



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE  
AGUA POTABLE Y SU PUESTA EN PRÁCTICA EN LA RED DE  
CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA UNAM**

---

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA CIVIL**

**PRESENTA**

**OJEDA RAMÍREZ MARICELA**

**MAYO 2012**

**DIRIGIDA POR : M. I. CARLOS G. FRANCO DOMINGUEZ**

---

*Al buscar ocurre fácilmente que nuestros ojos  
sólo ven el objeto que perseguimos...*

*H. H. (Siddhartha)*

## AGRADECIMIENTOS

A mi papá, por haberme dado las herramientas y la confianza en mí misma para lograr siempre mis objetivos, escucharme y mostrarme la dirección correcta sosteniendo mis ideales.

A mi madre, por haberme dado los valores y el valor necesarios para lograr siempre más; por su ejemplo de esfuerzo incansable, trabajo, resistencia, disciplina, honestidad y orgullo.

Al Ing. Antonio Capella, por compartir conmigo su gran sapiencia y llevar de la mano mis objetivos, ser siempre un apoyo invaluable y mostrarme que la solución de los problemas no va más allá de lo simple, si está bien hecho.

A mi Director M.I. Carlos G. Franco Domínguez, quien desde el principio me apoyó con interés y ánimo, dispuesto a escuchar y compartir.

A todos mis amigos, especialmente Luis Antonio Mata e Iván Orea quienes me acompañaron en mi travesía, me sostuvieron cuando mis fuerzas flaquearon, me enseñaron el más profundo valor de las palabras, las acciones, el compromiso y, sobre todo, lo poderoso de un abrazo en el momento adecuado.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería, que marcaron no sólo mi estancia en la carrera sino en mi desarrollo profesional desde entonces y para siempre, especialmente al Dr. José Luis Camba y Castañeda, Dr. Agustín Demeneghi Colina, M. I. Margarita Puebla Cadena, M. I. Guillermo Mancilla Urrea, Dr. Mauro Niño Lázaro, M. I. Victor M. Mahbub Arelle y M. I. E. Samuel Dahlhaus Parkman.

A mis compañeros Daniel Rocha, Luis A. Dávila, Fernando Reyes, J. Miguel Segundo.  
Por las más grandes muestras de compañerismo y trabajo en equipo, por creer en mí  
y apoyarme en mis planes y proyectos. Por su impulso y motivación constantes. Por  
llenar de risas mis mejores y peores días y ser más que sólo compañeros de trabajo,  
enseñándome que también hay que ser humanos.

A la fuerza de trabajo, Juan Ramón Moreno, Pablo Mújica y el personal de la red de  
agua de la UNAM, por trabajar conmigo y darle cuerpo a este trabajo. Por ayudarme  
a realizar mis planes, poniendo empeño y corazón al trabajo.

Al Dr. Rafael Val Segura, al Dr. Fernando González Villarreal, y  
fundamentalmente al Instituto de Ingeniería, que me dieron la  
oportunidad de desempeñarme profesionalmente en el campo que más  
me agrada y me llevaron a superar retos día con día.

