Nardo et al. (2013) se desarrolla una metodología para identificar DMA-aislados mediante combinación de la técnica de grafos con algoritmos genéticos.

Más recientemente, Laucelli et al. (2016) presentan un diseño óptimo para sectorizar RDAP basado en dos pasos; en el primero, se divide la red resolviendo una optimización multi-objetivo minimizando la cantidad de cortes conceptuales versus la maximización del índice de modularidad de la infraestructura. En el segundo paso, se utiliza la red del primer paso y se realiza una optimización minimizando el número de caudalímetros, la reducción de fugas de fondo y la demanda desabastecida de la población.

### **2.2.3. Diseño de la sectorización**

Antes de abordar el tema relativo al diseño de una sectorización de una RDAP, se debe tener en cuenta la naturaleza caótica de las mismas, dado que en muchos casos su crecimiento más que responder a un proceso de planificación previa, corresponde a la subsanación de problemas locales y en corto plazo, asociados al crecimiento de las poblaciones, es decir al aumento de la demanda. De ahí que sea lógico esperar que las mismas carezcan de una clara estructura desde el punto de vista topológico y luego sean complicadas para ser comprendidas, controladas y gestionadas (Izquierdo et al. 2008).

En tal sentido, la sectorización de RDAP puede llegar a ser relativamente sencilla en redes de pequeña extensión; no obstante en redes de gran extensión, el problema es mucho más complejo debido que a que más allá de la necesidad de mantener la homogeneidad general de la red dentro de cada sector ( semejanza en la demanda y uniformidad de las presiones), se debe tener en cuenta criterios de optimización, es decir, generar sectores con el menor coste de inversión (instalación de válvulas seccionadoras) y que mantengan los parámetros hidráulicos dentro de un rango de aceptabilidad, teniendo en cuenta los efectos que esto pueda generar al resto de la red. Con respecto a esto, la sectorización reduce la respuesta de una red ante la falta de uno o varios de sus elementos, haciéndola más vulnerable (Saldarriaga et al. 2008; Todini 2000). De ahí la necesidad de buscar metodologías que permitan brindar soluciones a estos problemas de manera eficiente.



### 2.2.3.1. Factores a tener en cuenta en el diseño

De manera general, los factores que se deben tener en cuenta al momento de diseñar una sectorización son los siguientes (Morrison et al. 2007):

- El nivel económico de fugas requerido

Este aspecto se refiere al punto de equilibrio entre el coste económico que representan las pérdidas por fugas y el coste de inversión necesario para su reparación, partiendo del hecho que existe un umbral mínimo de fugas (UMF) que no puede ser evitado. Este concepto se puede observar claramente en la Figura 2.1. En donde, la curva color rojo representa el comportamiento del gasto en reparaciones y mantenimiento (CGRM), que es mayor conforme menor es el volumen de agua que se fuga, tal a como se puede intuir. La curva color azul representa el volumen de agua incontrolada (CVAi), cuyo crecimiento es directamente proporcional a su coste. La curva color negro es la suma de las dos curvas anteriores, representado una curva de coste total (CCT). El punto más bajo de ésta representa el nivel económico de fugas o el punto óptimo para la gestión del sistema. La línea punteada vertical representa el ya mencionado UMF.

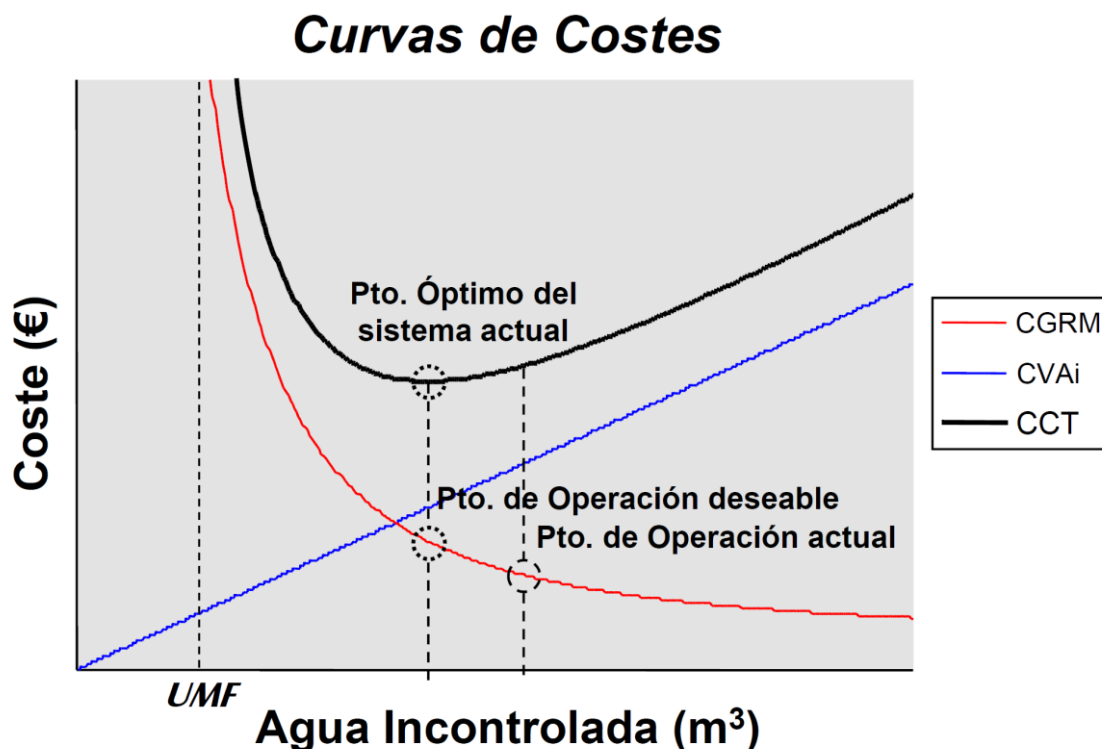


Figura 2.1. Punto óptimo de control de fugas (Farley et al. 2008; J Thornton et al. 2008)

Existen otros métodos para calcular el tiempo óptimo de inspección de fugas (FOI), tal como el que plantea la siguiente ecuación:

$$FOI = \sqrt{\frac{CI}{CMA * INAF * 0,5}}$$

En donde, CMA representa el coste medio del agua, el INAF el índice natural de aumento de fugas (la tasa de aumento de fugas de una RDAP cuando se sigue una

política pasiva para el control de fugas) y CI, el coste que representa cada una de las inspecciones.

Aplicando este criterio al momento de diseñar la sectorización, es evidente que al tener sectores de menor extensión el coste de inspección será menor y por lo tanto la FOI disminuye también.

- Tamaño

El tamaño de los DMAs se relaciona con el nivel de precisión con que se desean ejecutar las campañas de detección de fugas (GIZ et al. 2011; Morrison et al. 2007). Aunque también depende de las características urbanas de la red, cuando una red se encuentra naturalmente aislada, lo lógico es que sus subredes se configuren como sectores independientes.

- Tipo de consumidor

Es de vital importancia la caracterización de cada DMA, para de esta manera poder mantener la homogeneidad dentro de la misma. En tal sentido, se debe identificar a los consumos especiales o a los grandes consumidores; es decir cualquier edificación que requiera de un abastecimiento con una presión superior a la establecida por la norma vigente del área. (Morrison et al. 2007).

- Variación en el nivel del terreno

Conservando el criterio de homogeneidad, se deberá mantener la red dentro de un rango de elevación de terreno para de esta manera lograr que las presiones se mantengan dentro de un rango similar.

- Consideraciones de calidad de agua

Se debe evitar que la sectorización implique la aparición de zonas de estanqueidad de agua. En caso de ser necesario, se debe considerar la instalación de desagües.

- Requerimientos de presión

Se debe considerar la uniformidad de presiones en todo el sector, el valor de la presión de todo el sector no deberá salirse del rango de presiones establecido por las normativas locales. Si se tiene exceso de presión, se puede realizar una gestión de la presión dentro de cada sector implementando y siguiendo una curva de consigna. Además, puede ser necesario el aumento de diámetro de ciertas tuberías para reducir la pérdida de carga de entrada al sector.

- Número de válvulas a cerrar

En general, se debe minimizar el número de válvulas a cerrar; no obstante, se debe compatibilizar con el CAF de manera que la minimización tenga en cuenta también las implicaciones que tienen sectores más grandes sobre el costo del CAF.

- Capacidad del sistema contra incendios

Pese a que la sectorización conlleva una pérdida de capacidad, se debe tratar de mantener los rangos de presión necesarios para poder reaccionar ante una situación de emergencia.

- Número de caudalímetros

Este aspecto está directamente ligado al número de sectores. Se deberá tratar de que cada uno de los sectores cuente solamente con un caudalímetro, debido a los costes asociados al mantenimiento posterior y a la complejidad para hacer un balance de caudales del sector. Aunque dependiendo de las características de la red, pueden existir sectores en los que sea necesario instalar más de uno. Se deberá tener en cuenta también la instalación de caudalímetros especiales para los grandes consumidores, en donde el comportamiento y la magnitud del consumo no son comparables al consumo residencial.

### **2.2.3.2. Reglas para establecer sectores**

Previo a sectorizar una ciudad, es importante tener en cuenta factores como las condiciones de operación, diseños del sistema de distribución, factores ambientales, así como la economía de las empresas encargadas de la distribución del agua (Kleppen 2011).

Un primer paso indispensable para poder ejecutar la sectorización de una RDAP es contar con un buen conocimiento de la estructura y de la dinámica de funcionamiento de la misma. Este aspecto es fundamental para además de optimizar el diseño de los sectores, evitar que los mismos acarreen consecuencias negativas para la red, tales como problemas de desabastecimiento o de calidad de agua. El diseño de la sectorización se debe comenzar por la línea de alta y a partir de ahí, dirigirse a la red de distribución (Morrison et al. 2007). El objetivo de esto es separar lo máximo posible la red de alta de la de distribución de tal manera que siga siendo flexible, en caso de que en el futuro se desee realizar alguna modificación particular. En redes de abastecimiento con problemas de baja presión, es de vital importancia apoyar el proceso de toma de decisión con modelos matemáticos que permitan validar la idoneidad de cualquier decisión.

Se han establecido algunas reglas generales para el diseño de la sectorización de una RDAP, tales como (GIZ et al. 2011):

- El diseño de un sector no debe incluir bucles o tanques de almacenamiento. Si es inevitable se deben instalar caudalímetros que controlen el caudal de entrada y salida.
- Cada sector debe ser alimentado por un único punto, el cual debe contar con un caudalímetro. Dado que en algunos casos se hace necesario contabilizar caudales muy bajos, por lo general es necesario que el contador en la entrada tenga un diámetro menor que el de la tubería de alimentación en el cual está instalado.
- Los límites del sector deben ser definidos mediante válvulas cerradas. De ser posible estos límites deben ser naturales (ríos, carreteras, líneas de metro) para minimizar la utilización de válvulas.
- Se debe realizar una evaluación de los distintos tipos de consumidores y el suministro que se brinda a estos mismos.
- Se deben respetar las regulaciones locales.
- Los cierres de válvulas para aislar sectores pueden provocar la aparición de zonas muertas, por lo que el diseño deberá tener en cuenta los problemas relacionados con la estanqueidad del agua.

- Dado que la presión juega un rol muy importante en la gestión de las fugas, en la medida de lo posible, la gestión se debe incorporar en el proceso de reconfiguración del sistema.

### **2.2.3.3. Tamaño óptimo de los sectores**

El componente de optimización económica es de vital importancia al momento de establecer el tamaño de los sectores. El coste por sector de una RDAP es más alto en la medida en que su tamaño sea menor. Esto se debe a que, para su conformación, se deben instalar un mayor número de válvulas o se deben cortar un mayor número de líneas. Lo contrario pasa para sectores de mayor extensión; no obstante, los sectores de menor tamaño presentan varias ventajas, como: mayor agilidad para la detección temprana de fugas, mayor capacidad para distinguir entre pequeñas fugas, caudal mínimo nocturno y fugas de fondo, así como una localización más rápida de las mismas.

En este sentido, se han establecido tres aspectos clave que definen la cantidad de agua que se pierde por una fuga individual: tiempo de conocimiento, tiempo de detección y tiempo de reparación (Pilcher et al. 2007). En RDAP gestionadas con sectores, el tiempo de cada uno de estos factores se puede reducir de manera significativa y por lo tanto reducir el caudal de fugas.

De igual manera, cuanto menor es el tamaño del sector, más sencillo resulta priorizar zonas para ejecutar inspecciones. La IWA recomienda definir el tamaño de los sectores en función del número de acometidas dentro de ellos, estableciendo un rango entre 500 y 3000 acometidas como un rango aceptable (Morrison et al. 2007). Se ha establecido también como criterio que el rango aceptable para la longitud de tubería dentro del sector se encuentre entre 4 y 30 km (GIZ et al. 2011). Análisis económicos han demostrado que, en la mayoría de los casos, el tamaño de los sectores debe estar entre 3000 y 5000 conexiones (Julian. Thornton et al. 2008).

### **2.2.4. Casos de aplicación**

A continuación, se muestran de manera resumida algunos proyectos de sectorización realizados de manera satisfactoria en diferentes ciudades alrededor del mundo. Estos ejemplos muestran problemas y soluciones particulares que se han encontrado en países con diferentes tipos de infraestructura, requerimientos de la población y normativas de regulación (Morrison et al. 2007; Vegas 2012; PROMOSAS 2011).

#### **2.2.4.1. El Dorado, Estados Unidos**

El DMA fue creado en *El Dorado Irrigation District* (EID), California en los Estados Unidos como parte de un proyecto parcialmente financiado por la *American Water Works Association Research Foundation* (AwwaRF) con el objetivo de evaluar la transferibilidad de las tecnologías internacionales de gestión de fugas a América del Norte.

La topografía del área de suministro de EID no es homogénea, por lo que la red de distribución está subdividida en zonas de control de presión. Por lo tanto, se decidió convertir una zona de presión existente en una DMA permanente. El área seleccionada es "*North Shingle*", que se alimenta a través de un único punto de entrada. El DMA sirve a una población de aproximadamente 1200 personas con una presión promedio de 78 metros. Tomó aproximadamente tres meses desde el inicio del diseño del DMA hasta su funcionamiento.

#### **2.2.4.2. Lemosos, Chipre**

La ciudad de Lemosos está situada en la costa sur de la isla de Chipre, en el noreste del mar Mediterráneo, tiene una población actual de 150.000 y es la segunda ciudad más grande de la isla de Chipre. La Junta de Agua de Lemosos es una organización semi-gubernamental sin fines de lucro encargada de la responsabilidad de suministrar agua potable a la ciudad y alrededores de Lemosos.

En 1985, la Junta de Aguas se embarcó en un ambicioso programa de expansión que abarcaba una importante extensión del sistema de distribución, este programa incluía la división de la red de distribución en zonas de presión, cada una de ellas con la capacidad de almacenamiento adecuada. Se construyeron una serie de estaciones de bombeo para elevar el agua a zonas más altas y en 1988 se puso en marcha un sistema completo de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) con unidades terminales remotas instaladas en todas las fuentes de agua, reservorios y estaciones de bombeo con su sala de control central en las oficinas principales de la Junta de Aguas.

La ubicación topográfica de Lemosos es tal que la elevación del área de suministro varía desde cero en la costa hasta 315 metros sobre el nivel del mar en las estribaciones. Para garantizar un rango de presión aceptable para los consumidores, toda el área de suministro se dividió en siete zonas de presión, cada una con su propio depósito de almacenamiento dedicado. Cada zona de presión está dividida en DMA que son alimentadas por gravedad desde su respectivo reservorio a través de tuberías de hierro dúctil que varían en diámetro desde 800 mm hasta 300 mm. Hasta 2003, el número total de DMA era de 27 pero se consideró importante examinar cuidadosamente el tamaño de estas DMA, especialmente en las zonas de mayor presión, en un esfuerzo por reducir aún más las pérdidas reales del sistema y, al mismo tiempo, proporcionar mejores y más efectivo control de fuga activa. La reestructuración de los DMA comenzó en 2004 y se completó en 2007, dejando como resultado 52 DMA. Las presiones promedio en los DMA antes de la reestructuración variaban entre 4-6 bar. Luego de la reestructuración de los DMA las presiones varían entre 2-4 bar.

Hoy en día, la Junta de Aguas cubre un área de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> con aproximadamente 800 km de tuberías, y aproximadamente 70000 consumidores registrados, lo que implica una producción anual de agua de 13000000 m<sup>3</sup>.

#### **2.2.4.3. Bangor, Gales**

La ciudad de Bangor se encuentra en Gales, en el Reino Unido. Es una pequeña ciudad universitaria que comprende principalmente edificios residenciales, oficinas, edificios universitarios, tiendas e industria ligera dentro de polígonos industriales. Los edificios residenciales son una mezcla de casas adosadas y separadas típicas del Reino Unido.

El suministro a la ciudad proviene de dos plantas de tratamiento de agua instaladas a las afueras y de depósitos de almacenamiento que suministran directamente a red de distribución. No se practicaba un control eficaz de fugas activas.

El control activo de fugas es necesario, ya que en la demanda máxima se quedaban sin agua. Para contrarrestar esto, se decidió sectorizar la ciudad en DMA basándose en las predicciones de reducción de fugas del *Report 26 Leakage Control Policy and Practice* (Technical Working Group on Waste Water 1980) y por la necesidad de

implementar un método de control activo de fugas donde se pudieran contabilizar los niveles de fugas reales.

La duración total del proyecto hasta la finalización de la implementación de los DMA y la instalación de las válvulas reguladoras de presión fue de muchos años, ya que la fase inicial fue mejorar el mapeo seguido de una sectorización inicial, implementación de los DMA, diseño e implementación de válvulas reguladoras de presión, seguido del revestimiento de tuberías de hierro fundido existentes y finalmente de una puesta a punto de la gestión de las válvulas.

#### **2.2.4.4. Johore, Malasia**

El proyecto se encuentra situado en Johore, el estado más al sur de Malasia peninsular. La ciudad cuenta con alrededor de 800,000 consumidores medidos con una cobertura del 100% de la población en el estado. Las presiones de suministro típicas están entre 1 bar y 7 bar.

El objetivo de la empresa Ranhill Water Services fue emprender un enfoque holístico para reducir el nivel actual de Agua No Registrada (ANR) de 36.6% a 20.0%. Actualmente hay 650 DMA que deben ser monitoreadas y se expandirán a 800 dentro de los próximos dos años para cubrir el 100% de los clientes en el estado de Johore.

El ANR es un indicador del rendimiento operacional, que se calcula tomando el volumen total de producción menos el volumen total facturado.

Para implementar el CAF con un área de control manejable, las áreas de suministro de agua se dividieron en sub-áreas como DMA. Los DMA se alimentan a través de una única fuente y las áreas adyacentes fueron separadas mediante válvulas de corte que permanecen cerradas en todo momento. Esto es, para asegurar que el caudal de entrada siempre pueda ser registrado y medido.

Durante las etapas iniciales del proyecto se tenía que las pérdidas reales se encontraban entre 5 l/s y 50 l/s. Implementando una política de CAF se logró reducir las pérdidas a 2.5 l/s en promedio.

#### **2.2.4.5. Halifax, Canadá**

La Comisión Regional del Agua de Halifax (HRWC) se encuentra en Halifax, Nueva Escocia, Canadá y actualmente sirve a una población de 320,000 habitantes con una presión de suministro promedio de 50 metros. Halifax es abastecida por dos grandes plantas de tratamiento de aguas superficiales, una planta de 180 MLD que sirve a la Región Oeste y una planta de 90 MLD que sirve a la Región Este.

Halifax tiene una alta tasa de rupturas de tuberías principales de manera natural y con la construcción de una nueva planta de tratamiento para servir a la región este y el correspondiente aumento en el costo marginal del agua, se convirtió en una prioridad corporativa el reducir las pérdidas reales.

Las elevaciones en Halifax van desde los 170 m de altura hasta el nivel del mar, lo que requiere muchas zonas de presión discreta y estaciones de bombeo. Estas zonas de presión y estaciones de bombeo formaron las DMA más tempranas simplemente instalando medidores de caudal en las instalaciones de control. En 1999, sabiendo que las DMA proporcionan una indicación temprana de fugas, el HRWC implementó un programa para crear DMA debido a su gran utilidad.

Las pérdidas reales antes de la implementación de los DMA se encontraban cerca de los 18000000 m<sup>3</sup>, mientras que ahora las pérdidas se encuentran alrededor de 8000000 m<sup>3</sup>. El Índice de Fugas Estructural (IFE) al inicio fue calculado en 6.4 mientras que luego de la implementación de los DMA es de 3.8 con miras a reducirlo hasta un 3.4.

#### **2.2.4.6. Managua, Nicaragua**

La ciudad de Managua es la capital de Nicaragua. En esta ciudad se realizó un proyecto de optimización en una parte de la RDAP, el área de actuación cubrió 1340 km de extensión y entre sus fuentes de abastecimiento de agua potable cuenta con un lago y con 138 pozos distribuidos por todo el territorio. Una parte de la red fue subdivida en 65 DMA, todos alimentados desde la red de alta de la ciudad.

El proceso de sectorización se realizó mediante un proceso empírico, teniendo en cuenta un modelo matemático de la red de alta de la RDAP y un modelo matemático conjunto de la red de alta y la red secundaria, así como de las características topológicas de la red y otros aspectos de carácter urbanístico. Dentro del diseño de los mismos se contempló que cada uno de ellos contara con una sola entrada, eliminando otras posibles entradas, ya sea mediante el cierre de válvulas o mediante el corte de tuberías. Al final, los 65 sectores fueron conformados con un tamaño aproximado de 20 km de longitud de tubería. En cada una de las entradas se colocó una unidad operativa de control (UOC) con un macro-medidor y una toma de presión. En 64 de los 65 sectores se comprobó el aislamiento de los mismos evaluando las caídas de presión al cierre de la línea de alimentación. En uno de ellos no se logró hacer dicha comprobación dado que la antigüedad de la red y las carencias catastrales impidieron detectar todos los puntos de inyección de agua al mismo.

#### **2.2.4.7. Lima y Huacho, Perú**

En estas ciudades se realizó una sectorización estableciendo como criterio el área de los sectores. En Lima en el sector del Callo se estableció que los DMA no deben ser superiores a 300 Ha, con lo que se esperaba tener sectores donde se alimentara a entre 400 y 4000 habitantes. En la ciudad de Huacho se establecieron sectores con áreas en torno a los 3 km<sup>2</sup>, los cuales debían tener un único punto de entrada (Vegas 2012).

#### **2.2.4.8. Tegucigalpa, Honduras**

La ciudad de Tegucigalpa es la capital de Honduras. Su RDAP cuenta con 1800 km de tubería, 50 tanques de distribución y dos plantas potabilizadoras, más un campo de pozos. Esta ciudad destaca por una topografía bastante irregular, de manera que, en general, el sistema se abastece mediante tanques ubicados en las partes altas que son alimentados a través de bombeos desde las plantas potabilizadoras.

La empresa estatal Sistema Nacional Autónomo de Acueductos y Alcantarillado (SANAA) llevó a cabo un proyecto de optimización de la red de agua potable. El proyecto, además de incluir el levantamiento catastral de una parte de la RDAP, también incluyó una campaña de detección de fugas y la ejecución de la sectorización. El diseño de la sectorización se apoyó en un modelo matemático de la red de alta, cuya calibración no se pudo llevar a cabo debido a la intermitencia característica del servicio (las distintas zonas residenciales en general son abastecidas aproximadamente 10 horas por semana). Cada tanque tiene varias salidas (en algunos casos hasta seis) independientes para diferentes zonas, de tal manera que la red ya se encontraba algo sectorizada, por lo que, a la hora de plantear el esquema de sectorización, se trató de

mantener el esquema de sectorización ya existente, haciendo divisiones en las zonas en que la presión pudiese superar el límite máximo de presión establecido por la autoridad local. Estas divisiones se hicieron mediante cortes de tuberías, instalación de válvulas nuevas o cierre de válvulas existentes, aunque la autoridad local manifestó preferencia por los cortes de tuberías. Al final la red quedó subdividida en 75 sectores, alimentados bien por líneas salientes de tanques, o mediante inyecciones directas de la red de alta (PROMOSAS 2011).

### 2.2.5. Criterios de evaluación de la sectorización

La manera de evaluar la configuración de la sectorización será a través del análisis de la semejanza de la demanda y de la uniformidad de las presiones entre los DMAs resultantes. La semejanza de la demanda busca que cada uno de los DMA abarque un número similar de usuarios para poder garantizar de esta manera la uniformidad de las presiones en toda la ciudad.

#### 2.2.5.1. Semejanza de la demanda

La semejanza de la demanda será evaluada siguiendo el siguiente índice:

$$DS = \sqrt{\frac{1}{\#DMAs} \sum_{i=1}^{\#DMAs} (V_{in,i} - V_{out,i} - V_{av})^2}$$

en donde  $DS$  es el índice de semejanza de la demanda,  $\#DMAs$  es el número de sectores propuestos para la solución,  $V_{in,i}$  es el volumen de entrada al DMA y es calculado de la siguiente manera:

$$V_{in,i} = \sum_{j=1}^M (Q_{D,j} * \Delta t)$$

en donde  $Q_{D,j}$  es la demanda durante el periodo de tiempo  $j$ ,  $j$  es índice de tiempo que va desde uno hasta  $M$  y  $\Delta t$  es el periodo de modelación hidráulica (1 hora).  $V_{out,i}$  es el volumen de salida del DMA hacia otro DMA (en caso de que algún DMA alimente otro DMA que se encuentre aguas abajo):

$$V_{out,i} = \sum_{j=1}^M (Q_{D,j} * \Delta t)$$

en donde  $Q_{D,j}$  es la demanda durante el periodo de tiempo  $j$ ,  $j$  es el índice de tiempo que va desde uno hasta  $M$  y  $\Delta t$  es el periodo de modelación hidráulica (1 hora). Adicionalmente,  $V_{av}$  es volumen promedio por DMAs, que se define como:

$$V_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{\#DMAs} (V_{in,i} - V_{out,i})}{\#DMAs}$$

#### 2.2.5.2. Uniformidad de las presiones

Para poder garantizar que la energía es utilizada correctamente en el sistema, se busca que cumplir con la uniformidad de las presiones a lo largo de la red. Esta uniformidad se analiza desde dos perspectivas: i) todos los nudos de consumo deben suministrar agua a una presión mínima de 15 mca; y ii) los nudos de cada DMA deben tener una presión similar entre sí, que deberá ser en la manera de lo posible lo más



cercana a la mínima. La uniformidad de la presión de la red se define en la siguiente ecuación (Alhimiary & Alsuhaily 2007):

$$PU_{net} = \sum_{j=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i,j} - P_{min}}{P_{min}} \right) + \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,j} - P_{av,j})^2}{N}}}{P_{av,j}} \right]$$

En donde  $PU_{net}$  es el índice de uniformidad de presión de la red,  $P_{i,j}$  es la presión en el nudo  $i$  en el tiempo  $j$  (en mca),  $P_{min}$  es la presión mínima requerida (15 mca),  $i$  es el índice de nudo definido desde uno hasta  $N$ ,  $j$  es el índice de tiempo definido desde uno hasta  $M$ ,  $t_j$  es el tiempo de simulación  $t_j = j \Delta t$  es el paso de tiempo equivalente a una hora y  $P_{av}$  es la presión promedio de la red en el tiempo  $j$ , la cual se define como:

$$P_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{i,j}}{N}$$

## 2.3. El algoritmo METIS

### 2.3.1. Introducción

METIS es un paquete de algoritmos en serie para particionar grafos, división de mallas de elementos finitos y para rellenar/reducir matrices dispersas por métodos informáticos. METIS ha sido desarrollado por el Departamento de Ciencias de la Computación e Ingeniería de la Universidad de Minnesota y es de libre distribución. Su código fuente puede descargarse directamente de <http://www.cs.umn.edu/~metis>.

Los algoritmos implementados en METIS se basan en el paradigma de partición de grafos multinivel (Karypis & Kumar 1998c; Karypis & Kumar 1998a) (Karypis & Kumar 1998c), que se ha demostrado que producen rápidamente particiones y reducciones/rellenos de gran calidad. El paradigma multinivel (Figura 2.2) consta de tres fases: reducción del grafo, partición inicial y proyección. En la fase de reducción del grafo, una serie de grafos sucesivamente más pequeños se derivan del grafo anterior mediante la combinación de pares adyacentes de vértices. Este proceso continúa hasta que el tamaño del gráfico se haya reducido a solo unos pocos vértices. En la fase de partición inicial, el grafo derivado del original y, por lo tanto, más pequeño es particionado utilizando enfoques relativamente simples como el algoritmo desarrollado por Kernighan-Lin (Kernighan & Lin 1970). Finalmente, en la fase de proyección, la partición del grafo más pequeño se proyecta a los grafos sucesivamente más grandes asignando los pares de vértices que se combinaron a la misma partición que la de su correspondiente vértice combinado. Luego de cada proyección, la partición se refina mediante diversos métodos heurísticos para mover iterativamente vértices entre las particiones, siempre que dichos movimientos mejoren la calidad de la solución de particionamiento. La fase de proyección finaliza cuando la solución particionada se ha proyectado hasta el gráfico original.

METIS utiliza enfoques novedosos para reducir de forma sucesiva el tamaño del gráfico, así como para refinar la partición durante la fase de proyección. Durante reducción, METIS emplea algoritmos que hacen que sea más fácil encontrar una partición de alta calidad en el gráfico más complejo. Durante el refinamiento, METIS se centra principalmente en la parte del gráfico que está cerca del límite de la partición. Estos algoritmos altamente sintonizados permiten a METIS producir rápidamente

particiones de alta calidad para una amplia variedad de gráficos irregulares, mallas no estructuradas y matrices dispersas.

### 2.3.2. Particionado de un grafo con METIS

METIS puede dividir un gráfico no estructurado en un número  $k$  de partes especificado por el usuario usando un esquema de bisección recursiva multinivel (Karypis & Kumar 1998c; Karypis & Kumar 1998a) o los paradigmas de partición  $k$ -partes multinivel (Kernighan & Lin 1970). Ambos métodos pueden producir particiones de alta calidad. Sin embargo, el algoritmo de partición  $k$ -partes multinivel de METIS proporciona capacidades adicionales, por ejemplo, minimiza el gráfico de conectividad resultante, impone particiones contiguas, minimiza objetivos alternativos, etc. y como tal puede ser preferible a la bisección recursiva multinivel.

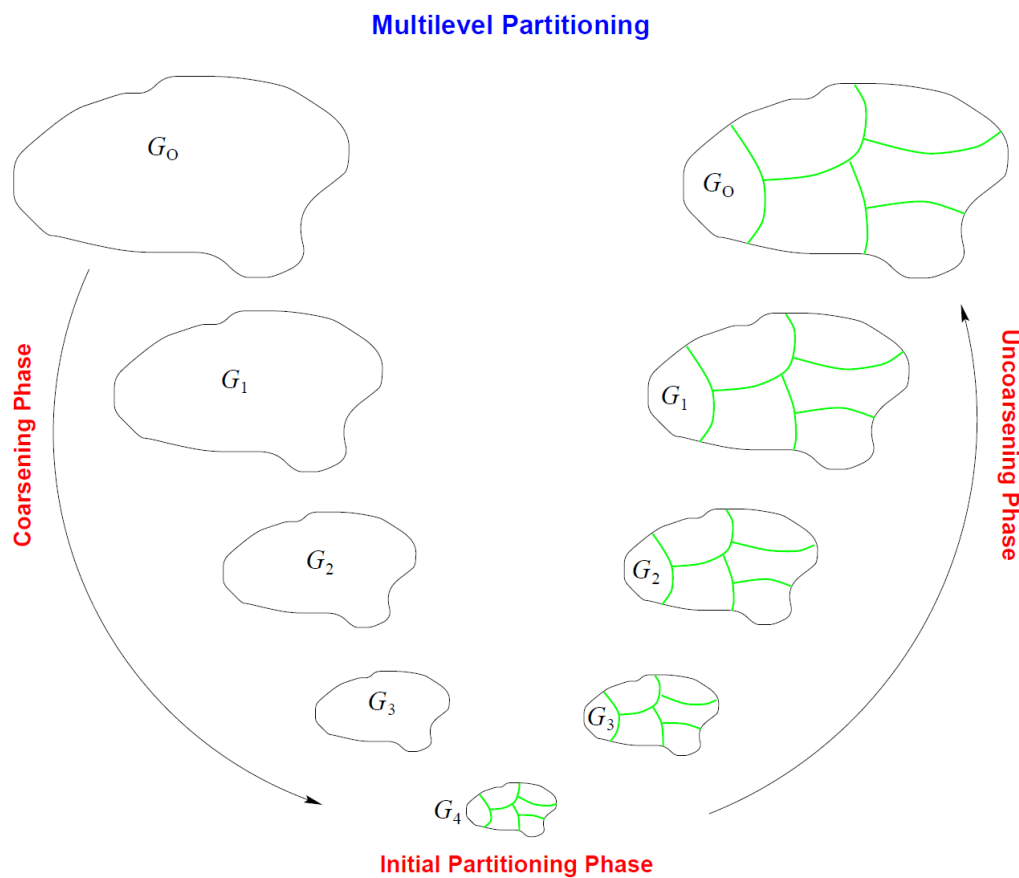


Figura 2.2. Fases de una partición multinivel de un grafo.

#### 2.3.2.1. Archivos de entrada

El archivo de entrada principal para el particionamiento de grafos en METIS es el gráfico no dirigido que debe ser particionado. Este gráfico se almacena en un archivo al cual se le asignan diversos parámetros para representar los nudos y los bordes.

Un gráfico  $G = (V;E)$  con  $n$  vértices y  $m$  bordes se almacena en un archivo de texto sin formato que contiene  $n + 1$  líneas. La primera línea, llamada línea de encabezado contiene información sobre el tamaño y el tipo de gráfico, mientras que las  $n$  líneas restantes contienen información para cada vértice de  $G$ .

La línea de encabezado puede contener dos parámetros  $(n, m)$ , tres  $(n, m, fmt)$  o cuatro  $(n, m, fmt, ncon)$ . Los primeros dos parámetros  $(n, m)$  son el número de vértices y el número de bordes, respectivamente. Se debe tener en cuenta que al determinar el número de bordes  $m$ , un borde entre cualquier par de vértices se cuenta solo una vez y no dos. El parámetro  $fmt$  se usa para especificar si el archivo de gráfico contiene información sobre los tamaños de vértice, los pesos de los vértices y los pesos de los bordes. El parámetro  $ncon$  especifica el número de pesos de los vértices asociados con cada vértice del gráfico. El valor de este parámetro determina si METIS utilizará o no los algoritmos de particionamiento de restricción múltiple.

Las  $n$  líneas restantes almacenan información sobre la estructura real del gráfico. En particular, la línea  $i$ -ésima contiene información que es relevante para el  $i$ -ésimo vértice. Dependiendo del valor de los parámetros  $fmt$  y  $ncon$ , la información almacenada en cada línea es algo diferente, pero sigue una estructura similar a:

$$s w_1 w_2 \dots w_{ncon} v_1 e_1 v_2 e_2 \dots v_k e_k$$

donde  $s$  es el tamaño del vértice,  $w_1, w_2, \dots, w_{ncon}$  son los pesos de vértice  $ncon$  asociados con este vértice,  $v_1, \dots, v_k$  son los vértices adyacentes a este vértice, y  $e_1, \dots, e_k$  son los pesos de estos bordes. Los vértices están numerados a partir de 1. Además, los pesos y tamaños de los vértices deben ser enteros mayores o iguales a 0, mientras que los pesos de los bordes deben ser estrictamente mayores que 0.

La Figura 2.3 muestra el formato para los diferentes casos de partición de METIS, el formato más simple para el gráfico  $G$  es cuando el tamaño y peso de todos los vértices y el peso de los bordes es el mismo (Figura 2.3a). En el caso de que los bordes de  $G$  tengan diferentes pesos se agregará el parámetro  $fmt$  (Figura 2.3b). Si se tiene pesos tanto en los bordes como en los vértices (Figura 2.3c) el valor  $s$  de cada línea será el peso del propio vértice. Finalmente se puede admitir también que un vértice tenga múltiples pesos (Figura 2.3d), en este caso cada línea almacena estos pesos seguidos de la lista de conexiones.

### 2.3.2.2. Archivos de salida

La salida de METIS es un archivo con la partición o la ordenación solicitada, dependiendo de si METIS se usa para particionamiento de un gráfico/malla o para ordenar/rellenar una matriz dispersa.

El archivo de partición de un gráfico con  $n$  vértices consta de  $n$  líneas con un solo número por línea. La quinta línea del archivo contiene el número de partición al que pertenece el primer vértice. Los números de partición comienzan desde 0 hasta la cantidad de particiones menos una.

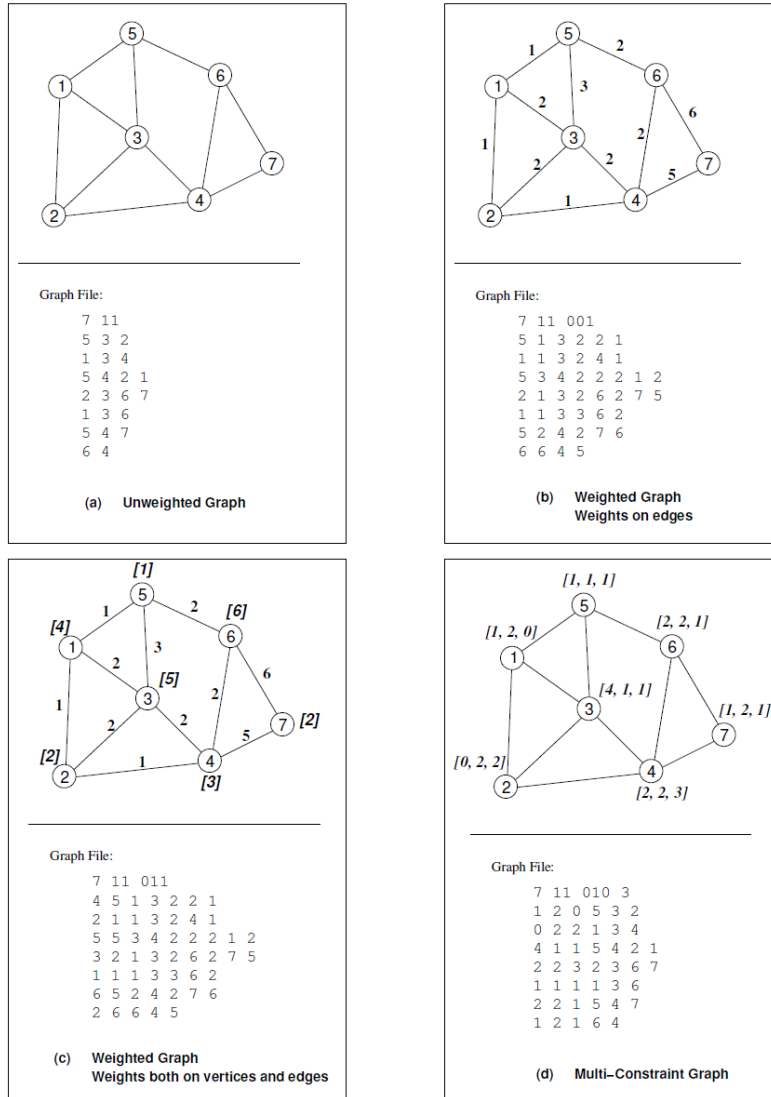


Figura 2.3. Formato de entrada de METIS para varios tipos de gráficos. (Karypis & Kumar 1998b)

## Capítulo 3:

# DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

---

### 3.1. La ciudad de Santa Marta

La crisis hídrica que sufre la región de Magdalena, Colombia constituye una realidad y es que desde hace décadas los habitantes de Santa Marta han soportado un desabastecimiento cercano al 60% (Saldarriaga 2015), causado por una confluencia de factores como la fuerte sequía que ha golpeado a la región en los últimos años, la carencia de una adecuada planeación, una infraestructura obsoleta y el deterioro de las cuencas hidrográficas, así como el crecimiento poblacional ocasionado por el alto número de desplazados que recibe la capital de Magdalena; la situación es insostenible y no puede prolongarse durante mucho más tiempo.

Santa Marta es la capital del departamento de Magdalena en Colombia y constituye la ciudad más antigua en el país. Se encuentra situada en la región noroccidental de Sudamérica y al noreste de Colombia en la región Caribe (Figura 3.1). Se encuentra atravesada por los ríos Manzanares y Gaira, y en cercanía con Piedras, Toribio y Córdova. Además, poseen una reserva de agua subterránea (acuífero de Santa Marta) alimentado principalmente por el agua lluvia y por los ríos Manzanares y Gaira (Figura 3.2).

La ciudad es considerada uno de los principales destinos turísticos del Caribe gracias al atractivo que aporta su ubicación en el mar Caribe, el océano Atlántico y la sierra nevada de Santa Marta. Su clima es tropical seco, con una temperatura anual promedio de 27°C y temperaturas máximas que pueden llegar a sobrepasar los 39°C. En toda la región, la temperatura media no varía demasiado y únicamente existen dos estaciones: una seca y otra húmeda, las cuales van alternadas y bien diferenciadas (Córdova et al. 2016).

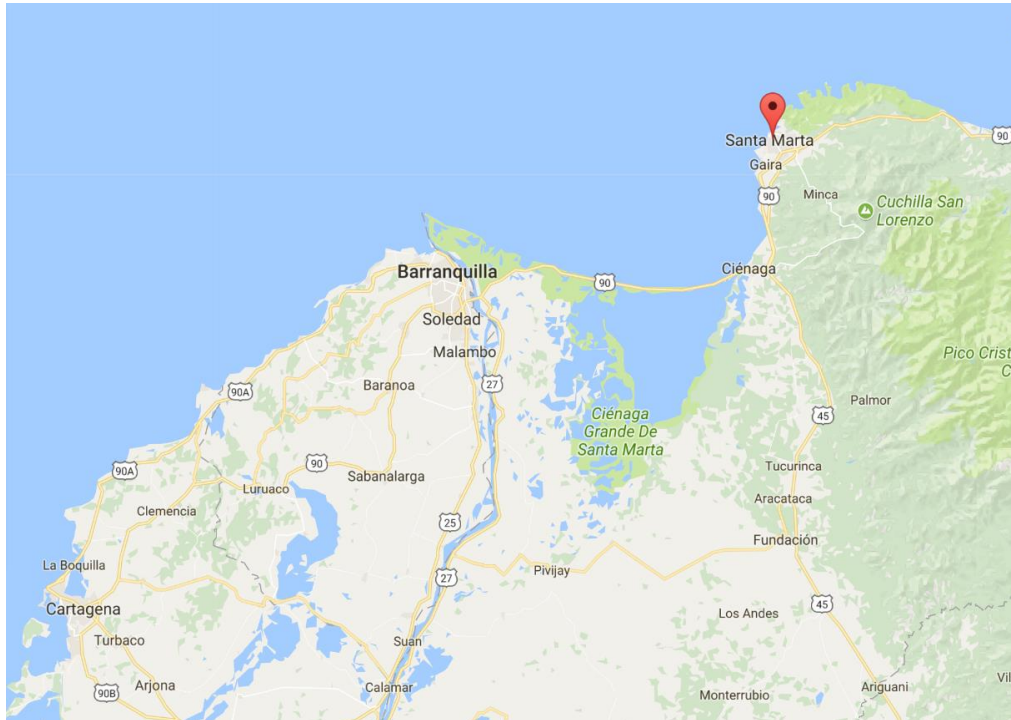


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Santa Marta. (Fuente Google Maps)

En Santa Marta viven cerca de 500 000 habitantes (DANE 2017); la población flotante está entre 50 y 20 mil personas en temporada alta y baja, respectivamente, la demanda media de agua asciende aproximadamente a los 2000 litros por segundo (l/s). Sin embargo, a día de hoy Santa Marta sólo recibe de sus fuentes aproximadamente 800 l/s, lo que representa un importante déficit de 1200 l/s. A esta problemática hay que añadirle las dificultades técnicas de la red que implican pérdidas en la aducción y en la conducción del 20%, cuando lo admitido internacionalmente se encuentra en el 5%.

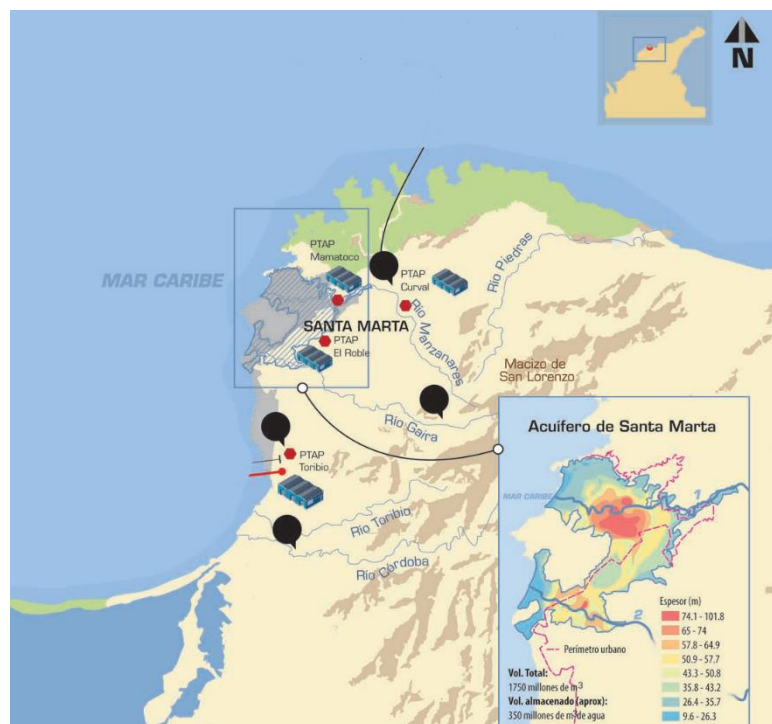


Figura 3.2. Fuentes de agua de la ciudad de Santa Marta. (Basado en Saldarriaga 2015)

De acuerdo a proyecciones demográficas (Saldarriaga 2015) para el año 2065 se estima que Santa Marta tendría cerca de 2.300.000 habitantes (DANE 2017) en temporada alta, es decir, la capital de Magdalena necesitará alrededor de 6100 l/s para abastecer a todos sus habitantes.