*Las únicas cosas que nos llevamos de esta vida son las que hemos regalado*

*I. Dinessen (El festín...)*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	2
1.1. Panorama general del problema del abastecimiento de agua potable .....	2
1.2. Las pérdidas en las redes.....	5
1.3. Objetivos generales del trabajo escrito .....	6
CAPÍTULO 2. EL PROBLEMA DE LAS FUGAS.....	7
2.1. Clasificación de las fugas.....	7
2.2. Factores y causas comunes de las fugas.....	9
2.3. Relación entre la presión en la red y las fugas .....	11
2.4. Efecto de las prácticas de operación en las fugas.....	13
2.5. El destino de las fugas.....	16
CAPÍTULO 3. MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LAS REDES DE AGUA POTABLE .....	18
3.1. Elaboración de un diagnóstico.....	18
3.2. Estrategias para la reducción de pérdidas .....	25
CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA .....	53
4.1. Estimación de pérdidas.....	53
4.2. Programas piloto.....	54
4.3. Estrategias exitosas .....	54
4.4. Resultados de la Subsectorización (con la integración de las estrategias).....	93
4.5. Perspectivas de los programas implementados .....	106
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	107
5.1. Conclusiones .....	107
5.2. Recomendaciones.....	109
FUENTES .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pérdidas de agua en diferentes países ( <i>Fuente: European Environmental Agency</i> ) .....	5
Figura 2. Fisuras en tuberías .....	8
Figura 3. Orificios en tuberías.....	8
Figura 4. Puntos de falla típicos en accesorios (puntos de unión) .....	8
Figura 5. Partes de una válvula y puntos de falla típicos (rojo).....	9
Figura 6. Resultados de la modelación y experimentación física del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula en tubo simple y en serie(1 PSI=07kg/cm <sup>2</sup> ) .....	15
Figura 7. Resultados de la modelación y experimentación del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula en tubo simple y en paralelo.....	15
Figura 8. Resultados de la modelación y experimentación del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula de red cerrada calibrada.....	15
Figura 9. Disposición de las tuberías de agua potable y drenaje determinados por los lineamientos .....	17
Figura 10. Relación costo beneficio ideal en los programas de control.....	20
Figura 11. Instalación y puesta en marcha del sensor multifunción .....	29
Figura 12. Determinación de la relación beneficio/costo en diferentes horizontes de tiempo.....	31
Figura 13. Intrusión de agua limpia a tubería de drenaje ( <i>fuente: Teasa</i> ) .....	39
Figura 14. Elementos que influyen en el desempeño de una organización.....	42
Figura 15. Políticas de acción basados en el UARL para la recuperación de caudales .....	43
<b>Figura 16.</b> Ejemplo de gráfica de control para la evaluación de diversos aspectos.....	44
Figura 17. Riesgo de rotura de las tuberías por su edad, influido por factores que provocan fugas .....	50
Figura 18. Evaluación de inversión en acciones emprendidas en la red de Budapest.....	51
Figura 19. Balance hidráulico y comercial de la red de la ciudad de Ginebra (2005).....	51
Figura 20. Fórmula implementada en la red de la ciudad de Ginebra.....	52
Figura 21. Fuentes de abastecimiento y estructuras de almacenamiento en Ciudad Universitaria (y sectores hidráulicos).....	53
Figura 22. Fugas visibles reportadas por año y su tendencia ( <i>m8: datos hasta agosto</i> ) .....	58
Figura 23. Incidencia de fugas por su origen .....	60
Figura 24. Incidencia de fugas por su tipo.....	60
Figura 25. Fuga en PVC por asentamiento del terreno y su reparación en 2008 .....	67
Figura 26. Fuga en hierro fundido de 12", tramo reparado por falla típica 5 veces en 3 años y su reparación (2008-2011) .....	67
Figura 27. Fugas por picadura de tubo de acero galvanizado durante 2008. Facultad de Derecho (a), Biblioteca Central (b), Facultad de Odontología (c) y Torre de Humanidades (d) (Zona Central) .....	68
Figura 28. Fugas por fisura de tubos plásticos y de acero galvanizado de 2009 y 2010. Centro de Ciencias de la Atmósfera (a), Facultad de Economía (b), Registro de Aspirantes (c) e Institutos de Investigación en Humanidades (d). .....	69
Figura 29. Sección de la red de drenaje de CU marcada con la inspección realizada.....	73