### 3.2. La red de distribución de Santa Marta

Para el presente estudio se cuenta con un modelo matemático en EPANET de la red de distribución de agua potable de Santa Marta, en la Figura 3.3 se puede observar que existe una diferencia de cotas importante entre los distintos nudos de consumo de la red como consecuencia de que la ciudad se encuentra entre la Sierra Nevada de Santa Marta y el mar Caribe.

Concretamente, la red de abastecimiento está compuesta por 13861 tuberías de diferentes longitudes, diámetros y rugosidades que en total suman 875 km de longitud y conecta 11042 nudos de consumo.

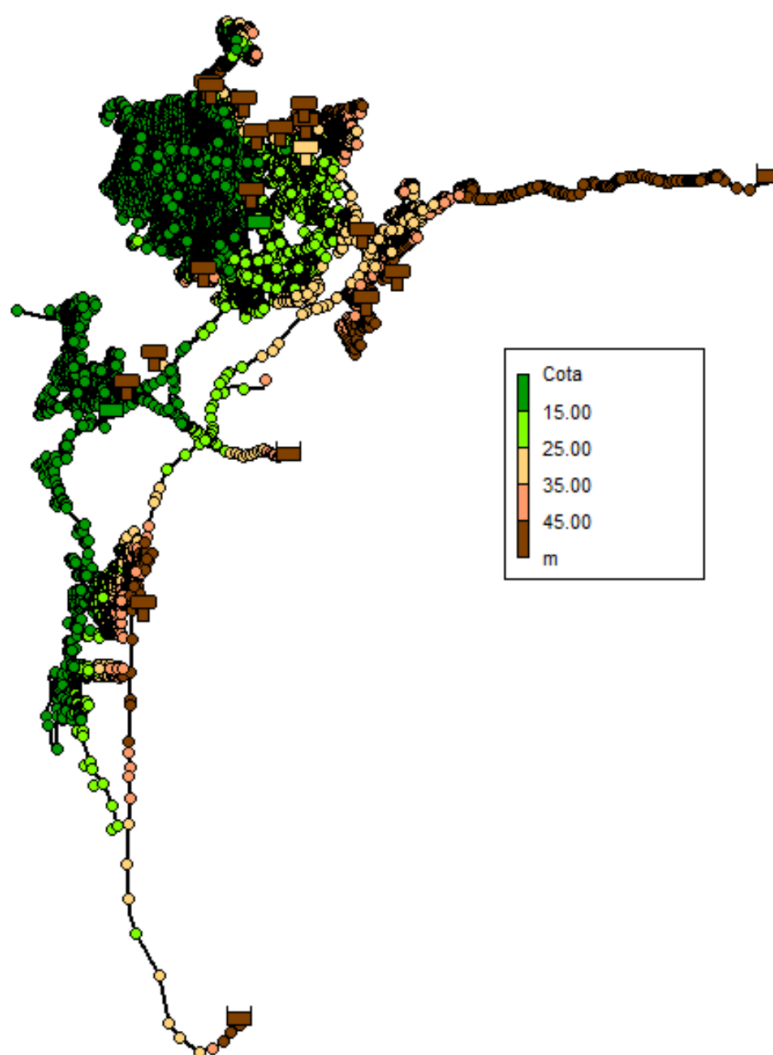


Figura 3.3. Red hidráulica de Santa Marta.

Además, la red cuenta con 17 depósitos de regulación localizados para abastecer determinadas áreas de la ciudad, así como dos estaciones de bombeo: Gaira y Universidad, y cinco embalses que suministran el agua: el Curval, Universidad, el Roble, Gaira y Toribio.

El embalse el Curval se encuentra al noreste de Santa Marta a una cota de 200 metros sobre el nivel del mar; el embalse de Universidad, se encuentra al norte de la ciudad a nivel del mar, ambos embalses se abastecen del río Manzanares. El embalse Gaira está situado en la zona central y a nivel del mar, el Roble se encuentra a una cota de 60 msnm en el este de la ciudad y junto a Gaira se alimentan del río del mismo nombre.

En el sector sur de Santa Marta se encuentra el embalse de Toribio, el cual es la principal fuente de alimentación de agua de la ciudad, se encuentra a 125 msnm y se abastece desde el río Toribio. La Figura 3.4 muestra la distribución de los embalses y de los depósitos a lo largo de la red de distribución.

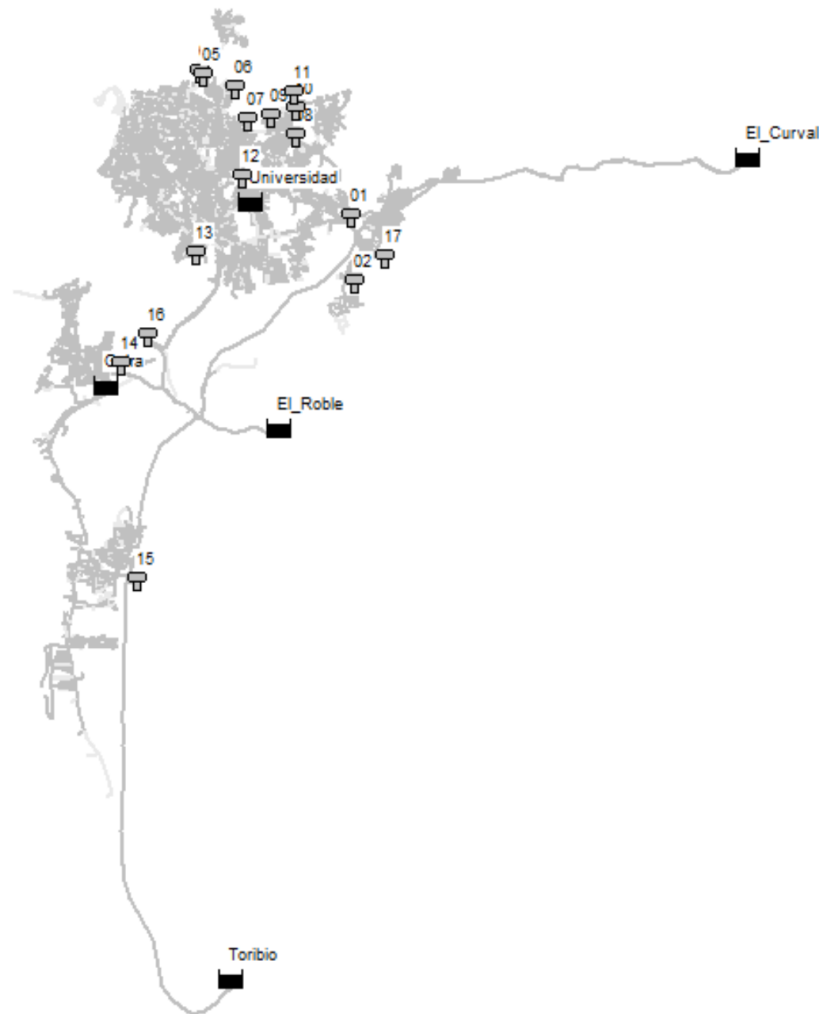


Figura 3.4. Embalses y depósitos de la red de distribución de Santa Marta.

La Tabla 3.1 muestra los límites de extracción para cada uno de los embalses y estaciones de bombeo que alimentan a la red, en donde se puede observar que el caudal máximo que pueden aportar viene bien diferenciado dependiendo de la época correspondiente a la estación seca o a la húmeda.

La producción para la estación húmeda puede alcanzar los 2850 l/s, mientras que para la estación seca tan sólo alcanza los 2080 l/s. Es por ello, que la temporada seca será la más crítica en cuanto a suministro de agua, por lo cual el presente estudio se



centrará en adoptar las restricciones correspondientes al escenario más crítico, la estación seca.

Tabla 3.1. Límites de extracción de embalses y pozos de la ciudad de Santa Marta.

Embalse	Caudal medio (l/s)	
	Estación húmeda	Estación seca
El Roble	450	240
El Curval	800	420
Toribio	1600	900
Gaira	-	206
Universidad	-	314
<b>Total</b>	<b>2850</b>	<b>2080</b>

En cuanto a los requerimientos de la red, la demanda media total de la red es de 1946,58 l/s, pero se debe considerar los valores pico de las horas de mayor consumo las cuales vienen dadas por el patrón de demanda que se muestra en la Figura 3.5 en donde se puede observar que el intervalo de mayor demanda se encuentra entre las 07:00 y 08:00 horas con un valor del 154%, lo cual incrementa la demanda hasta los 2997,73 l/s. Mientras el intervalo con la demanda más baja se encuentra entre las 01:00 y las 02:00 con un valor del 53%. Puesto que los límites de extracción son menores al de la demanda en hora pico, la red necesariamente deberá funcionar utilizando depósitos de regulación.

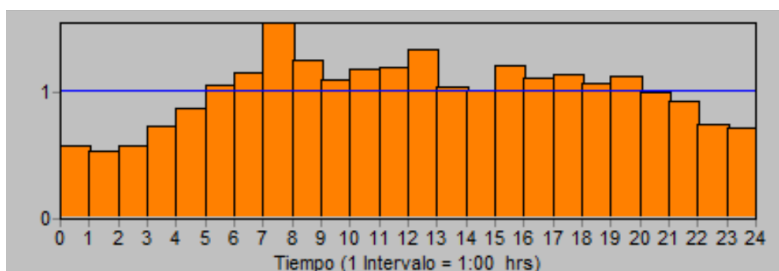


Figura 3.5. Patrón de consumo de la red de Santa Marta.

### 3.3. El sector sur de Santa Marta

La red de Santa Marta se encuentra dividida en tres zonas: norte, centro y sur como se puede observar en la Figura 3.6. Para el caso del presente estudio se trabajará con el sector sur de la red.

La zona sur de la red de abastecimiento está compuesta por 2300 tuberías de diferentes longitudes, diámetros y rugosidades que en total suman 188 km de longitud y conectan 1926 nudos de consumo.

La zona sur (Figura 3.7) se encuentra abastecida principalmente por el embalse de el Roble con el tanque 14 y por el tanque 15 que se suministra de agua a través de la tubería principal que proviene de Toribio y a su vez abastece el centro y norte de la red.

Además, puesto que durante la estación seca la producción de agua resulta insuficiente para satisfacer la demanda, la estación de bombeo de Gaira ayuda con el abastecimiento de la zona sur.

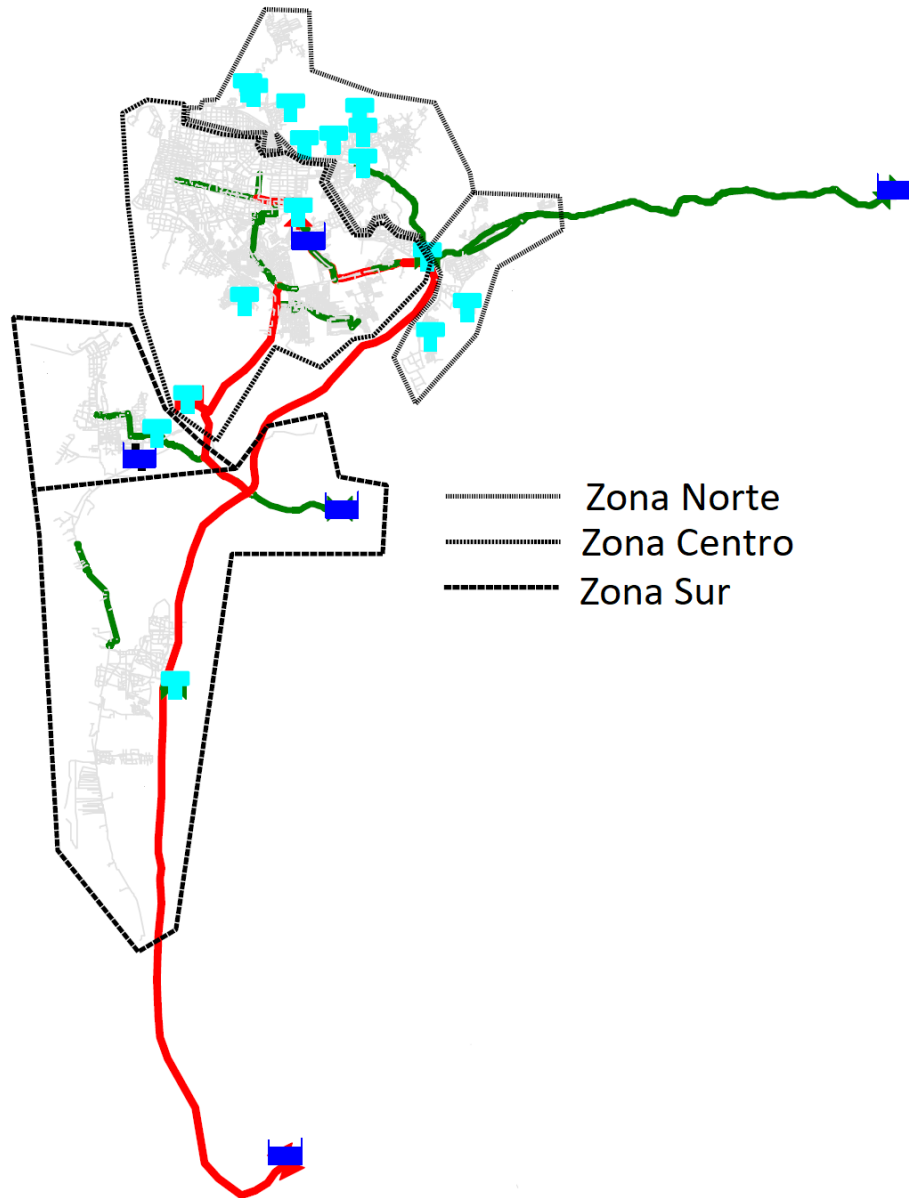


Figura 3.6. Áreas principales de la red.

En Santa Marta viven cerca de 500 000 habitantes (DANE 2017); la población flotante está entre 50 y 20 mil personas en temporada alta y baja, respectivamente, la demanda media de agua asciende aproximadamente a los 2000 litros por segundo (l/s). Sin embargo, a día de hoy Santa Marta sólo recibe de sus fuentes aproximadamente 800 l/s, lo que representa un importante déficit de 1200 l/s. A esta problemática hay que añadirle las dificultades técnicas de la red que implican pérdidas en la aducción y en la conducción del 20%, cuando lo admitido internacionalmente se encuentra en el 5%.

La estación de bombeo de Gaira se encuentra constituida por dos bombas idénticas (Figura 3.8), cada una de las cuales se encuentran definidas por la siguiente curva característica:

$$H = 61,19 - 0,002253 \cdot Q^2$$

Sectorización Óptima de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de Santa Marta, Colombia Utilizando los Algoritmos METIS

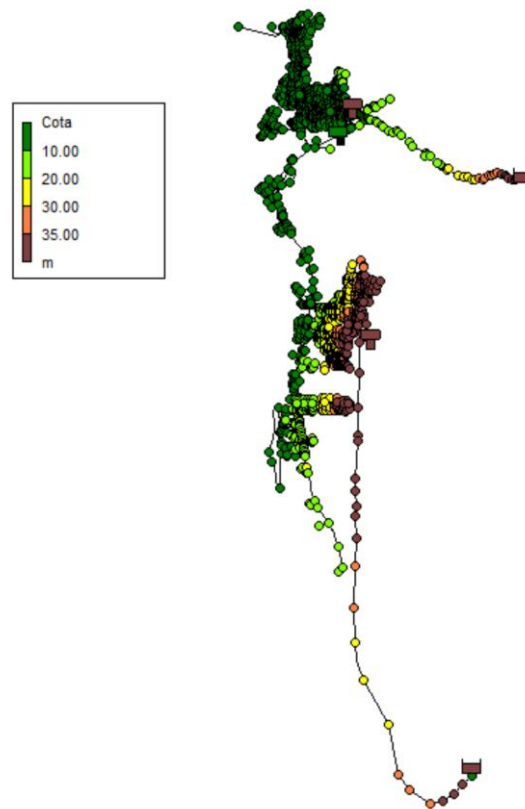


Figura 3.7. Sector Sur de la red.

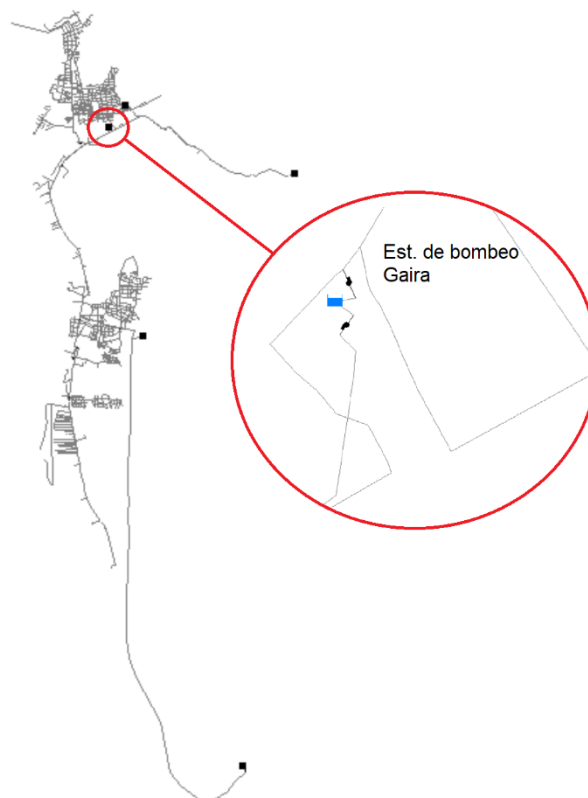


Figura 3.8. Estación de bombeo Gaira.



## Capítulo 4:

# METODOLOGÍA

---

### 4.1. Descripción general

El principal objetivo del presente estudio es el de determinar el número y la configuración óptimos de DMAs para la RDAP de la zona sur de la ciudad de Santa Marta, para realizar la sectorización de la red se definió un trabajo combinado entre criterio ingenieril y el uso de los algoritmos METIS para generar particiones. Para ello fue necesaria la definición de áreas principales en donde cada área será sectorizada utilizando uno de los dos métodos de sectorización; en este caso, la red de la zona sur de la ciudad de Santa Marta se dividió en dos sub-zonas: Sur I y Sur II.

La principal dificultad a la hora de definir los diferentes sectores residía en la restricción de presión mínima y máxima con la que el agua ha de llegar a los diferentes nudos de consumo. La presión de servicio en cada uno de los nudos de la red ha de ser superior a los 15 mca e inferior a 60 mca. Además, puesto que el objetivo del estudio es minimizar las variaciones de presión en cada sector, aquellos nudos que presentan grandes diferencias de cota se excluyen de formar parte del mismo sector. Esto, unido a la complejidad de la red en términos de caudal máximo aportado durante la estación seca, reduce considerablemente el número de soluciones posibles.

En la zona Sur I, existe una gran variación topográfica con nudos que se encuentran a nivel del mar y otros con elevaciones superiores a los 80 msnm. Lo cual llevó a que la sectorización fuese llevada a cabo mediante criterio ingenieril, comprobando las restricciones impuestas por la estación seca, así como las restricciones de presión. El sector Sur II presenta en cambio una mayor uniformidad topográfica, lo cual permitió que la sectorización sea realizada mediante la utilización de los algoritmos METIS y de un posterior ajuste manual para cumplir con los

criterios hidráulicos de la red. Para ello fue necesario definir las tuberías principales de la red, separar la red de transporte y la red de distribución, definir la ponderación para las tuberías, y el número de sectores en los que se particionará la red.

Una vez definidas las distintas configuraciones de cada una de las sectorizaciones, se estudiará cuál de ellas es la óptima utilizando los criterios de semejanza de la demanda y de uniformidad de las presiones. Esquemáticamente, el proceso llevado a cabo para este estudio se puede observar en la Figura 4.1.

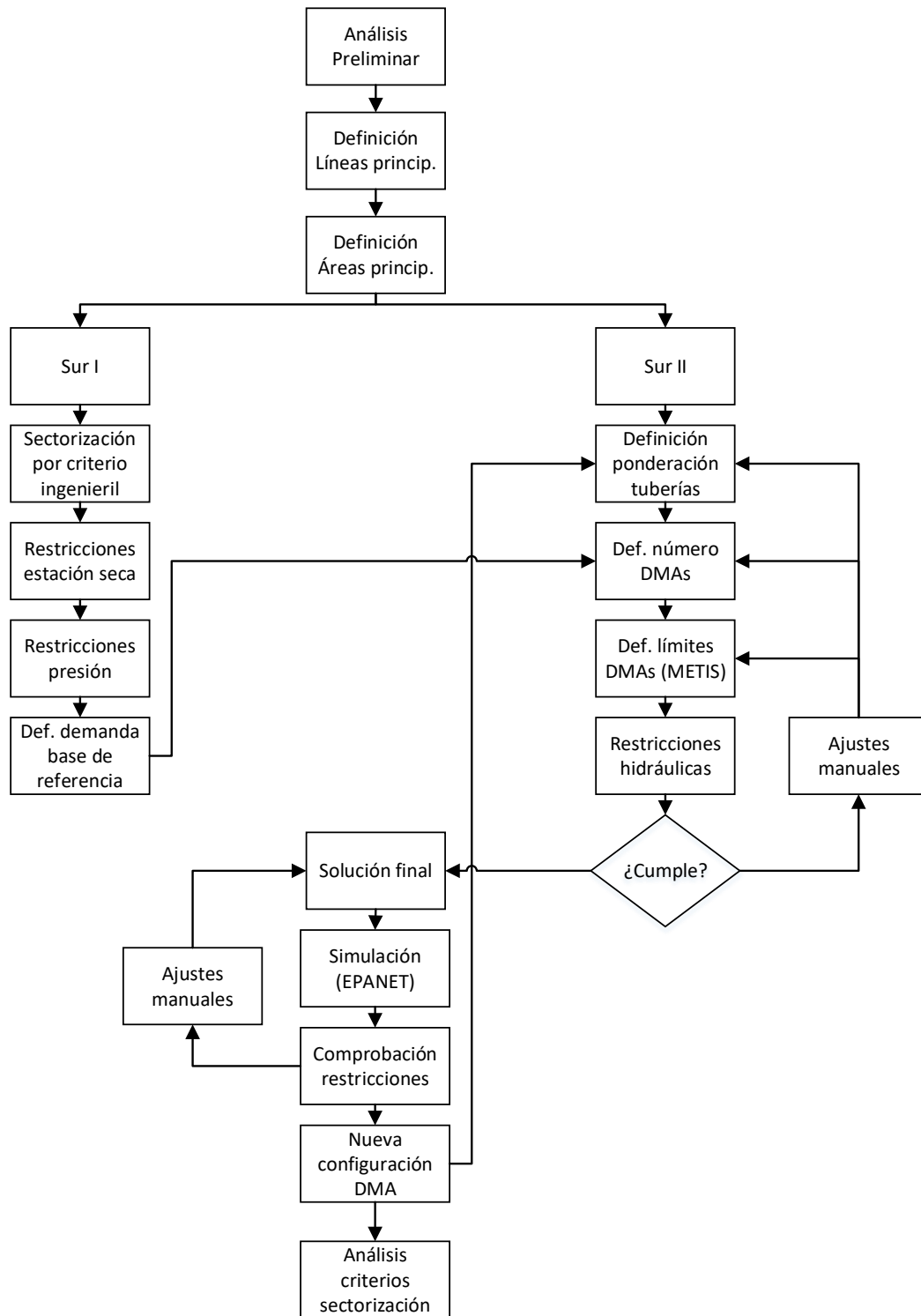


Figura 4.1. Esquema de la metodología de trabajo.

#### 4.2. Análisis previo

El primer paso antes de llevar a cabo la sectorización fue definir las zonas principales de la red de Santa Marta: Sur I y Sur II; éstas fueron seleccionadas en función de su fuente de alimentación en donde los nudos que se abastecen principalmente de la estación de bombeo Gaira y del embalse El Roble pertenecen a Sur I y aquellos alimentados a través de la misma estación Gaira y el embalse de Toribio pertenecen a Sur II como se muestra en el esquema de la Figura 4.2. La Tabla 4.1 muestra los valores de las demandas de estas dos zonas, así como de la zona central de la red. La Figura 4.3 muestra la red dividida en las zonas Sur I y II.

Tabla 4.1. Demandas de la zona sur y centro de la red de Santa Marta.

	Demanda [l/s]
Sur I	125.65
Sur II	276.22
Total Sur	401.86
Centro	866.73

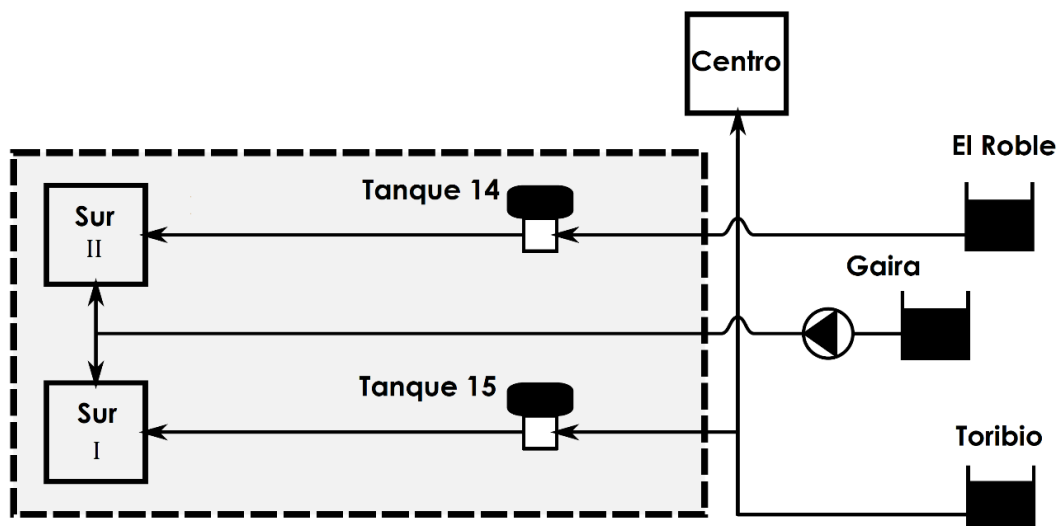


Figura 4.2. Configuración de la zona Sur de la red de Santa Marta.

Idealmente, de los 300 l/s que demanda Sur II, El Roble puede cubrir 260 l/s, mientras que la diferencia sería aportada por Gaira que puede abastecer hasta 206 l/s cuando todas sus bombas se encuentran en funcionamiento. Para aprovechar esta diferencia, una parte de las demandas de Sur I, aquellas con una cota inferior a los 45 msnm son abastecidas gracias a la estación de bombeo de Gaira. Esta restricción de altura se explica puesto que las bombas de la estación de Gaira pueden aportar cada una, una altura máxima de aproximadamente 60 metros de altura y la presión mínima de servicio requerida por los nudos de consumo es de 15 mca, por lo que aplicando la ecuación de Bernoulli y despreciando el término cinético, tenemos:

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}$$

$$60 = 15 + z$$

$$z = 45 \text{ mca}$$

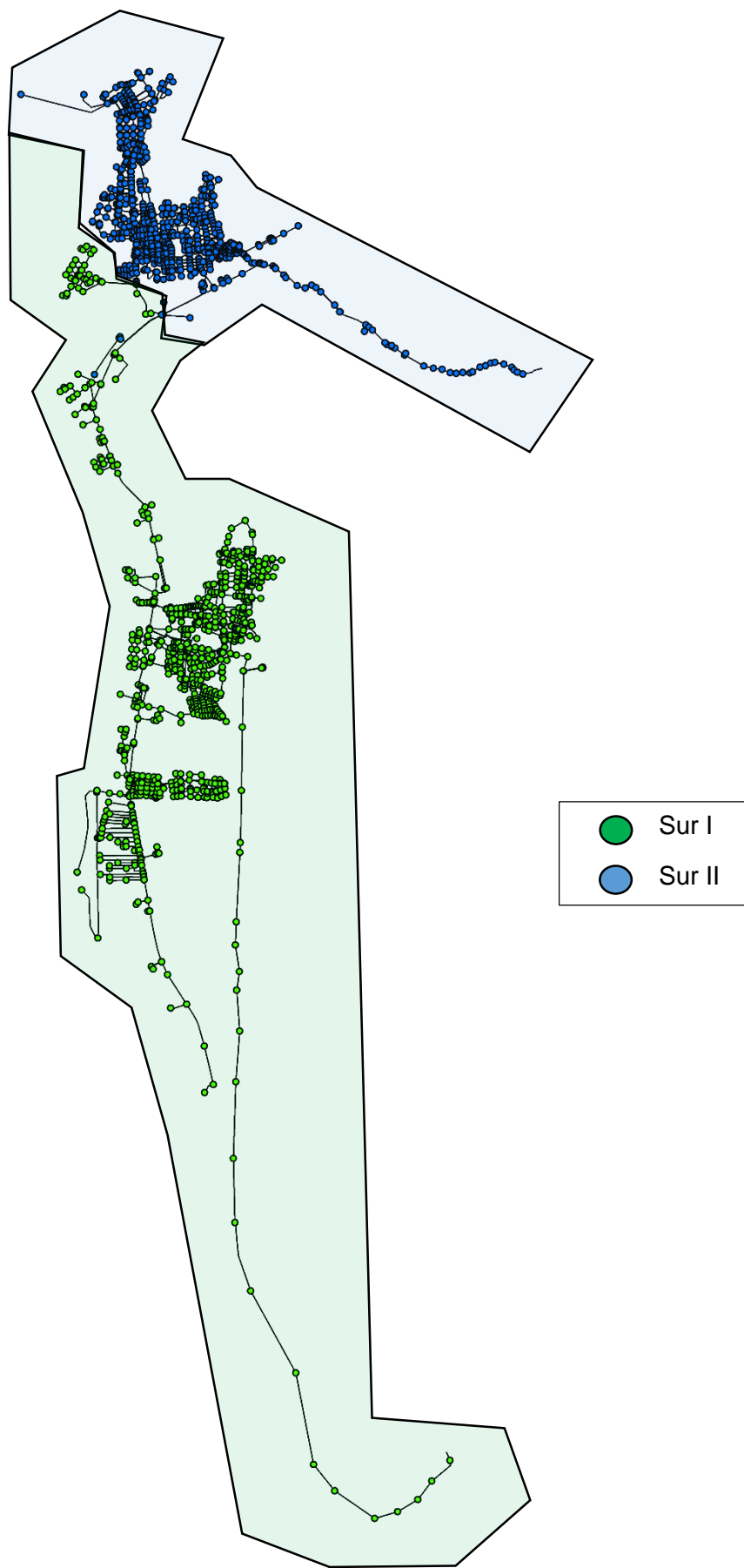


Figura 4.3. Zonas Sur I y II de la red de Santa Marta.



Las demandas situadas a una cota superior a los 45 msnm de la zona Sur I que no pueden ser alimentadas mediante la estación de Gaira serán abastecidas gracias al embalse de Toribio a través del tanque 15, el cual se encuentra situado a una altura de 90 msnm y puede producir hasta 900 l/s.

La razón de este planteamiento inicial se debe a que uno de los objetivos del presente estudio es la de minimizar el agua extraída desde el embalse de Toribio ya que su afluente actualmente se encuentra sobreexplotado debido a la elevada demanda del sector central de la red y por lo tanto se buscan medidas alternativas para el abastecimiento de la ciudad de Santa Marta, siendo la optimización en el abastecimiento desde El Roble y Gaira una de ellas y la razón del presente estudio.

### 4.3. Análisis de los depósitos de regulación

Puesto que los límites de extracción son menores al de la demanda en hora pico, la red necesariamente deberá funcionar utilizando depósitos de regulación. Los cuales deberán aportar tanto caudal como les sea posible y correcto funcionamiento se ha de conseguir verificando la recursividad de los mismos, es decir, que a lo largo del día el caudal de entrada, sea igual que el caudal de salida; asegurándose así que no se sobrepase su capacidad máxima hasta desbordarse ni que se vaciará por completo en ningún momento del día.

Primeramente, se realizó un análisis para determinar la capacidad de los depósitos de regulación de la red, los cuales están configurados como se muestra en la Figura 4.4 y consiste en una entrada controlada por una válvula reguladora de caudal que permite una entrada constante de caudal,  $Q_{in}$  seguida de una válvula de retención o anti-retorno que cierra por completo el paso de agua en sentido contrario, y una salida de caudal variable,  $Q_{out}$  definida por el patrón de consumo,  $C_m(t)$ , definido en la Figura 3.5.

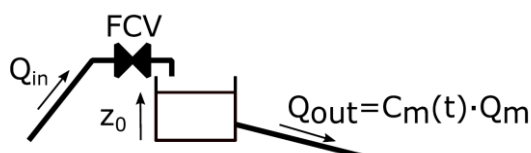


Figura 4.4. Diagrama de configuración de los depósitos de regulación.

Este patrón de consumo es aplicado a la demanda base acumulada de todos los nudos alimentados por el depósito,  $Q_m$  y puesto que su valor medio es de  $\lambda=1,00375$ , y el caudal total de entrada debe ser igual al valor total de salida, la relación entre  $Q_{in}$  y  $Q_m$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_{in} = \lambda \cdot Q_m$$

Se llevó a cabo un análisis paramétrico del comportamiento de los depósitos. Este análisis se basó en el balance de caudal del depósito en donde el caudal de entrada será el mismo que el caudal de salida. Si se asume un caudal de entrada constante y el caudal de salida está definido por el patrón de consumo, el momento en el que el depósito está cerca de exceder su nivel máximo permitido (90% de la capacidad total) ocurre 4 horas luego de que la simulación haya iniciado (Figura 4.5). Por otro lado, el nivel mínimo alcanzado es del 46% de la capacidad total (Figura 4.5) y puesto que el límite permisible es del 10% de la capacidad total, la situación correspondiente al nivel máximo permitido fue considerada como la crítica.

En ese momento, el volumen del tanque puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$V(4) = V(0) + \left( 5\lambda - \sum_{i=0}^4 Cm_i \right) \cdot 3,6 \cdot Q_m$$

Admitiendo que el máximo volumen en ese instante es del 90% de la capacidad del tanque y que el volumen inicial del mismo es del 60% de la capacidad del depósito, la máxima demanda  $Q_m$  que puede ser extraída del depósito puede ser obtenido. Este valor máximo de demanda  $Q_{m,max}$  se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$Q_{s,max} = \frac{V_D}{12 \cdot (5\lambda - \sum_{i=0}^4 Cm_i)}$$

El valor del patrón de demanda es:

$$\sum_{i=0}^4 Cm_i = 3,28$$

Por lo tanto el valor de  $Q_{m,max}$  es:

$$Q_{m,max} = \frac{V_D}{60 \cdot (\lambda - 0,656)}$$

Tras el análisis se determinaron las capacidades de cada tanque y se determinó cuál fue el máximo caudal medio que se podía aportar basado en la posible ampliación de capacidad que se pudiera llevar a cabo. Teniendo en cuenta la demanda que cada uno tenía que cubrir, si el caudal máximo que podían aportar sin necesidad de ninguna expansión era inferior a dicha demanda se requería de la ampliación del depósito. La Tabla 4.2 muestra las capacidades de cada tanque, la demanda que debe cumplir y el caudal que pueden aportar según la ampliación de capacidad a realizar.

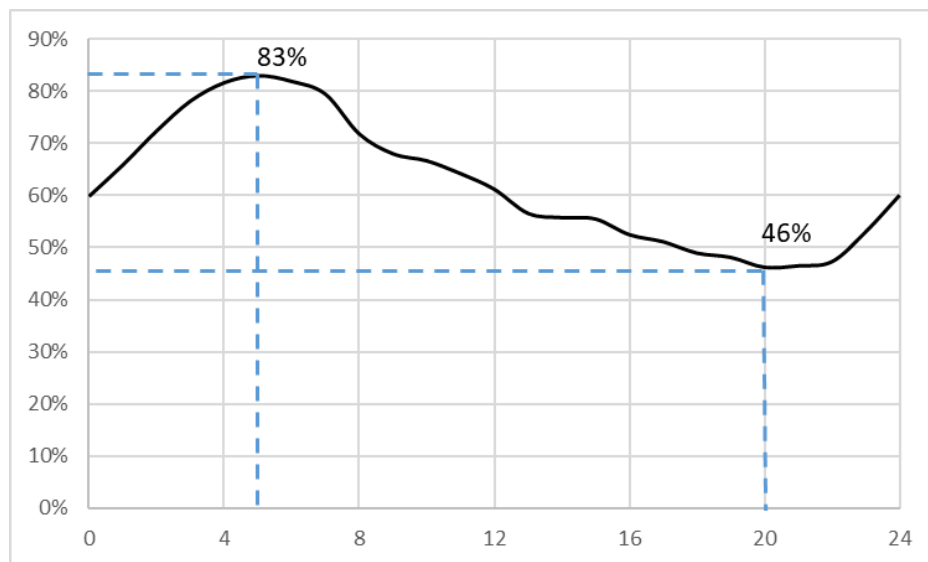


Figura 4.5. Evolución temporal de un depósito cuando sus entradas y salidas están balanceadas.

Tabla 4.2. Caudal máximo de cada depósito.

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal por volumen del depósito (m <sup>3</sup> )				
		0	500	1000	2000	5000
Tank_14	3445.4	165.1	189.1	213.1	261	404.8
Tank_15	3628.2	173.9	197.9	221.8	269.7	413.5

#### 4.4. Análisis de las tuberías principales

Para realizar la sectorización se consideraron dos categorías dentro de la red de tuberías: aquellas de un diámetro superior a los 160 milímetros, las cuales constituyen a las tuberías para el transporte de agua desde los embalses y depósitos a lo largo de la red y las destinadas a la distribución de la misma a todos los nudos de consumo serían las de diámetros inferiores a los 152 milímetros. Con el fin de mantener el funcionamiento habitual de la red, solo fue posible la apertura o cierre de las tuberías de la red de distribución. La Figura 4.6 muestra las redes de transporte y distribución de la red de estudio.

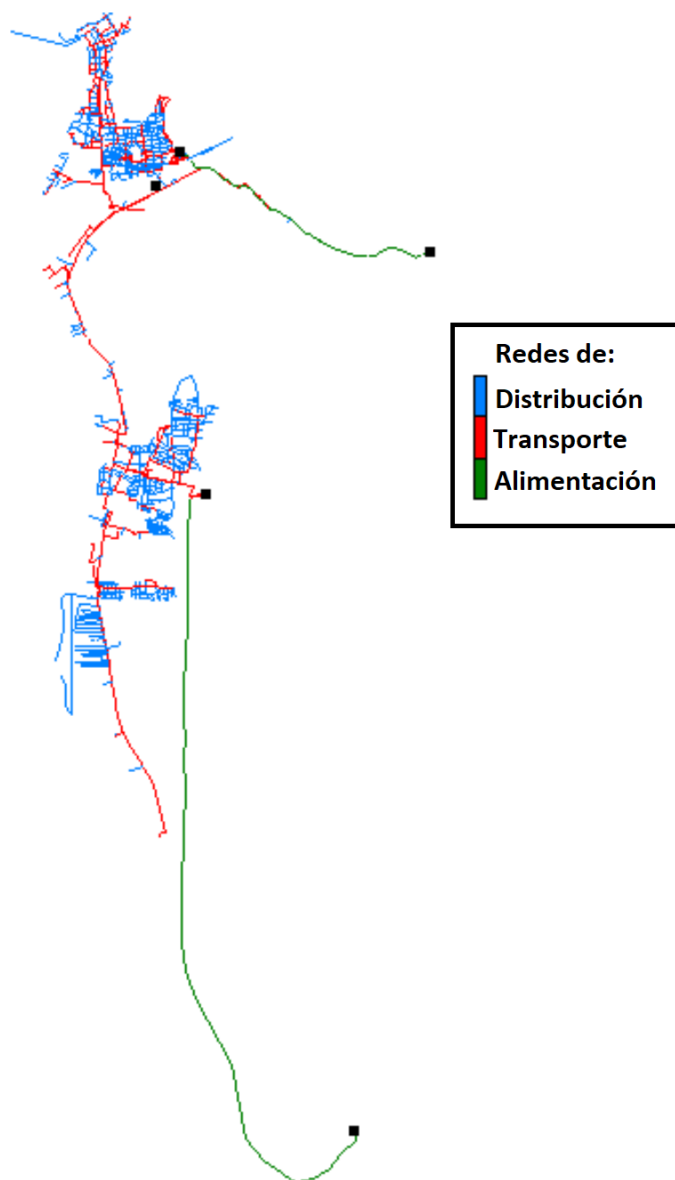


Figura 4.6. Redes de alimentación, transporte y distribución del sector sur de la red.

#### 4.5. Análisis de las bombas

La estación de bombeo de Gaira se encuentra constituida por dos bombas idénticas, cada una de las cuales se encuentran definidas por la siguiente curva característica:

$$H = 61,19 - 0,002253 \cdot Q^2$$

En la Figura 4.7 se puede observar que si queremos que la bomba nos produzca una altura suficiente para alcanzar los 45 + 15 (presión mínima) mca el caudal que puede producir es muy pequeño, pero si buscamos cubrir un mayor número de nudos con la bomba la altura a la que llegará disminuirá, pero aumentará el caudal suministrado; para una altura de 30 + 15 mca el caudal que puede suministrar la bomba aumenta notablemente. Por lo tanto, este análisis fue necesario para poder plantear que nudos de Sur I son factibles de alimentar mediante la estación de bombeo.

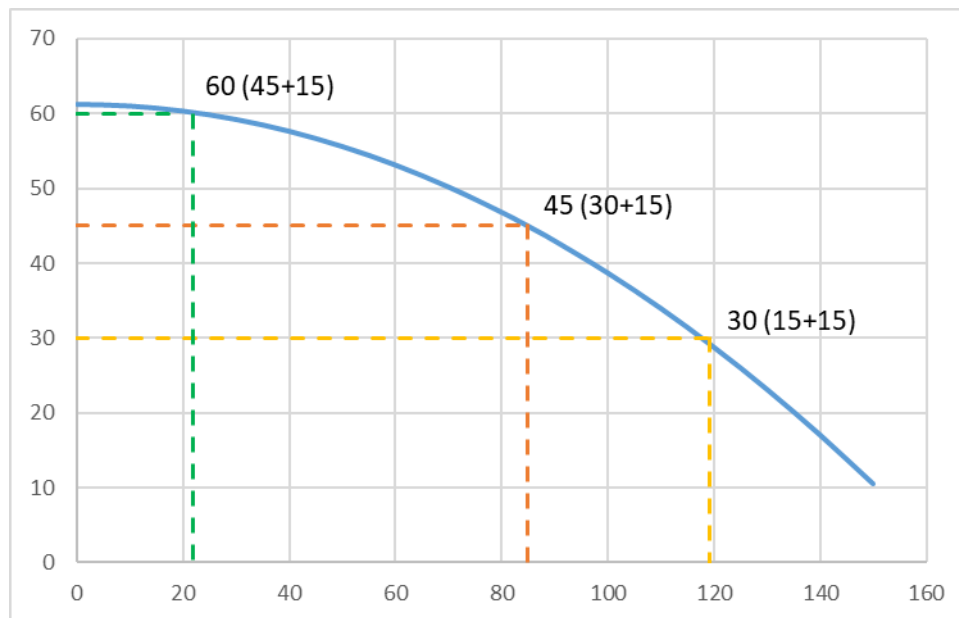


Figura 4.7. Análisis de las bombas.

De este análisis se concluye que cada una de las bombas de Gaira no podrán suministrar más allá de 120 l/s. Si las demandas de Sur I y II son de 101,22 y 301,64 l/s respectivamente, la diferencia entre la demanda de cada zona y lo que puede aportar la estación de bombeo deberá ser cubierta por los depósitos de regulación. Por lo tanto, se buscó aportar la mayor cantidad de caudal y altura al mismo tiempo. Como se observa en la Tabla 4.2 el caudal que puede producir el tanque 14 sin ninguna expansión es de 165.2 l/s, que sumado a lo que puede aportar Gaira deja un déficit imposible de cubrir, por lo que será necesaria su expansión.

#### 4.6. Sectorización con criterio ingenieril

Del análisis previo se concluye que la zona Sur I será abastecida mediante el embalse de Toribio a través del tanque 15 y mediante la estación de bombeo de Gaira para aquellos nudos de servicio cuya cota sea inferior a los 45 msnm. Asimismo, la zona Sur II será abastecida por el embalse de El Roble mediante el tanque 14 así como por la estación de bombeo de Gaira.

Para realizar esto se deberá desconectar las líneas que llevan agua desde el tanque 15 hasta la zona Sur II (Figura 4.8). Es necesario también dirigir toda el agua del embalse de El Roble hasta el tanque 14, para ellos es necesario cerrar la tubería que se indica en la Figura 4.8.

Fue necesario también cerrar la tubería de la Figura 4.9 para evitar que el agua proveniente de la estación de bombeo de Gaira se dirija a los nudos de mayor cota, los cuales serán abastecidos por el tanque 15. Aprovechando de manera más eficiente el agua proveniente de Gaira para abastecer los puntos bajos de esta zona.