Figura 30. Pozo de visita sobre el Circuito Escolar a la Altura de la Facultad de Medicina (emisor 1).....	74
Figura 31. Pozo de visita en el estacionamiento de profesores de la Facultad de Economía. Descarga desde Auditorio CEDEM .....	74
Figura 32. Pozo de visita de descarga directa del auditorio CEDEM. Sanitarios al fondo del lado derecho.....	75
Figura 33. Pozo de visita en el estacionamiento de profesores de la Facultad de Economía. Flujo notablemente menor tras la reparación de la fuga de aproximadamente 3 lps. ....	75
Figura 34. Geófono completo y su unidad (derecha) .....	76
Figura 35. Correlador completo y su unidad (derecha) .....	76
Figura 36. Capacitación efectuada por Gutermann a personal de PUMAGUA .....	77
Figura 37. Subsectores separados en CU.....	81
Figura 38. Promedio de presión matutina (10 a 12 h) sectores 1, 2 y 3.....	91
Figura 39. Promedio de presión vespertina (17 a 19 h) sectores 1, 2 y 3.....	92
<b>Figura 40. Subsectorización del sector hidráulico 3.....</b>	<b>94</b>
Figura 41. Gráfico del caudal de fuga medido en el sector hidráulico 3 .....	95
Figura 42. Medición de caudal nocturno en principio de semestre en el subsector C .....	97
Figura 43. Medición de caudal nocturno en mitad de semestre del subsector C .....	97
Figura 44. Imagen de la correlación SS-C19, marcando una fuga fuera de rango (números negativos).....	100
Figura 45. Imagen de la correlación SS-C20, coincidente con las correlaciones SS-C21 y SS-C22, marcando una fuga a 8.3m del radio B, ubicado en el registro 149 .....	100
Figura 46. Sondeo en el registro 150 y observación del flujo en el drenaje .....	101
Figura 47. Verificación de flujo claro en el drenaje y audición de la posible caída en fuente cercana al pozo de visita .....	102
Figura 48. Correlación del tramo entre el R150 y R149 y confirmación de la fuga.....	102
Figura 49. Descubrimiento y reparación de la fuga.....	103
Figura 50. Medición de caudal nocturno de confirmación en principio de semestre del subsector C.....	104
Figura 51. Requerimientos para la sostenibilidad de un sistema .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros para cálculo de UARL (Unavoidable Anual Real Loses).....	20
Tabla 2. Componentes para el cálculo del UARL.....	21
Tabla 3. Tabla comparativa del ILI (Infrastructure Leakage Index) .....	22
Tabla 4. Ejemplo de evaluación de estrategias aplicadas para la recuperación de caudales.....	47
Tabla 5. Diagnóstico de la red en Chipre.....	49
Tabla 6. Actividades realizadas .....	55
Tabla 7. Extracciones anuales de cada pozo .....	56
Tabla 8. Estimación del consumo de agua por tipo de usuario en Ciudad Universitaria.....	56
Tabla 9. Estimación de pérdidas de agua anuales en Ciudad Universitaria.....	56
Tabla 10. Mediciones puntuales realizadas de 2008 a 2010 en los sectores hidráulicos.....	57
Tabla 11. Incidencia de fugas por sector hidráulico.....	58
Tabla 12. Incidencia anual de fugas de 2007 a 2010 por su origen .....	59
Tabla 13. Incidencia anual de fugas por su tipo .....	59
Tabla 14. Índice de pérdidas por sector hidráulico .....	61
Tabla 15. Asociación de causas y origen de las fugas a la edad de la tubería .....	62
Tabla 16. Cálculo de indicadores de desempeño de la red en Ciudad Universitaria.....	65
Tabla 17. Caracterización de la operación del geófono. Capacidad de operación de un geófono bajo condiciones típicas (estudio realizado con equipo modelo AS3 marca Gutermann).....	78
Tabla 18. Fugas por km de tubería por sector hidráulico. ....	79
Tabla 19. Presiones promedio y presiones objetivo en el campus.....	87
Tabla 20. Datos básicos de los subsectores del sector 3 .....	95
Tabla 21. Fugas en los subsectores del sector hidráulico 3.....	96
Tabla 22. Resultados de los sondeos realizados en el subsector C.....	98
Tabla 23. Resultados de la correlaciones realizadas en el subsector C .....	99
Tabla 24. Resultados de la correlaciones realizadas en el subsector C (continuación).....	99
Tabla 25. Confirmación de las fugas localizadas en el subsector C .....	101
Tabla 26. Fugas detectadas en los subsectores trabajados durante la campaña de detección de fugas .....	105

# INTRODUCCIÓN

El problema de las fugas es uno de los principales factores de afectación en la operación de las redes de agua potable. Las pérdidas en las redes llegan a representar hasta el 50% del agua suministrada a determinadas redes, con lo que el servicio de agua potable resulta deplorable.

Las mismas pérdidas promueven la práctica de los llamados “tandeos”, que no es otra cosa que la intermitencia del servicio, provocando severos problemas de salud pública y otros problemas sociales, incluso en el extremo de los casos, inestabilidad política.

Es por eso que la atención al problema de las fugas se convierte en el aspecto fundamental de este trabajo, exponiendo en el primer capítulo un panorama en cuestión del abastecimiento de agua potable alrededor del mundo y las implicaciones de las fugas en el abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México, así como abordar una breve explicación de lo que son las fugas y cómo se clasifican éstas. Tras esta abstracción, el segundo capítulo ahonda en la clasificación de las fugas y los factores que inciden en la aparición de las mismas, poniendo especial énfasis en la relación entre la presión en las redes y las fugas en ellas.