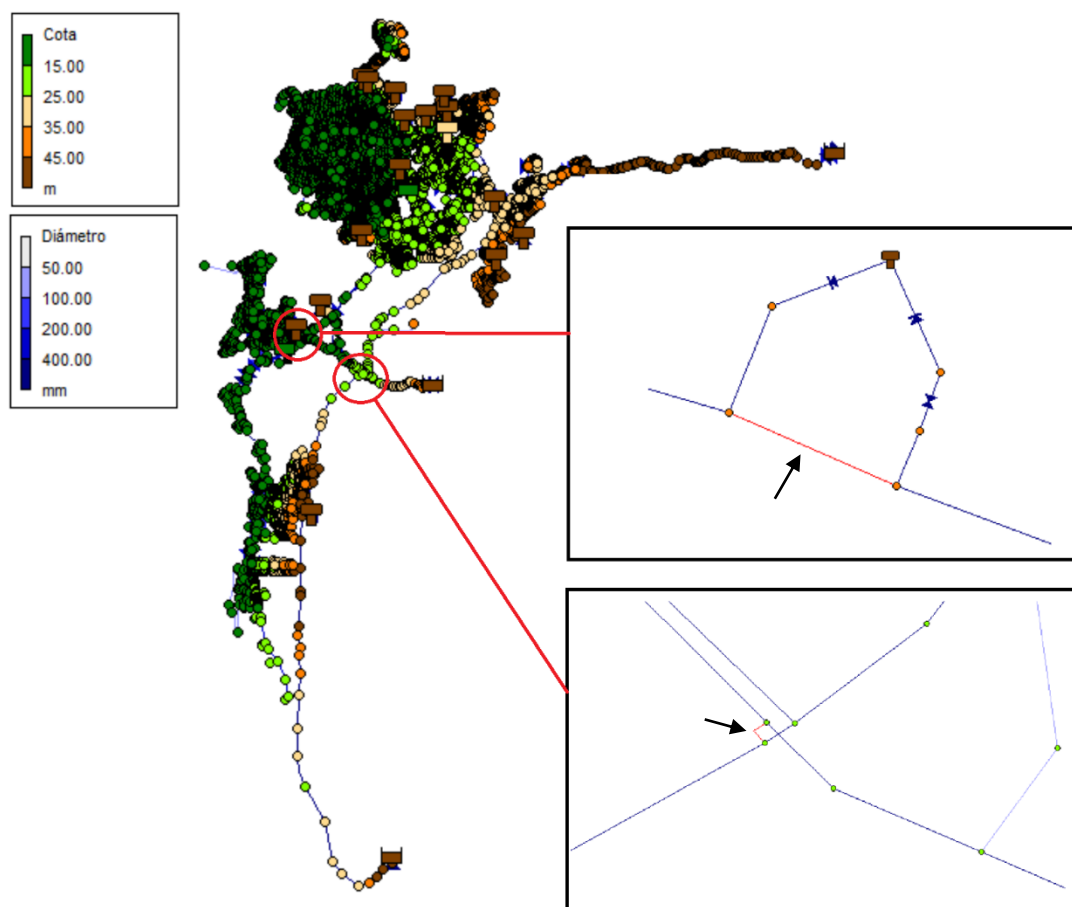


Figura 4.8. Tuberías cerradas para dividir la red en las zonas Sur I y II.

Una vez definidos los abastecimientos de cada zona, la mayor dificultad para definir los DMAs se encuentra en las limitaciones de mínimos y máximos de presión de la red. Adicionalmente, nudos con una gran diferencia de cota no pueden pertenecer a un mismo DMA (LauCELLI et al. 2016). Por lo tanto, la sectorización se procedió basada en el criterio de uniformidad de la demanda, tratando siempre de maximizar el caudal de entrada de cada DMA. Este proceso de sectorización fue realizado utilizando criterio ingenieril, el mismo que se explicará a detalle a continuación.

Debido a la semejanza entre las demandas de la red y los caudales máximos permitidos durante la estación seca, lo aconsejable es utilizar tanta capacidad de los depósitos como sea posible. En otras palabras, los tanques deberán suministrar tanta agua como puedan, de esta manera definiendo el tamaño de cada DMA. Entonces, se realizó un análisis de la capacidad de los depósitos de regulación. Las consideraciones de ampliación de los tanques se basaron en el caudal máximo que éstos puedan almacenar, por lo tanto, este análisis se puede realizar una vez que la sectorización se encuentra definida. Además, este análisis fue llevado a cabo por cada configuración de sectorización encontrada.

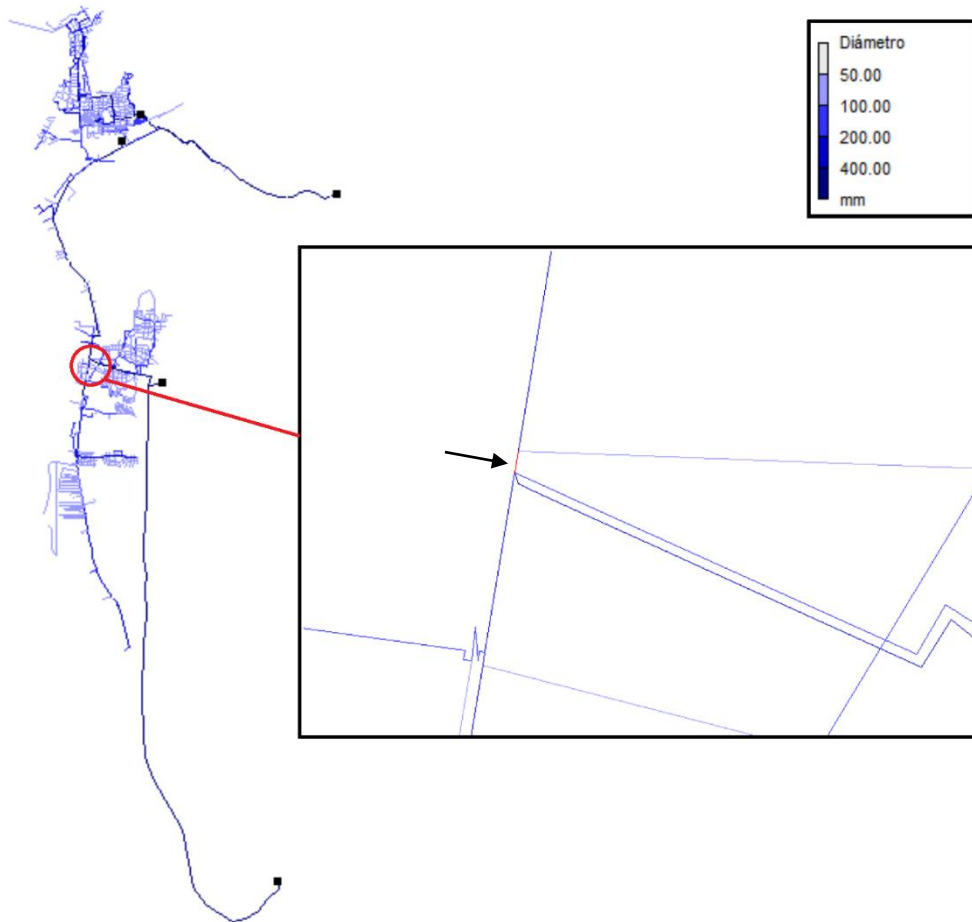


Figura 4.9. Tuberías cerradas para desviar el caudal de la estación de bombeo de Gaira.

Dado que los límites de presión dentro de un DMA son de 15 y 60 (mínimo y máximo, respectivamente), como una primera aproximación se asumió la restricción de que nudos con una diferencia de cota muy grande deben pertenecer a diferentes DMA. Esta es la razón principal para que la configuración de DMA en la zona Sur I haya sido estudiada mediante criterio ingenieril, ningún mecanismo de sectorización automática, incluyendo los algoritmos METIS, serían capaces de encontrar una solución que cumplan con estas las restricciones de presión. Como problema adicional, algunos de los nudos más elevados se suministran mediante una sola tubería que atraviesa por áreas de baja elevación, y como se ha mencionado con anterioridad, estos nudos tampoco pueden ser suministrados mediante la estación de bombeo de Gaira ni por el tanque 14, puesto que su altura máxima no es suficiente. Esto reduce de manera considerable el espacio de soluciones posibles para la zona Sur I.

Para minimizar la explotación del embalse de Toribio, en las primeras configuraciones de sectorización, se decidió establecer como primera aproximación que el embalse de El Roble abastezca de manera total a la zona Sur II, dejando que la estación de bombeo de Gaira alimente a todos los nudos de la zona Sur I que le sean posibles, dejando los restantes al embalse de Toribio. Para ello se deberá desconectar las líneas que conectan la estación de bombeo con esta zona tal como se muestra en la Figura 4.10. Tras las primeras configuraciones se concluyó que esta solución no es viable ya que se sobre-explota al embalse de El Roble; siendo necesario volver a reconectar la estación de bombeo a la zona Sur II de la RDAP de Santa Marta.



Figura 4.10. Tuberías que conectan la estación de bombeo de Gaira con la zona Sur II.

Con respecto al número de DMAs óptimo, se realizaron varias configuraciones de sectorización (yendo de una propuesta mínima de dos sectores hasta un máximo de 13) en las cuales se asumió un criterio de uniformidad de la demanda, asegurando la presión mínima en los nudos más altos en la hora pico (07:00) y evitando una presión excesiva en los nudos bajos de la red en la hora valle (02:00). Éste criterio de uniformidad de la demanda se definió luego de resolver la configuración de sectorización de algunos casos especiales que presenta la red los cuales se indican en la sección siguiente.

#### 4.6.1. Casos especiales

Dentro de la sectorización mediante criterio ingenieril se encontraron casos que merecían especial interés bien sea por la morfología sobre la que se encontraba el trazado o por casos de ramificación, en donde la alimentación se realiza mediante una única tubería y no es posible ninguna configuración de DMAs. También, en esta sección se presentan las justificaciones de diseño para dejar nudos con presiones superiores a las permitidas y el proceso llevado a cabo para minimizar el número de los mismos.

La Figura 4.11 muestra distintos casos especiales que se presentaron al momento de configurar los DMAs de la red. En el detalle A (Figura 4.12) se muestran casos definidos por ramificación, en donde la tubería principal es la única fuente de abastecimiento y por lo tanto no es posible encontrar otra solución posible que la de asignar como un solo DMA a toda la ramificación.

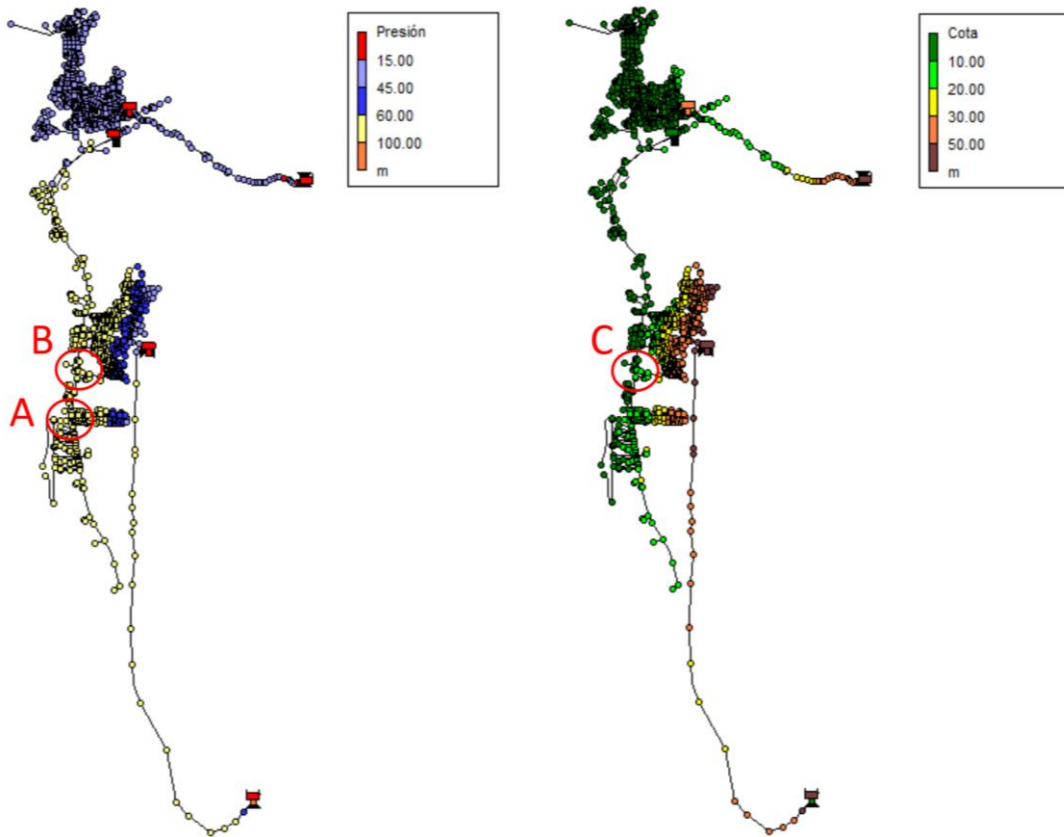


Figura 4.11. Casos especiales de la red. A) ramificaciones en la configuración de DMAs; B) nudos con presión superior a la máxima; C) nudos que no pertenecen a ningún DMA.

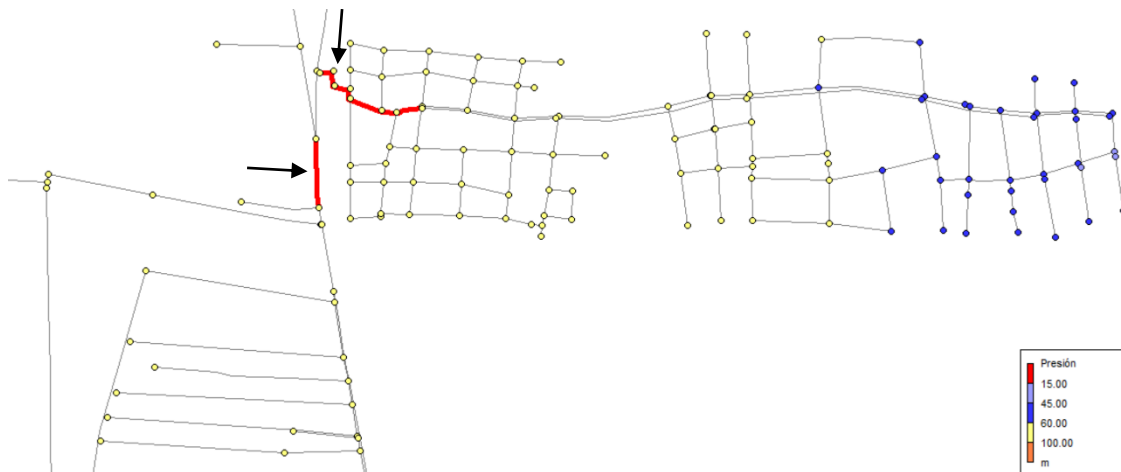


Figura 4.12. Casos especiales de la red. Detalle A: casos de ramificaciones en la configuración de DMAs.

En algunos casos se presentan configuraciones de DMA que implican nudos con una presión superior a la permitida (60 mca), esto es debido a que, si esos nudos no tienen esa presión específica, los nudos más alejados y que se encuentran a una cota más elevada no tendrán una presión superior a la mínima; es por ello, que se da prioridad a resolver los casos de presión mínima en la hora pico a reducir la presión elevada de este reducido número de nudos. La Figura 4.13 presenta dos ejemplos de casos como el mencionado, en donde el nudo a la entrada del DMA deberá necesariamente tener una presión superior a la establecida para que la presión supere



a la mínima en todos los nudos del DMA y a cualquier hora. Existen nudos que se encuentran sueltos, sin pertenecer a ningún DMA (Figura 4.14) debido a que es imposible de agregarles en DMAs cercanos por el trazado de la red, esto sumado a que representan un consumo muy pequeño y, por lo tanto, no es adecuado invertir en una VPR para limitar presiones apenas superiores a la establecida.

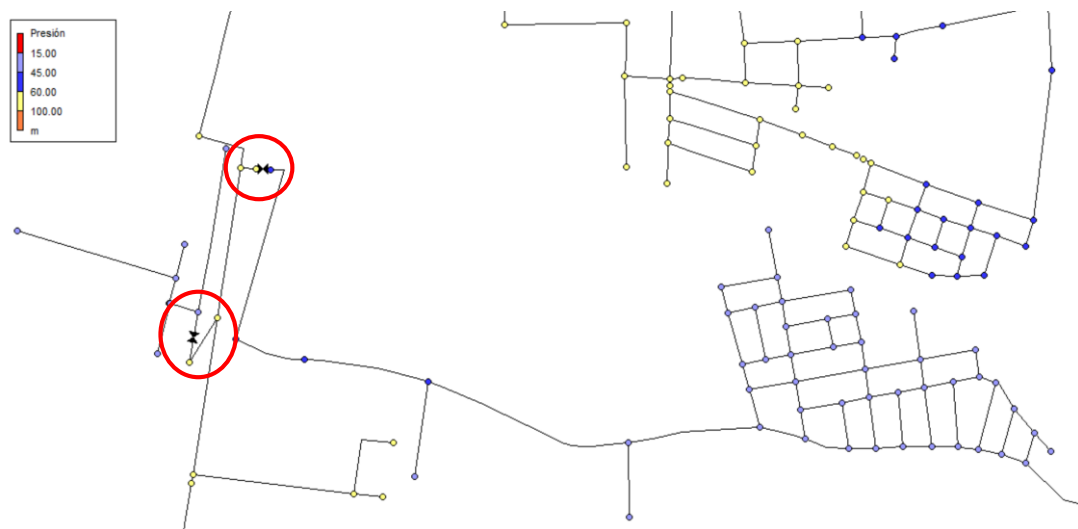


Figura 4.13. Casos especiales de la red. Detalle B: casos de nudos con presión superior a la máxima.

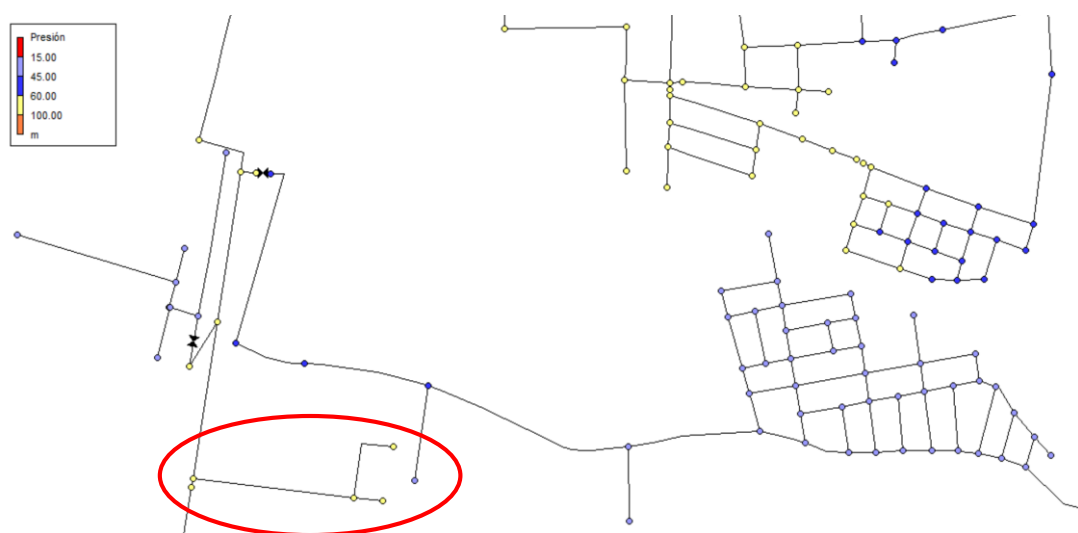


Figura 4.14. Casos especiales de la red. Detalle C: casos con nudos que no pertenecen a ningún DMA.

En la Figura 4.15 podemos observar un caso en donde la diferencia de cota entre nudos aledaños es muy elevada. Laucelli (2016) recomienda que debe existir homogeneidad de cotas dentro de un mismo DMA, pero esto no fue posible en este caso debido a que todos estos nudos se encuentran alimentados mediante una única tubería proveniente del tanque 15, por lo tanto, toda esta zona fue sectorizada únicamente en dos DMAs, uno al norte (Sector 10) de la tubería principal y el otro al sur (Sector 9).

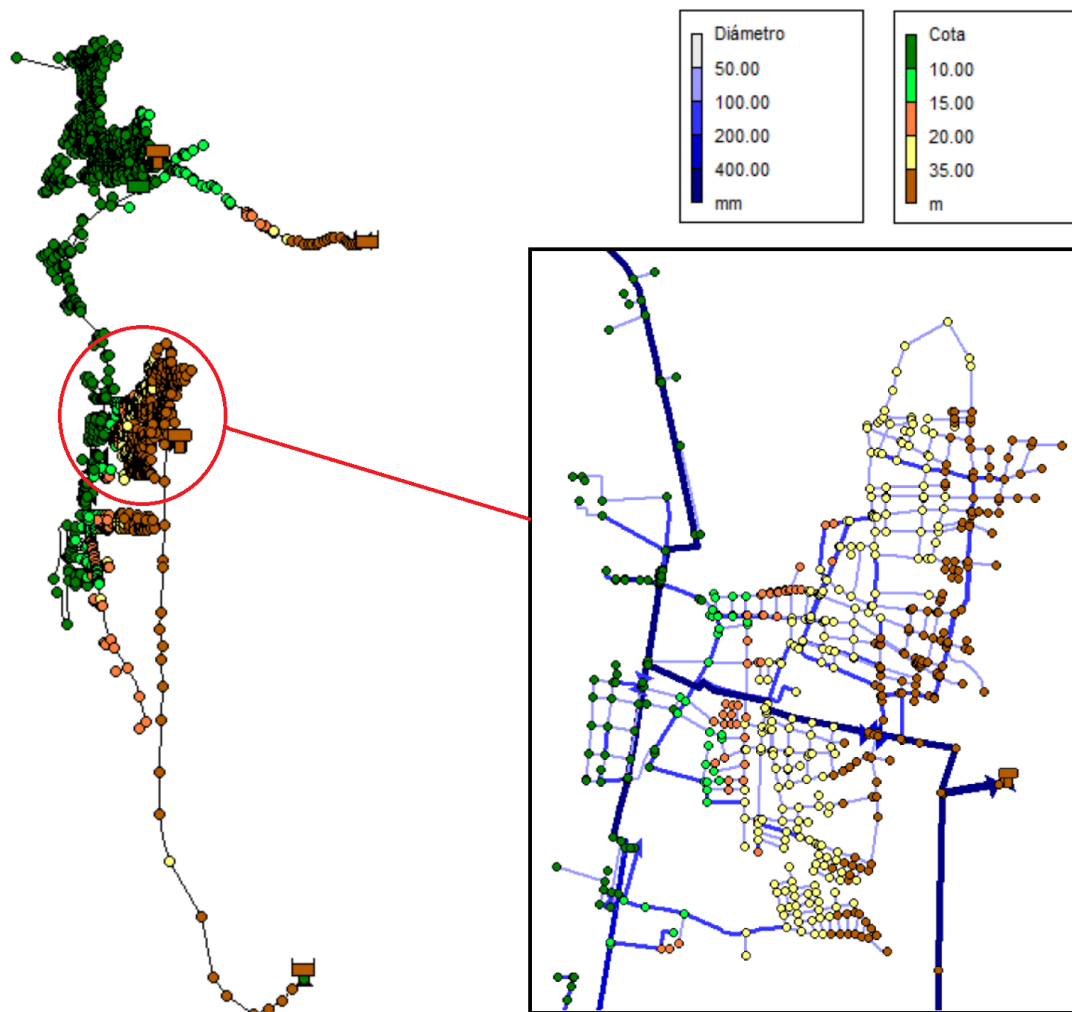


Figura 4.15. Casos en los que la diferencia de cota es muy elevada.

Como primera aproximación se trató de alimentar el sector 9 únicamente utilizando el tanque 15, para ello fue necesario cerrar una serie de tuberías dejando una única entrada que se observa en la Figura 4.16.

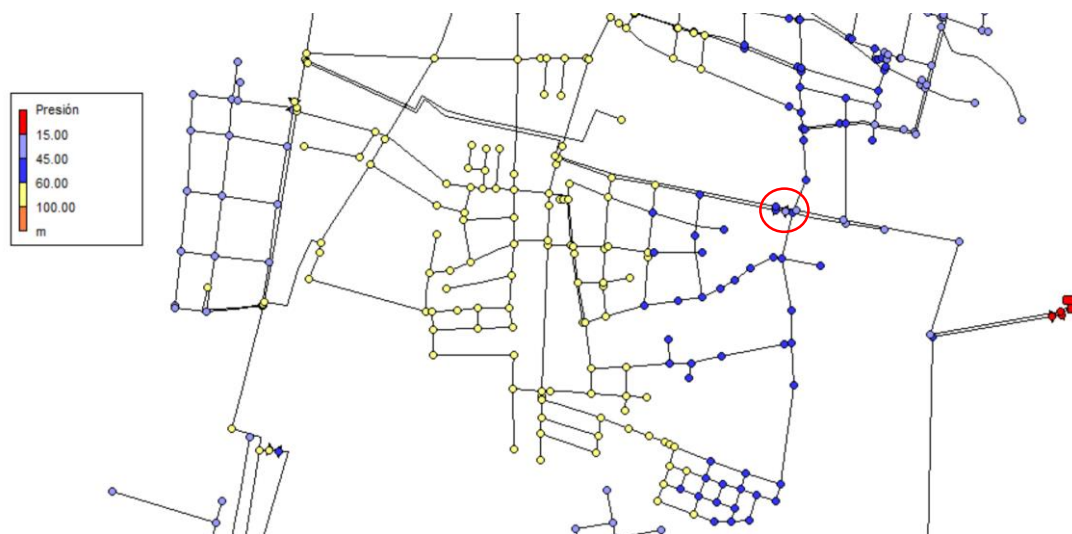


Figura 4.16. Solución a los casos de DMAs con nudos con diferencia de cota elevada. (I)

A pesar de instalar una válvula reductora de presión (PRV 6023) las presiones en la zona baja del sector son muy elevadas, excediendo los 60 mca valores necesarios para que la presión en los puntos elevados del sector se cumpla con la presión mínima requerida. Para solucionar este inconveniente se decidió distribuir el agua en el sector de una manera diferente, dejando que las pérdidas por carga se encarguen de redistribuir las presiones. Esta redistribución se realizó cerrando varias tuberías del sector, pero a su vez abriendo líneas que se encontraban cerradas para evitar problemas de desabastecimiento en ciertos nudos. Como se puede observar en la Figura 4.17 de esta manera se logra solventar con los problemas de sobre-presión de este DMA, quedando únicamente los nudos más bajos con presiones mayores a los 60 mca. Esto fue solucionado en conjunto con el sector 10.

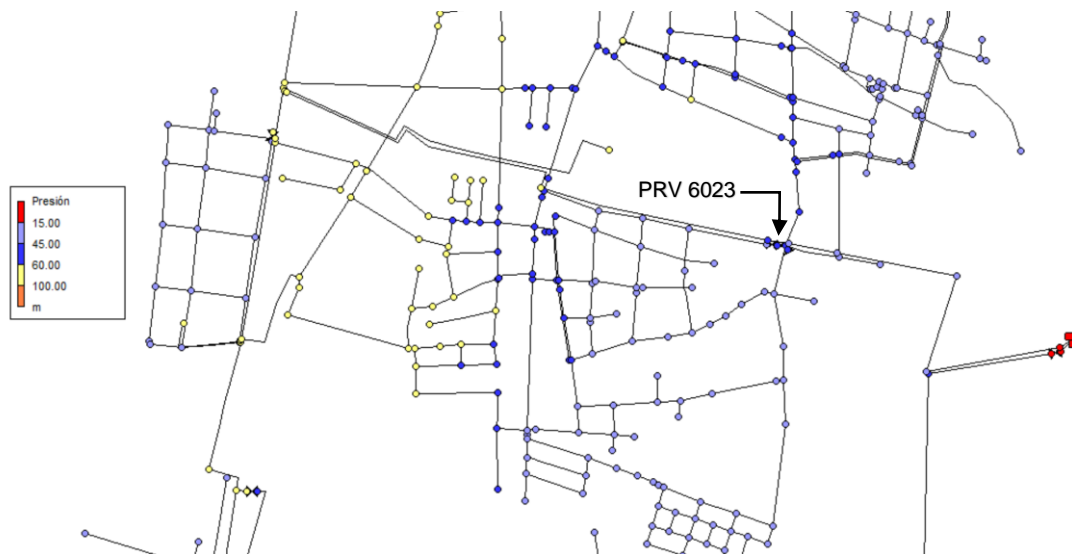


Figura 4.17. Solución a los casos de DMAs con nudos con diferencia de cota elevada. (II)

Para el sector 10 fue necesaria la instalación de la PRV 6019 a la entrada desde el tanque 15, lo cual a su vez arregla el problema de sobrepresiones que se tenía en el sector 9, pero debido a que su presión de tarado se encuentra ligado al sector 9 (cambios en la presión de tarado afectará la presión del sector 9 pudiendo dejar su presión por debajo de la mínima) es necesario crear un camino alternativo para la distribución del agua, asimismo será necesario abastecer a la zona baja del sector mediante la estación de bombeo de Gaira. La Figura 4.18 muestra las tuberías que fueron cerradas en este sector, así como la configuración de las PRV a la entrada de los sectores 9 y 10.

#### 4.7. Sectorización con los algoritmos METIS

Una vez que se ha definido la sectorización de la zona Sur I, es posible definir el tamaño que tendrá cada uno de los DMAs del resto de la red (Figura 4.19). Dado que el número de posibles soluciones en este punto es muy pequeño, se utilizó el tamaño promedio de los DMA obtenidos mediante criterio ingenieril para establecer la demanda base del resto de los DMA. Esta demanda base permitió definir el número óptimo de DMA que se encontraran utilizando los algoritmos METIS. En este caso, el tamaño promedio de los DMA definidos en Sur I es de 33 l/s. Sin embargo, algunos de estos DMA son muy pequeños debido a la necesidad de evitar presiones superiores a 60 mca. Si se ignoran estos DMA, el tamaño medio de los DMA aumenta hasta los 42 l/s.

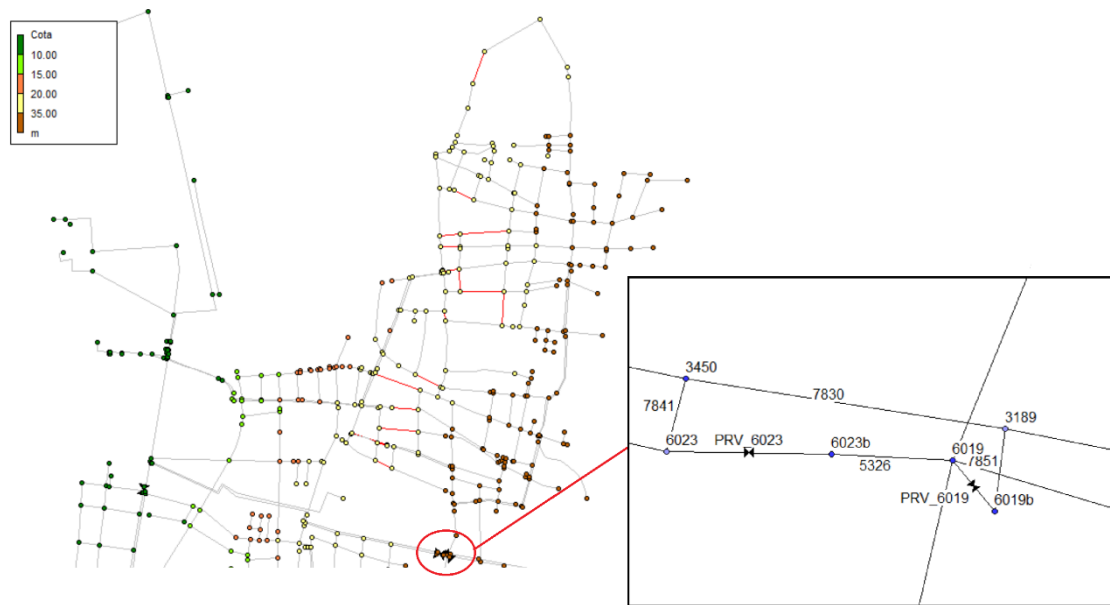


Figura 4.18. Cierre de tuberías en el sector 10 y configuración de las PRV.



Figura 4.19. Red de la zona Sur II.

Como METIS permite factores de ponderación tanto para nudos como para bordes (tuberías en el modelo), para el peso de los nudos se utilizará su demanda base. Las tuberías principales deberán ser los límites entre los DMAs y, por lo tanto, no deberán cerrarse; es por eso que tendrán un gran peso. Por último, las tuberías se ponderarán según su diámetro priorizando tuberías pequeñas o grandes dependiendo la situación.

Finalmente, una vez definidos todos los parámetros necesarios para resolver el problema, se buscó la configuración óptima de DMAs programando un script que trabaja en MATLAB y Visual NET que sigue el esquema de la Figura 4.20; en donde los rectángulos representan el código ejecutado en MATLAB y los trapecios en Visual NET. Este script importa la red desde EPANET, cambiando el formato del archivo a uno ejecutable por METIS, aplica la partición y finalmente exporta los resultados nuevamente a EPANET en donde se revisará que los límites de cada DMA cumplan con las condiciones hidráulicas de la red.

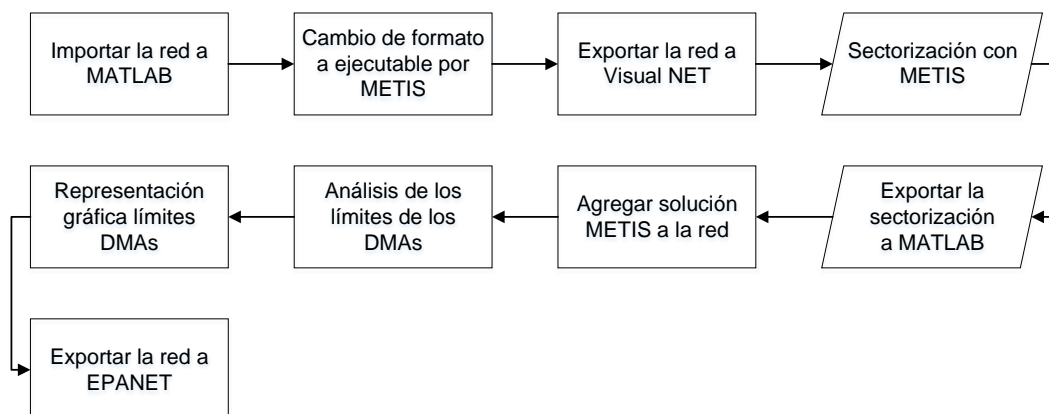


Figura 4.20. Esquema del script para sectorizar la red utilizando METIS.

Las soluciones finales se analizan para determinar la necesidad de cambiar cualquiera de los parámetros iniciales del procedimiento. Por lo tanto, según los resultados, se pueden modificar los siguientes parámetros:

- La definición de los pesos de las líneas de la red. Estos pesos, como se describe más adelante, dependen del flujo entrante para cada DMA. Por lo tanto, después de la solución obtenida, puede ser necesario redefinirlos.
- La definición del número de DMAs. Un análisis de la solución obtenida puede sugerir la necesidad de aumentar o disminuir el número de sectores. Dado que el objetivo es buscar la uniformidad de los tamaños de los diferentes DMAs, la redefinición del tamaño de los sectores puede ayudar en la búsqueda de soluciones más apropiadas.

#### 4.7.1. Librería de acceso a METIS

La librería de METIS son algoritmos de libre descarga, su código fuente puede descargarse directamente de <http://www.cs.umn.edu/~metis>.

Para poder implementar los algoritmos METIS en el script explicado en la Figura 4.20 fue necesaria una librería desarrollada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

El cambio de formato desde EPANET hasta un ejecutable por METIS se realizó utilizando un algoritmo implementado en MATLAB (Figura 4.21) mientras que el acceso a METIS se realizó en Visual NET (Figura 4.22) a través de una librería que enviaba los archivos con el formato METIS descrito en la sección 2.3.2.1 y que consta de las siguientes funciones:

- *gpmetis\_execute* Lib "gpmetis.dll" (ByVal F1 as String, ByVal F2 as Integer).

Esta función ejecuta una simulación completa de METIS. En donde F1 es el archivo de entrada y F2 el de salida, cuya estructura se ha definido previamente en las secciones 2.3.2.1 y 2.3.2.2.

- *gpmetis\_init* Lib "gpmetis.dll" (ByVal F1 as String, ByVal F2 as Integer).

En METIS se pueden realizar ejecuciones por partes. La función *Init*, sirve para inicializar el algoritmo. Las variables de entrada son las mismas que para la función *excute*, es decir F1 es el archivo de entrada y F2 el de salida

- *gpmetis\_run* Lib "gpmetis.dll" ().

Esta función ejecuta el algoritmo de sectorización cuando se está realizando una ejecución por partes, es necesario inicializar el algoritmo con la función *Init*.

- *gpmetis\_close* Lib "gpmetis.dll" ().

Sirve para cerrar el algoritmo de sectorización. Se utiliza siempre que se ejecute el algoritmo por partes.

- *gpmetis\_nparts* Lib "gpmetis.dll" ().

Esta función permite fijar u obtener el número de sectores cuando se está ejecutando el algoritmo por partes.

- *gpmetis\_part* Lib "gpmetis.dll" (ByVal F2 as Integer).

Sirve para obtener el sector al que pertenece un nudo cuyo identificativo será el valor de entrada F2.

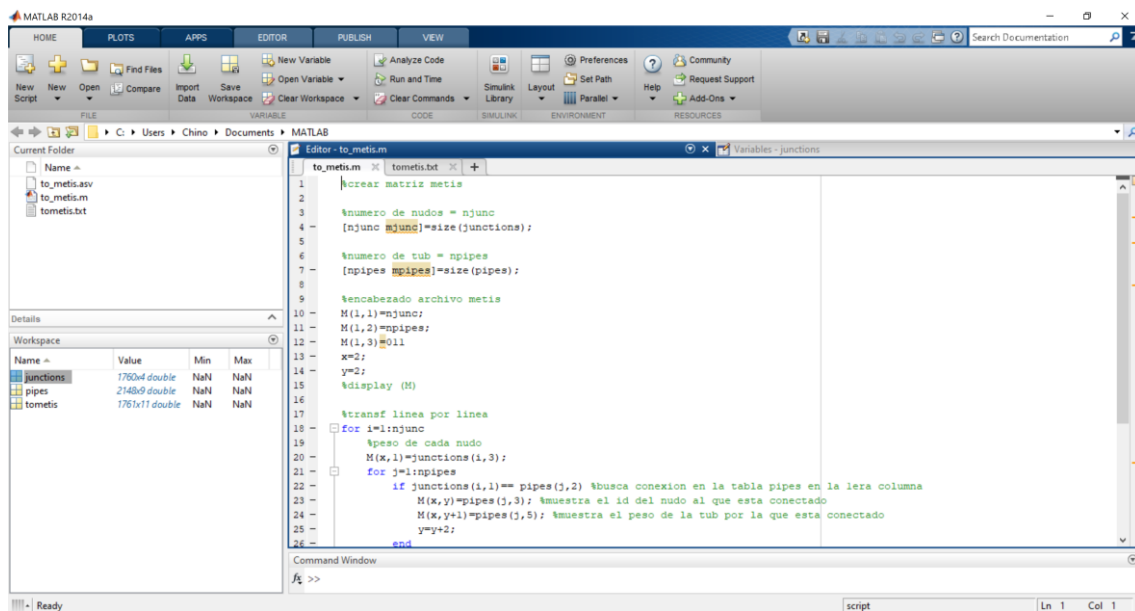


Figura 4.21. Algoritmo implementado en MATLAB para el cambio de formato de EPANET a METIS.

# Sectorización Óptima de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de Santa Marta, Colombia Utilizando los Algoritmos METIS

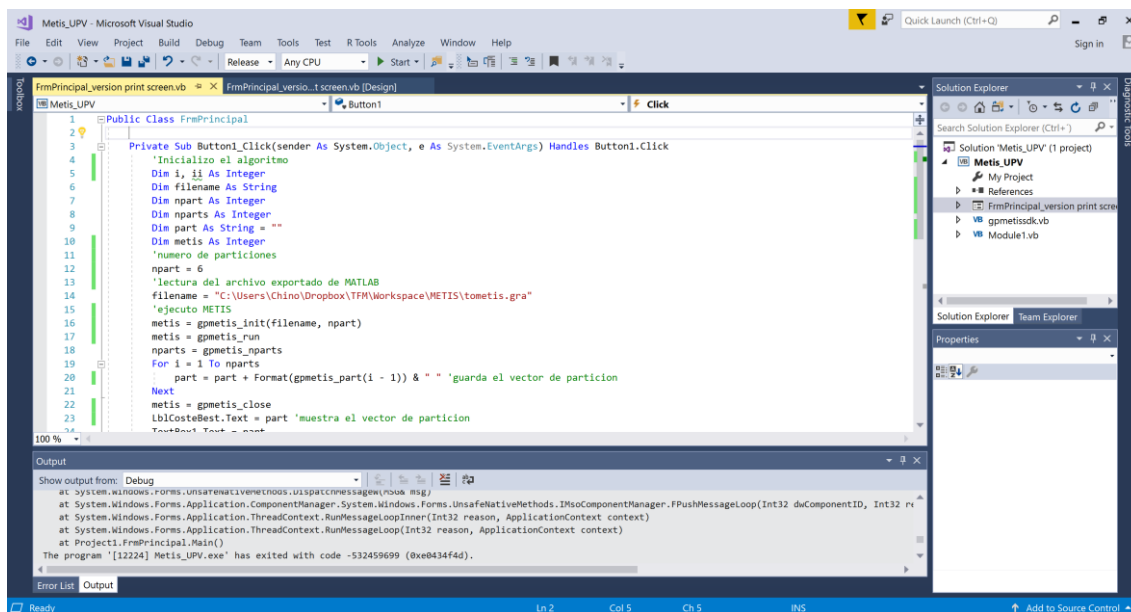


Figura 4.22. Algoritmo implementado en Visual NET para ejecutar la librería de METIS.

## 4.7.2. Análisis de los pesos de las tuberías

La metodología usada para la ponderación de las tuberías se basa en la demanda de cada DMA. Por lo tanto, el caudal promedio de entrada de cada DMA define un diámetro máximo ( $D_{max}$ ) y un diámetro mínimo ( $D_{min}$ ) restringidos por los valores máximos ( $j_{max}$ ) y mínimos ( $j_{min}$ ) permisibles del gradiente hidráulico en las tuberías fronterizas. Estos valores se asignaron en base a criterio ingenieril y se tomaron entre un máximo de 15 m/km y como mínimo de 3 m/km. Para obtenerlos se observó que el 95% de las tuberías de la red tenían una pérdida de carga inferior a 15 m/km (Figura 4.23). Además, pérdidas de carga pequeñas corresponden a tuberías grandes y bajas velocidades, por lo tanto, se limitó la velocidad mínima a 0,5 m/s lo cual lleva a un gradiente mínimo de 3 m/km mientras que para el máximo los 15 m/km representan alrededor de 2 m/s. Dependiendo el número de entradas del DMA y de su demanda, se puede obtener el diámetro recomendado.

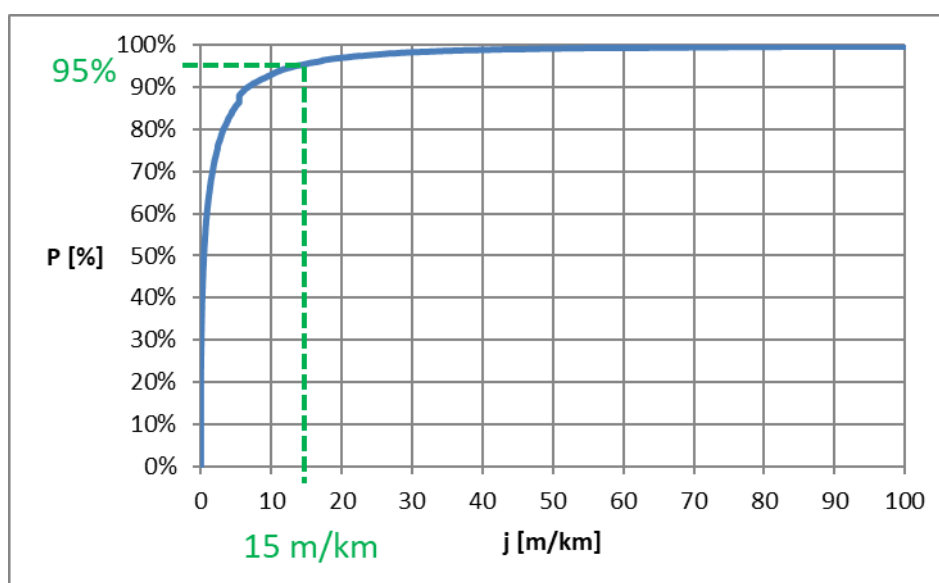


Figura 4.23. Gradiente hidráulico de las tuberías de la red.

Como primer enfoque, un DMA con una sola entrada y con una demanda de 42 l/s tendrá diámetros que oscilan entre 102 mm para el gradiente máximo y 254 para el mínimo. El algoritmo de partición debería proponer tuberías con diámetros entre estos dos valores. Si esto no fuera posible, se deberían usar otras tuberías en su lugar. Como regla general, es preferible utilizar tuberías pequeñas que las grandes. Por lo que, la estrategia de ponderación debe considerar esto.

Para ello se utilizó la capacidad de transporte de las tuberías, utilizando el área de la sección transversal, es decir, el diámetro cuadrado como base. Una vez definidos los valores extremos para el diámetro de las tuberías delimitadoras, es preferible utilizar tuberías de menor tamaño, ya que implican un menor coste de instalación de las PRV. Tuberías con diámetros inferiores al mínimo deberían tener una mejor ponderación que cualquier otra tubería con un diámetro mayor que el máximo. De igual manera, tuberías con un diámetro mayor al máximo tendrán pesos mayores. Por lo tanto, la función de ponderación viene dada de la siguiente manera:

$$\begin{array}{r}
 D > D_{max} \\
 D_{min} < D < D_{max} \\
 D > D_{min}
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 \frac{2 \cdot D^2}{10000} \\
 \frac{D^2}{10000} \\
 \frac{D_{max}^2}{10000} + \frac{40000}{D^2}
 \end{array}$$

En esta función de ponderación, los pesos se han elegido para dar cuenta de todas las situaciones posibles. Como el algoritmo METIS requiere valores enteros para los pesos tanto para los vértices como para los bordes, los resultados de la ecuación se convirtieron en números enteros. La Tabla 4.3 presenta los valores utilizados en el caso de una demanda promedio de 42 l/s. Los diámetros en milímetros representan el radio interior efectivo de las tuberías.

Tabla 4.3. Ponderación de los bordes para diferentes diámetros.

D (mm)	D (in)	Peso
50	2	22
60	2.5	17
70	2.75	14
80	3	13
90	3.5	11
100	4	1
150	6	2
200	8	4
250	10	6
300	12	18
350	14	25
400	16	32
450	18	41
500	20	50
600	24	72
700	28	98
1500	60	450



### 4.7.3. Análisis de los límites de los DMAs

Como se vio en la sección 2.3.2.2 (pág. 35) el archivo resultante de la partición de un gráfico utilizando METIS consta de  $n$  líneas con un solo número por línea, que representa el número de partición al que pertenece el vértice. Los números de partición comienzan desde 0 hasta la cantidad de particiones menos una. Por lo tanto, si una línea se encuentra entre dos vértices que pertenecen a particiones diferentes, ésta será parte de los límites de los DMAs.

El análisis de estos límites es de vital importancia debido a que los resultados de la partición con METIS no cumplen necesariamente con las condiciones hidráulicas de la red. Para facilitar este análisis, se incluyó en el script explicado en la Figura 4.20 un algoritmo para representar gráficamente los mismos antes de su exportación a EPANET. Se utilizó un parámetro de las tuberías que no esté siendo implementado en el modelo para representar si una tubería forma parte de los límites de un DMA (asignándole un valor diferente de cero) o no. Un resultado de este algoritmo se puede observar en la Figura 4.24.



Figura 4.24. Resultado del algoritmo para el análisis de los límites de cada DMA.

### 4.8. Análisis para el cambio de tuberías

Se tuvieron que cambiar ciertas tuberías principales de la red para mejorar la capacidad hidráulica de las mismas y de esta manera poder cumplir con las restricciones de presión mínima en ciertos nudos durante la hora pico, para de esta manera no afectar la configuración de los DMAs que cumplían con el criterio de uniformidad de la demanda.

Al volver a conectar la estación de bombeo de Gaira a la zona Sur II fue necesario aumentar el diámetro de las líneas que alimentaban desde la estación de bombeo hasta

O. Andrés Abril O.

la zona Sur I para poder aprovechar todo el caudal posible que esta estación puede brindar, minimizando la explotación del embalse de Toribio.

#### **4.9. Análisis de la configuración**

Para evaluar cada configuración de sectorización se analizaron los índices de la semejanza de la demanda y de la uniformidad de las presiones entre los DMAs resultantes. La semejanza de la demanda busca que cada uno de los DMA abarque un número similar de usuarios para poder garantizar de esta manera la uniformidad de las presiones en toda la ciudad. Para calcular cada uno de estos índices se utilizó tanto una hoja electrónica de cálculo como un algoritmo programado en MATLAB. En base a ellos se eligió la configuración óptima de la sectorización para la red de la ciudad de Santa Marta.

## Capítulo 5:

# ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

---

### 5.1. Sectorización óptima

La aplicación de la metodología descrita en la Figura 4.1 y la aplicación de pequeñas correcciones basadas en criterio ingenieril, permitieron obtener la solución para la configuración óptima de sectorización de la zona sur de Santa Marta que se presenta



- ◆ 1
- ◆ 2
- ◆ 3
- ◆ 4
- ◆ 5
- ◆ 6
- ◆ 7
- ◆ 8
- ◆ 9
- ◆ 10
- ◆ 11
- ◆ 12
- ◆ 13
- ◆ 14
- ◆ 15
- ◆ 16
- ◆ 17
- ◆ 18

Figura 5.1. Es una solución de 18 sectores, que se definen en base al cambio de más de 3 km de red de tuberías y al cierre de 76 tuberías. Del mismo modo, la definición de los sectores ha requerido la instalación de 21 válvulas reductoras de presión. Además, dado que el único modo posible de operación de la red es a través de los diferentes depósitos de regulación, fue necesario aumentar el tamaño del tanque 14 para garantizar un comportamiento adecuado del sistema hidráulico, como se explica más adelante.

La Tabla 5.1 muestra los resultados de demanda y presión media de cada uno de los sectores de la solución óptima encontrada, en donde los DMAs asignados con una letra M fueron obtenidos mediante METIS. La presión media del *DMA 1* supera el valor de la presión máxima permitida debido a que en este sector se encuentra la línea de alimentación (diámetro de 1500 mm) desde el embalse de Toribio hasta el tanque 15, por lo tanto, estas presiones deben ser elevadas para poder abastecer hasta el depósito.

Los valores de demanda promedio de los DMAs encontrados mediante criterio ingenieril son pequeños debido a que en su mayoría fueron definidos por ser casos especiales (Sección 4.6.1), éstos casos merecieron especial interés bien sea por la morfología sobre la que se encontraba el trazado o por casos de ramificación, en donde la alimentación se realiza mediante una única tubería y no es posible ninguna configuración de DMAs alterna.

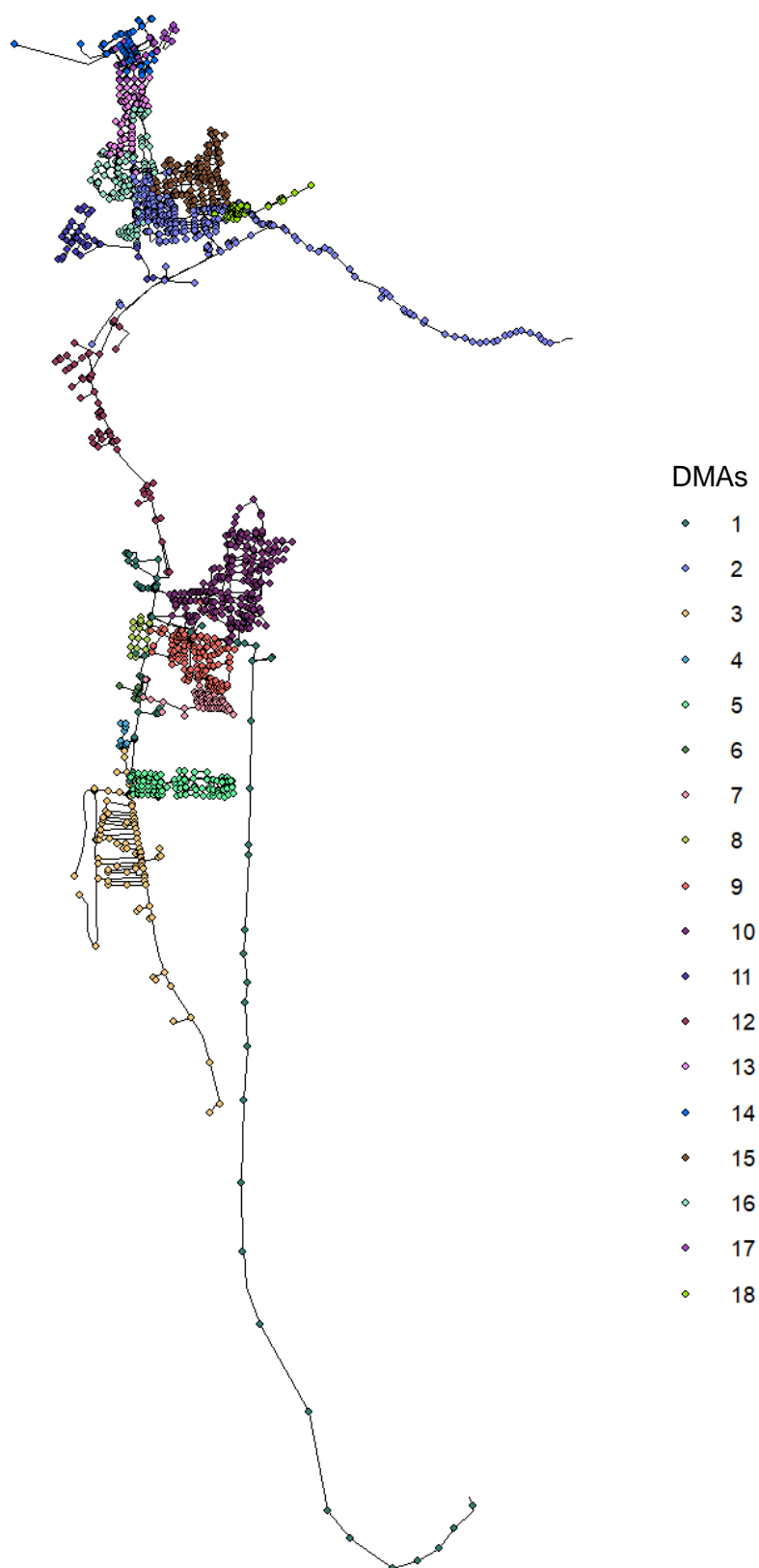


Figura 5.1. Solución para la configuración óptima de la zona sur de Santa Marta.

Tabla 5.1. Resultados de la demanda y presión media de cada uno de los sectores de la red.

# DMA	Demanda [l/s]	Presión [mca]
1	8.68	61.78
2M	45.24	39.02
3	14.44	23.65
4	4.92	22.24
5	12.04	37.45
6	6.98	17.24
7	2.40	29.28
8	18.14	25.56
9	7.34	28.69
10	26.29	41.44
11	6.03	18.57
12	18.40	43.12
13M	50.98	43.82
14M	43.99	43.86
15M	41.74	39.62
16M	51.11	43.43
17M	37.68	42.58
18	5.48	33.42

Conforme se resolvieron estos casos, el número de nudos con presión mayor a la máxima permitida fue reducido notablemente como se observa en la Figura 5.2, hasta llegar a un punto en donde fue imposible reducir la presión de ciertos puntos de la línea de transporte ya que esa presión elevada es necesaria para poder transportar el agua hacia todos los nudos de la red. No existen en la red, nudos que tengan presiones inferiores a la mínima permitida en ninguna de las configuraciones estudiadas.

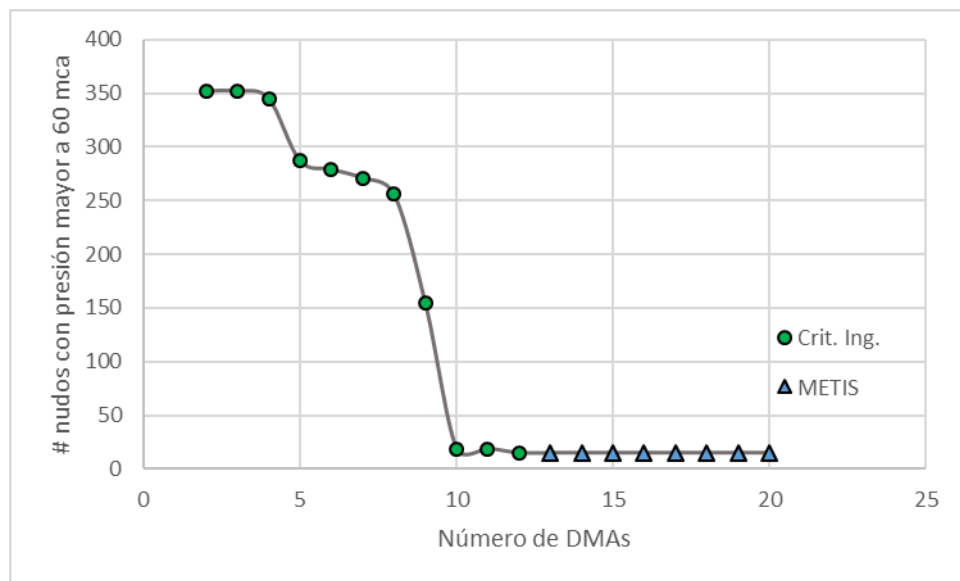


Figura 5.2. Número de nudos con presión mayor a la máxima permitida con respecto al número de DMAs.

## 5.2. Expansión de los depósitos de regulación

Una vez analizados los depósitos de regulación de la red y la estación de bombeo de Gaira, se concluye que las bombas pueden suministrar 131,61 l/s en total, 64,37 l/s para Sur I y 67,24 l/s para Sur II, cuyas demandas son de 125,65 y 276,22 l/s respectivamente. Por lo tanto, es necesario que esta diferencia sea cubierta por los depósitos de regulación. La Tabla 4.2 muestra que el caudal que puede producir el tanque 14 sin ninguna expansión es de 165.2 l/s, que sumado a lo que puede aportar Gaira deja un déficit de 43,78 l/s, por lo que su expansión es necesaria para poder cubrir con las demandas de la zona. Por contraparte el tanque 15 puede cubrir con las demandas de la zona Sur I, por lo que su expansión no fue necesaria.

## 5.3. Semejanza de la demanda

La semejanza de la demanda busca que cada uno de los DMA abarquen un caudal similar para poder garantizar de esta manera la uniformidad de las presiones en toda la ciudad. Si el reparto de caudal fuera perfecto, todos los DMAs tendrían la misma demanda, esa demanda sería la demanda media y la semejanza de la demanda sería cero. Para calcular el límite superior se tendrían tantos DMAs como nudos con demanda distinta de cero, este valor para la red de Santa Marta es de 430.

La Figura 5.3 muestra los resultados obtenidos del cálculo de la semejanza de la demanda de las distintas configuraciones de DMAs encontradas utilizando criterio ingenieril y METIS.

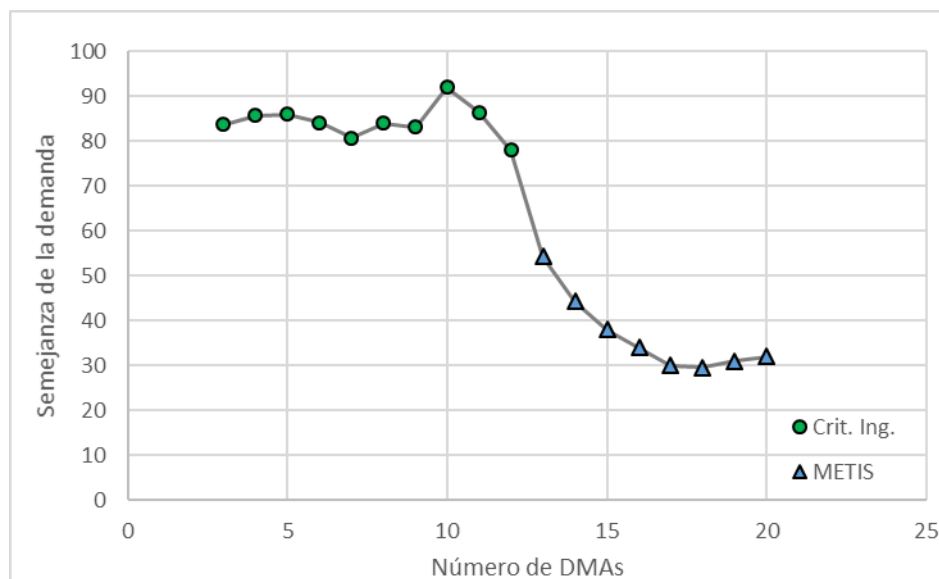


Figura 5.3. Resultados de la semejanza de la demanda para cada configuración de sectorización de la red.

En ella se puede observar que los resultados de la semejanza de la demanda para las distintas configuraciones de sectorización se encuentran muy distantes de su límite superior (430). Los valores obtenidos mediante el proceso que utiliza criterio ingenieril muestran mucha dispersión (Figura 5.4), esto se debe principalmente a que esta sectorización debió resolver casos especiales de la red (nudos con presiones muy elevadas) sin importar el criterio de uniformidad; lo cual conlleva a tener DMAs de tamaños muy variados. Cabe destacar que la sectorización basada por criterio ingenieril tiene como objetivo uniformizar las presiones, esto se consigue tras resolver los casos de presiones elevadas de la red.



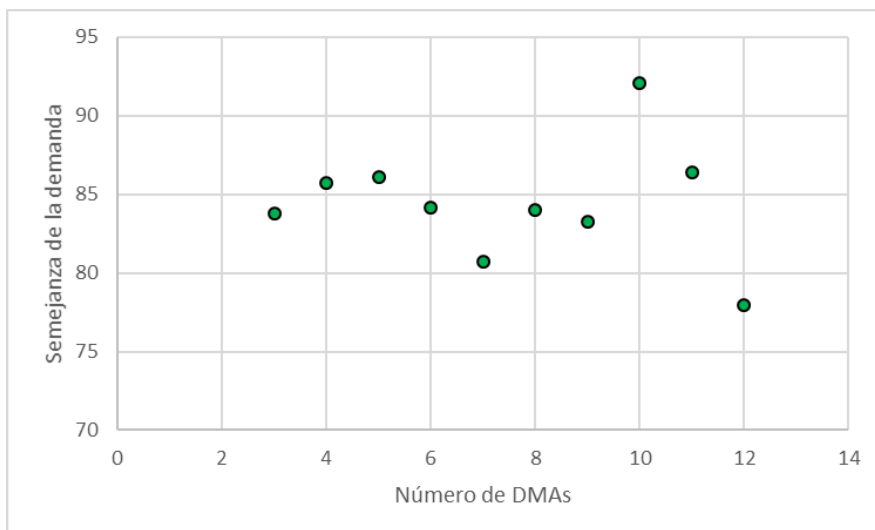


Figura 5.4. Resultados de la semejanza de la demanda en los DMAs encontrados utilizando criterio ingenieril.

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante METIS (Figura 5.5) muestran una clara tendencia, donde la demanda es más semejante conforme aumenta el número de DMAs de cada configuración, llegando hasta un óptimo donde luego la semejanza es más dispar. Al analizar estos casos se pudo concluir que METIS no es capaz de seguir sectorizando debido a que no se puede encontrar soluciones hidráulicamente razonables compatibles con el criterio inicial de buscar DMAs con una demanda uniforme. La demanda promedio de cada DMA antes de utilizar METIS es de 42 l/s, mientras que la demanda promedio de los DMAs obtenidos con METIS es de 40 l/s. Aplicar estas configuraciones manteniendo el criterio de uniformidad implica cerrar tuberías de la red de transporte lo cual hidráulicamente no es viable. Para encontrar configuraciones con un mayor número de DMAs fue necesario que la demanda promedio de los DMAs cayera drásticamente hasta 30,7 l/s, un valor muy alejado del promedio de los DMAs encontrados mediante criterio ingenieril, lo cual se encuentra reflejado en el aumento del índice de la semejanza de la demanda para las configuraciones de 19 y 20 DMAs.

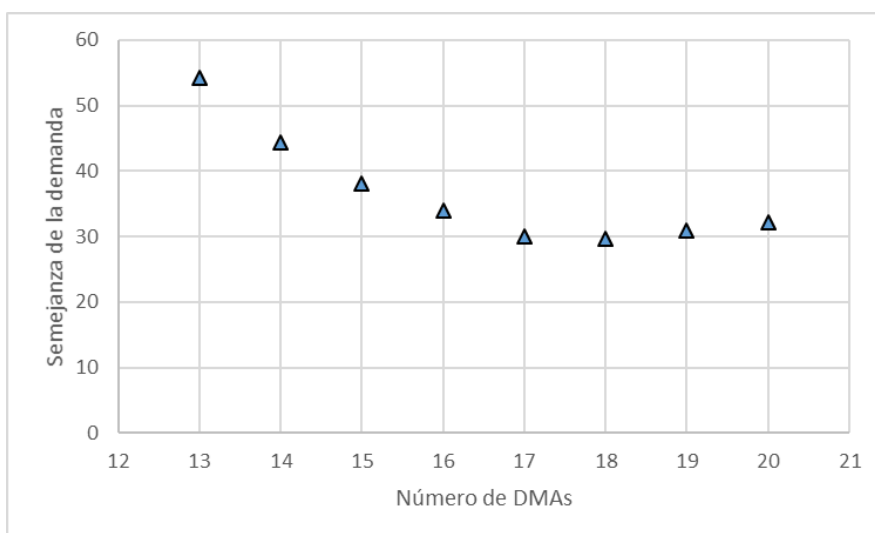


Figura 5.5. Resultados de la semejanza de la demanda en los DMAs encontrados utilizando METIS.

### 5.4. Uniformidad de las presiones

La Figura 5.6 muestra los resultados obtenidos tras el cálculo del índice de la uniformidad de las presiones, en donde el eje de las abscisas representa el número de DMAs de cada configuración de sectorización obtenida, y el de las ordenadas refleja el índice de la uniformidad de las presiones. En ella se puede observar como las presiones se vuelven más uniformes conforme el número de DMA aumenta en la sectorización. Es decir, la uniformidad de presiones mejora conforme mejora la semejanza de la demanda.

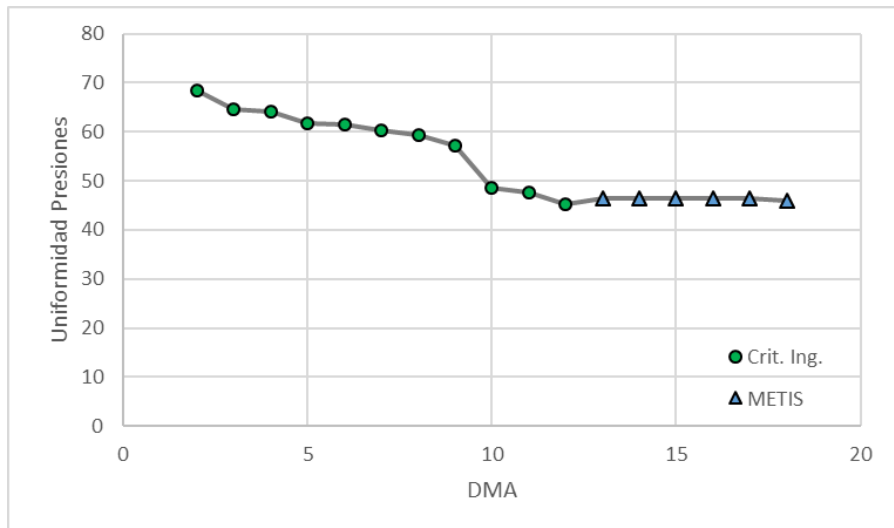


Figura 5.6. Resultados de la uniformidad de las presiones para cada configuración de sectorización de la red.

Se puede apreciar que con la sectorización que sigue el criterio ingenieril (Figura 5.7) existe una gran variación en la uniformidad de presiones, mientras que en los DMAs encontrados con METIS (Figura 5.8), este índice apenas varía. Cuando se tiene flexibilidad para la sectorización, METIS no tiene limitaciones de presión máxima ni presión mínima por lo que puede hacer la sectorización que quiera, por lo que en este caso la sectorización sólo se encuentra restringida por el criterio de la uniformidad de la demanda.

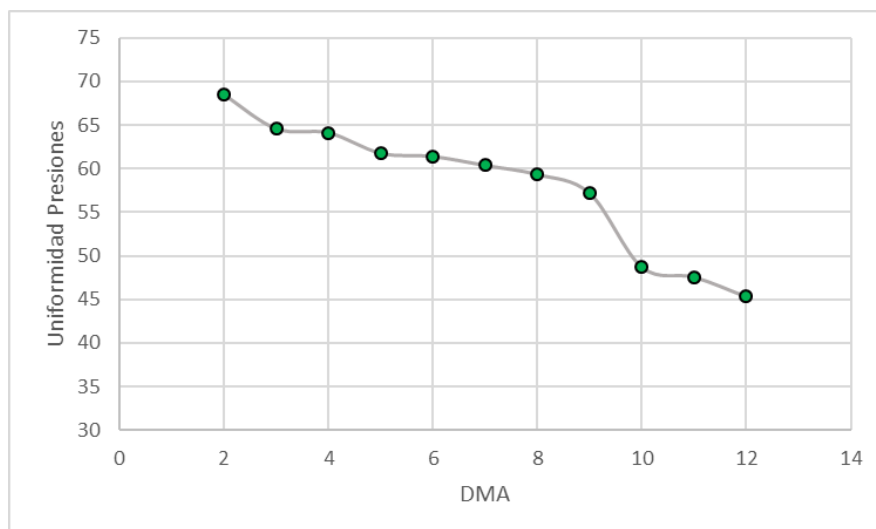


Figura 5.7. Resultados de la uniformidad de presiones para los DMAs obtenidos mediante criterio ingenieril.

La uniformidad de presiones mejora mucho tras aplicar la sectorización por criterio ingenieril ya que este es el objetivo del mismo, sectorizar para uniformizar las presiones, esto se consigue tras resolver los casos de presiones elevadas de la red mediante la instalación de válvulas reductoras de presión a la entrada de cada DMA. Mientras tanto, en los casos estudiados mediante METIS, la uniformidad de presiones apenas varía conforme aumenta el número de configuraciones de sectorización (Figura 5.8) debido a que METIS no utiliza la presión como criterio de optimización, esto sumado a que la red sectorizada es plana, sin apenas fluctuaciones de presión a lo largo del día.

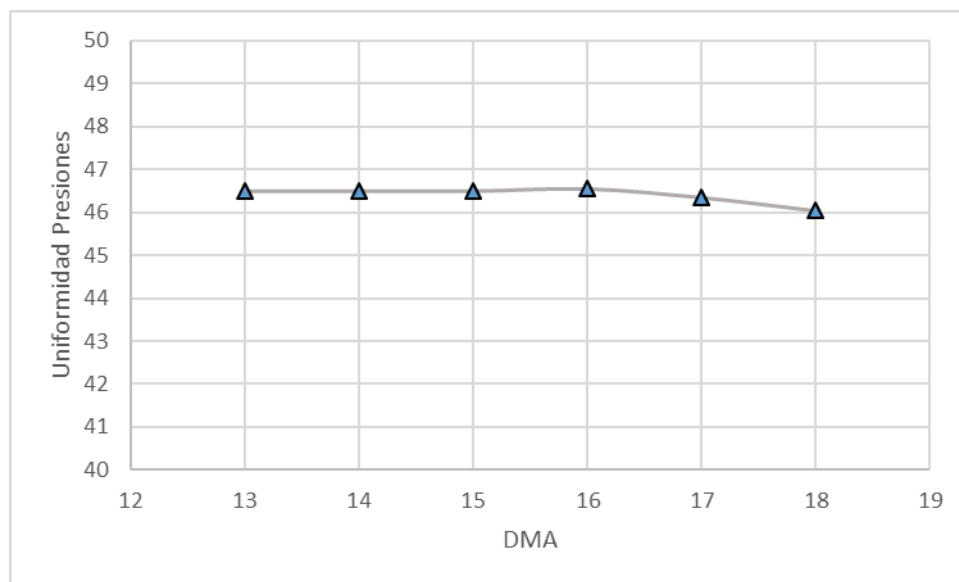


Figura 5.8. Resultados de la uniformidad de presiones para los DMAs obtenidos mediante METIS.

### 5.5. Límites de extracción

Como se mencionó en el apartado 3.2 la red de Santa Marta tiene un consumo pico del 154% la demanda lo cual implica necesariamente trabajar con depósitos de regulación, los cuales además tienen capacidades que se deben ajustar a la demanda tal y como se explicó en la sección 4.3 y cuyos resultados se encuentran en la sección 5.2. En la sección 4.2 se describe que el sector central de la red tiene una demanda muy elevada y éste se abastece principalmente del embalse de Toribio, lo cual deja muy poco margen para utilizar este embalse para alimentar a la zona Sur. Con todas estas restricciones de volúmenes demandados y patrones de consumo el objetivo era prácticamente imposible de alcanzar.

Si bien la solución encontrada cumple con todos los requerimientos de presión mínima en todos los nudos de consumo de la red, para alcanzarlos se incumplen con algunas de las restricciones de la red. La Tabla 5.2 muestra los límites de extracción de los embalses, así como los valores inyectados una vez que la sectorización es puesta en funcionamiento. En ella se puede apreciar que en el embalse de Toribio se excede en un 6,4% del caudal máximo que se puede extraer durante la estación seca. Cabe mencionar que, aunque se está sobreexplotando el embalse de Toribio, este valor es muy pequeño si lo comparamos con el 154% que implica el consumo pico de la red. Este excedente tampoco pudo ser cubierto por la estación de bombeo de Gaira debido a que sus bombas no pueden proporcionar suficiente altura como fue explicado en la sección 4.5.

Tabla 5.2. Caudales medios durante el funcionamiento de la red y límites de extracción.

Embalse	Caudal medio (l/s)	
	Funcionamiento	Límite
El Roble	184,41	240
Toribio	949,10	900
Gaira	131,61	206
Total	1265,12	1346 (+6,4%)

La Figura 5.9 muestra el esquema de funcionamiento de la red luego de aplicar la sectorización óptima.

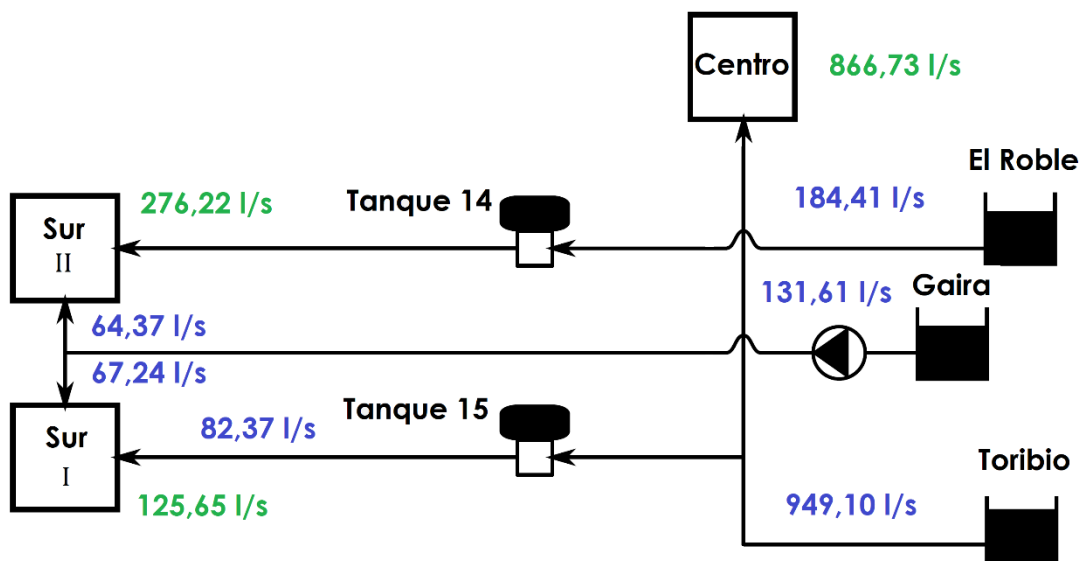


Figura 5.9. Esquema de funcionamiento de la red.

### 5.5.1. Caudales procedentes del embalse de El Roble

El embalse de El Roble abastece a la red de Santa Marta a través del tanque 14 (Figura 5.9) para poder cumplir con el patrón de consumo de la ciudad fue necesaria la expansión de este tanque tal y como se explica en la sección 5.2.

En la sección 4.2 se indica que el caudal proveniente del embalse de El Roble deberá ser maximizado para alimentar a la zona Sur II liberando a la estación de bombeo de Gaira para que abastezca a Sur I. Pero como tan solo se consigue extraer de media 184,41 l/s, inferiores a los 240 l/s que puede aportar esta fuente como máximo es necesario que la demanda restante de 64,37 l/s sea cubierta por una de las bombas de la estación de Gaira.

### 5.5.2. Caudales procedentes de la estación de bombeo de Gaira

De la estación de bombeo de Gaira se extraen un total de 131,64 l/s de los cuales 64,37 l/s sirven para abastecer la zona Sur II mientras que los restantes 67,24 l/s abastecen parte de los consumos de Sur I. El volumen extraído de Gaira es mucho menor a su límite de 206 l/s debido a que la estación de bombeo no es capaz de abastecer por si sola a la totalidad de los consumos de Sur I puesto que la bomba instalada para abastecer a esta zona no puede aportar la altura necesaria para que los nudos de mayor

cota sean abastecidos con presiones por encima de la mínima, tal como se explicó en el apartado 4.5.

### **5.5.3. Caudales procedentes del embalse de Toribio**

Para terminar de satisfacer las demandas de la zona Sur I que no pueden ser alimentadas mediante la actual bomba dispuesta en Gaira, se recurre a la captación de caudal proveniente de Toribio a través del tanque 15. Al embalse de Toribio se le fuerza a aportar una media de 949,1 l/s pues además de terminar de completar la demanda de la zona Sur I también es el encargado de alimentar toda la región Centro, la cual constituye la mayor parte del total de la red de Santa Marta con una demanda de 866,73 l/s. Dicho requerimiento supone una sobreexplotación de la fuente situada en el embalse de Toribio del 6,4% que como se ha mencionado con anterioridad, es mucho menor al valor pico del 154% de la demanda.



## Capítulo 6:

# CONCLUSIONES

---

### 6.1. Conclusiones

Sectorizar la red de distribución de agua potable de la ciudad de Santa Marta no fue una tarea sencilla. Tal como se desarrolla a lo largo de este estudio, encontrar una solución viable con todas las restricciones impuestas sobre la red redujeron de manera considerable el espacio de soluciones posibles desde un inicio. Entre estas restricciones nos encontramos con el patrón de consumo de la red, que alcanza hasta un valor pico del 154% de la demanda media; tenemos además las limitaciones de los caudales de producción, como se explica en la sección 5.5 que, aunque se está excediendo la inyección en un 6,4% con respecto al caudal medio, este valor es muy pequeño si lo comparamos el valor que implica el consumo pico de la red. Nos encontramos también con los grandes desniveles en algunas zonas de la red, especialmente en la denominada zona Sur I, en donde se encontraron casos en las que en una misma línea se tiene una elevación de 5 y 63 msnm. Por último, la mala adecuación de las curvas de las bombas, ya que como se vio en la sección 4.5 las bombas como máximo pueden llegar a una altura de 61 mca. Es por ello, que sumando todas estas restricciones produjeron que no se pueda encontrar una solución que cumpla al cien por ciento. En base a todo lo anteriormente planteado se puede concluir lo siguiente:

- No se puede encontrar una solución que cumpla al cien por ciento con todas las restricciones, para este problema en concreto el conjunto de restricciones hace que el espacio de soluciones sea nulo. La mejor solución encontrada (Figura 5.1) cumple con todos los requerimientos de presión mínima en todos los nudos de consumo de la red, pero para alcanzarlos incumple con algunas de las restricciones del problema. En primer lugar, no se consigue maximizar el caudal aportado por el embalse del Roble ni tampoco por la estación de bombeo de Gaira. Por otro lado, el correcto funcionamiento de la red luego de la

sectorización implica la sobreexplotación del embalse de Toribio, pues se excede el caudal máximo que se puede extraer de él durante la estación seca para alimentar a toda la zona Centro y parte de los consumos de Sur I. No se puede solventar este problema debido a que la estación de bombeo de Gaira tampoco es capaz de abastecer por sí sola a la totalidad de los consumos de Sur I puesto que la bomba instalada no puede aportar la suficiente altura a aquellos nudos que poseen una mayor cota tal como se explicó en la sección 4.5.

- El principal problema de la red, como se explicó en la sección 5.5 es que no se puede extraer suficiente agua de la estación de bombeo de Gaira debido a que la mayor parte de los nudos de Sur I están a una cota muy elevada, esto conlleva a abastecer estos nudos mediante el embalse de Toribio lo que produce la sobreexplotación. Como se utiliza casi en su totalidad el agua aprovechable por El Roble, una solución para este problema consiste en cambiar las bombas de la estación de Gaira, dejando así que ésta se encargue de abastecer todo este sector quitando demanda al embalse de Toribio y por lo tanto evitando su sobreexplotación. Esta posible solución fue estudiada por Jesús Abellán (2016), en el presente estudio se optó por una solución distinta que consistió en estudiar la sectorización.
- Con las bombas que se tienen ahora, los límites de extracción y la orografía no se puede cumplir con los límites de presión máxima en hasta 15 nudos de la red. Siendo necesario que estos nudos tengan presiones elevadas para poder abastecer al resto de nudos de la red con al menos la presión mínima.
- Sectorizar utilizando el criterio ingenieril es clave para uniformizar las presiones de la red, con este método se prioriza sectorizar para uniformizar las presiones antes que para repartir uniformemente la demanda debido a las restricciones de presión y orografía que presenta la red. Esto se consiguió tras resolver casos de presiones elevadas mediante la instalación de válvulas reductoras de presión a la entrada de cada DMA. Ningún mecanismo de sectorización automática, incluyendo los algoritmos METIS, serían capaces de encontrar una solución que cumplan con estas las restricciones de presión.
- El éxito de la sectorización con METIS es que los pesos de los bordes sean razonables; si se utiliza como fronteras tuberías pequeñas se limita la capacidad de transporte, pero si se usan tuberías grandes puede cerrarse la red. Es decir, asignar un número muy grande como peso es decirle a METIS que esa tubería no cuenta. Una de las principales dificultades a la hora de trabajar con estos pesos fue que se trabajó con funciones de ponderación reales, pero METIS tiene la limitación de números enteros.
- La semejanza de la demanda busca que cada uno de los DMA abarque una demanda similar para poder garantizar de esta manera la uniformidad de las presiones en toda la ciudad, por lo tanto, para la red de Santa Marta se concluye que existe un número óptimo de sectores para tener un reparto uniforme de caudales. Esto se aprecia claramente en la Figura 5.3 en donde el número óptimo es de 18 DMAs. Aumentar más allá el número de DMAs implica que se incumpla con el criterio de uniformidad de demandas, criterio en el cual se encuentra desarrollado el presente estudio.



- En cuanto a la uniformidad de presiones de la red, se concluye que ésta mejora conforme aumenta la semejanza de la demanda. Cuando se sectoriza con el criterio ingenieril, la uniformidad mejora mucho (Figura 5.6), ya que se sectoriza para uniformizar las presiones antes que para repartir uniformemente la demanda debido a las restricciones de presión y orografía que presenta la red. En cambio, con METIS la uniformidad de presiones apenas varía debido a que METIS no utiliza a la presión como parámetro de optimización, esto sumado a que la red sectorizada con METIS es plana y sin apenas fluctuaciones de presión a lo largo del día.
- Finalmente, se puede concluir que la combinación de criterio ingenieril con algoritmos automáticos permite mejorar los resultados tanto a nivel cuantitativo en tema de uniformidad de presiones y caudales e incumplimiento de presiones máximas como en tiempo de computación.

## **6.2. Indicios de calidad**

Como indicio de calidad, los resultados obtenidos en este trabajo de fin de máster han sido aceptados como ponencia en el congreso *1<sup>st</sup> International WDSA / CCWI 2018 Joint Conference* a realizarse en Kingston, Ontario, Canadá entre el 23-25 de julio de 2018, cuyo resumen se muestra a continuación.

## EFFECT OF DIFFERENT CLUSTERING SCENARIOS ON DEMAND AND PRESSURE UNIFORMITY

Martínez-Solano, F.J.<sup>1</sup>, Iglesias-Rey, P.L.<sup>1</sup>, Abril-Orellana, A.O.<sup>1</sup>, Mora Meliá, D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dep. Hydraulic and Environmental Engineering, Univ. Politécnica de Valencia, Spain

<sup>2</sup> Dep. de Ingeniería y Gestión de la Construcción. Facultad de Ingeniería. Universidad de Talca, Chile.

<sup>1</sup>jmsolano@upv.es

### ABSTRACT

*Efficiency of water distribution networks is an increasingly important matter. Efficiency accounts for both energy and water resources, and water saving has become a main objective of the utilities. Clustering the network in district metering areas (DMA) has shown its usefulness in controlling water losses. For that reason, in the last edition of the WDSA held in Cartagena (Colombia) in 2016, the Scientific Committee proposed the Battle of Water Networks District Metering Areas (BWNDMA). The aim of the contest consisted on produce a segmentation of the network so that the demand was equally distributed among the clusters (DMAs) and the pressure was as uniform as possible inside them.*

*Some of the participants chose a solution with a small number of clusters, prioritizing economic aspects. Some other groups preferred to define more clusters to ensure a more uniform distribution of demands and pressure. All of them found that one of the problems in this contest was derived of its troubled orography. Furthermore, the restrictions related to water resources availability reduce the solution space. With these conditions, engineering judgment took advantage with respect to automatic clustering.*

*In this paper, a comparison of both strategies is made. The methodology presented selects the methodology depending on the hydraulic characteristics of the network. That is, the selection of the clustering method is based on the hydraulic complexity of the network. So, in the areas where the differences in elevation is not very high, an automatic graph partitioning algorithm based on METIS will be used. On the contrary, where the terrain is steep, or the network layout is rigid, engineering judgment needs to be applied to find segmentation solutions that accomplish the different constraints. Both methods are then compared using different parameters, such as the demand similarity among clusters, pressure uniformity inside them or capacity to accomplish with pressure limits.*

*This methodology is applied to the southern part of the E\_Town network [1]. Engineering judgment will use hydraulic relations to choose the geometry of the clusters and the most suitable places to close pipes or install valves and flowmeter. On the other hand, a graph partitioning algorithm will be used in the places where the hydraulic restrictions are no so severe. As a result, the relation between the number of clusters and the different criteria is obtained. This relation might be used as a decision support tool for the utilities in cases where the problem is highly constraint.*

**Keywords:** Water distribution systems, pressure management, partitioning

### References

- [1] BWNDMA Committee, "Battle of water networks DMAs (BWNDMA) — Problem description and rules," 2016.

## Capítulo 7:

# REFERENCIAS

---

- Alegre, H. et al., 2006. *Performance indicators for water supply services*, IWA Pub.
- Alhimiary, H.A.A. & Alshaily, R.H.S., 2007. Minimizing Leakage Rates In Water Distribution Networks Through Optimal Valves Settings. *World Environmental and Water Resources Congress 2007, Restoring Our Natural Habitat*, ASCE, pp.1–13.
- AVSA, A. de V., 2017. Sectorización. Available at: <https://www.aguasdevalencia.es/Grupo/Nuestro-trabajo/Tecnologías/Sectorización> [Accessed November 14, 2017].
- Campbell, E., 2013. *Propuesta Para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable*,
- Córdova, M. et al., 2016. Near-Surface Air Temperature Lapse Rate Over Complex Terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for Temperature Mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), pp.678–684.
- DANE, 2017. Resultados y Proyecciones de población del 2005. Available at: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion> [Accessed November 21, 2017].
- Farley, M. et al., 2008. *The Manager's Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses*. United States Agency for International Development (USAID), 110p. , pp.1–110.
- GIZ, (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH) et al., 2011. Guidelines for water loss reduction: A focus on pressure management. *Bonn: Eschborn*.
- Herrera Fernández, M.A., Pérez García, R. & Izquierdo Sebastián, J., 2011. *Improving*

O. Andrés Abril O.

*water network management by efficient division into supply clusters*. Universitat Politècnica de Valencia.

- Hunaidi, O. & Brothers, K., 2007. Optimum size of district metered areas. *Water Loss*.
- Izquierdo, J. et al., 2008. Sensitivity analysis to assess the relative importance of pipes in water distribution networks. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(1–2), pp.268–278.
- Karypis, G. & Kumar, V., 1998a. A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(1), pp.359–392.
- Karypis, G. & Kumar, V., 1998b. METIS A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs , Partitioning Meshes , and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices. *Manual*, pp.1–44.
- Karypis, G. & Kumar, V., 1998c. Multilevelk-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 48(1), pp.96–129.
- Kernighan, B.W. & Lin, S., 1970. An Efficient Heuristic Procedure for Partitioning Graphs. *Bell System Technical Journal*, 49(2), pp.291–307.
- Kingdom, B., Liemberger, R. & Marin, P., 2006. The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries - how the private sector can help : a look at performance-based service contracting. In *Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series*. pp. 1–52.
- Kleppen, M.H., 2011. Optimization of Small Urban Water Services in Developing Countries by Water Loss Management. Literature review with practical examples from Pacific Island countries.
- Laucelli, D.B. et al., 2016. Optimal Design of District Metering Areas. *Procedia Engineering*, 162, pp.403–410.
- Mays, L.W., 2000. *Water distribution systems handbook*, McGraw-Hill.
- Morrison, J., Tooms, S. & Rogers, D., 2007. District Metered Areas: Guidance Notes. *London: Water Loss Task Force. International Water Association (IWA)*.
- Di Nardo, A. et al., 2013. Water Network Protection from Intentional Contamination by Sectorization. *Water Resources Management*, 27(6), pp.1837–1850.
- Di Nardo, A. et al., 2014. Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), pp.620–629.
- Di Nardo, A. & Di Natale, M., 2011. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. *Engineering Optimization*, 43(2), pp.193–211.
- Di Nardo, A., Di Natale, M. & Santonastaso, Giovanni Venticinque, S., 2011. Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system. *Proceedings of CCWI 2011*, (September 2015), p.6.
- Pilcher, R. et al., 2007. Leak Location & Repair Guidance Notes.
- PROMOSAS, 2011. Informe Principal Sectorización Hidráulica. Servicios de Ingeniería, obras, bienes y servicios para un programa de gestión de pérdidas de agua.
- Saldarriaga, J., 2015. SOS: agua para Santa Marta. *Contacto*.

Sectorización Óptima de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de Santa Marta, Colombia Utilizando los Algoritmos METIS

- Saldarriaga, J.G., Naranjo, G. & Rothstein, E., 2008. Metodologías para la sectorización de redes existentes de distribución de agua potable.
- SAWUADB, T.S.A.W.U.N. and A.D.B., 2007. Data Book for Southeast Asian Water Utilities 2005.
- Technical Working Group on Waste Water, 1980. *Leakege Control Policy and Practice*,
- Thornton, J., Sturm, R. & Kunkel, G., 2008. Identifying Economic Interventions against Water Losses. *Water Loss Control, Second Edition*.
- Thornton, J., Sturm, R. & Kunkel, G.A., 2008. *Water loss control*, McGraw-Hill.
- Todini, E., 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), pp.115–122.
- Tzatchkov, V.G. & Alcocer-Yamanaka, V.H., 2011. *Implementación de algoritmos basados en la teoría de grafos en proyectos de sectorización e redes de agua potable*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Vegas, O.T., 2012. Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios. *Universidad Politécnica de Valencia*, (September 2012), p.163.
- Vegas Niño, O.T. et al., 2017. *Iniciación a la Programación con la Toolkit de Epanet v2.00.12 en un Entorno Windows*,
- Walski, T. et al., 2001. Establishing a System Submetering Project. In *American Water Works Association*.
- WWC, W.W.C., 2009. Istanbul Water Consensus for Local and Regional Authorities. In *Proceeding of the 5th World Water Forum*. In *Proceeding of the 5th World Water Forum. Istanbul. Istanbul: World Water Council*.