El capítulo tres explica algunas de las estrategias, los equipos y métodos que existen para la detección y control de las fugas, así como para la gestión del tema. De todos estos, se seleccionaron los más adecuados para Ciudad Universitaria, considerando las características de la red, los requerimientos y los recursos disponibles para lograr integrar en la medida de lo posible los equipos y métodos más avanzados para lograr la recuperación de caudales.

Una vez que se tuvo conocimiento de la tecnología e información disponible, fue fundamental conocer también de manera empírica el funcionamiento de los equipos y los resultados particulares de los métodos implementados, ya que esto llevó a la integración de una estrategia que, apoyada en la experiencia adquirida y el respaldo de expertos, permitió observar resultados favorables en la recuperación de importantes cantidades de agua. Todo esto se plasma en el capítulo cuatro.

Ya en el capítulo cinco se exponen las conclusiones del trabajo realizado y así mismo, se procura encontrar las razones por las que no se pudieron alcanzar los resultados esperados a pesar de los éxitos logrados. Así mismo, se profundiza en la importancia de cohesionar la gestión con la técnica, encontrando las oportunidades de acción, de manera que se pueda lograr la sostenibilidad del programa y así la ambicionada recuperación de caudales.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Panorama general del problema del abastecimiento de agua potable

El problema del abastecimiento<sup>1</sup> del agua potable en las ciudades es cada vez más agudo, la disponibilidad de agua per cápita en el mundo disminuye sin que se pueda evitar mediante acciones reales que disminuyan el impacto en la sociedad, su salud y bienestar.

La sobre explotación de los mantos acuíferos condena severamente la sostenibilidad de los ecosistemas y aún así extraer más agua del subsuelo no resuelve el problema del abastecimiento de agua. Si a esto se suma la contaminación de los cuerpos de agua superficial, el problema se agrava aún más.

Se sabe que de toda el agua en el mundo, tan sólo el 2.5% no es salada, que de ésta sólo la tercera parte se encuentra en cuerpos de agua y precipitaciones y, aunque el 80% es relativamente accesible, tres cuartas partes de esta agua se da en tormentas difícilmente aprovechables, lo cual deja totalmente disponible para el ser humano tan sólo el 0.16% del agua en el mundo.

Sumado a esto, se ve con frecuencia no sólo en nuestro país si no también alrededor del mundo, que pequeñas poblaciones se asientan en lugares de alto riesgo hidrológico<sup>2</sup> o donde el agua escasea, aseverando la situación de disponibilidad de agua; por lo mencionado anteriormente, se estima que una quinta parte de la población mundial no tiene acceso al agua potable, ya que resulta sumamente complicado abastecer del servicio a pequeñas poblaciones alejadas o de alto riesgo, principalmente por el bajo beneficio que se obtiene con respecto a la inversión que requiere.

La disponibilidad per cápita en diferentes regiones del mundo, supera por mucho la disponibilidad de agua en México; esto contrasta con la condición de México en cuanto a la cantidad de agua que posee y su posición geográfica. Por ejemplo, en Europa es de 4,500 m<sup>3</sup>/año, En Estados Unidos 9,847 m<sup>3</sup>/año, en Canadá es de 87,255 m<sup>3</sup>/año, en África es de 1,007 m<sup>3</sup>/año y en México se estima en 4,263 m<sup>3</sup>/año<sup>3</sup>. El territorio nacional está dividido por la CONAGUA en 13 regiones administrativas; en 4 de éstas, la disponibilidad de agua per cápita está por debajo de los 1,900 m<sup>3</sup>/año, pero particularmente en la región 13, que corresponde al Valle de México y alrededores, es de tan sólo 165 m<sup>3</sup>/año. Se considera que una región se encuentra en estado de estrés hídrico (grado severo de presión hídrica) si su disponibilidad de agua per cápita es menor a 1,700 m<sup>3</sup>/año. El grado de presión hídrica (uso del agua con respecto a la disponibilidad) supera el 40% en 9 de las 13 regiones administrativas, lo cual pone en seria desventaja a más de la mitad del país. En este contexto, México genera más del 80% del PIB en regiones donde se concentra casi el 80% de la población, pero donde escurre menos del 30% del agua del país, lo cual compromete seriamente la economía nacional. A este efecto se debe que la mitad del agua de acuíferos en el noroeste del país provenga de sobreexplotación.

---

<sup>1</sup> Dotación de agua a la población en cantidad y calidad adecuada por medio de sistemas tuberías y otros elementos.

<sup>2</sup> Riesgo al que está sujeta una determinada zona en la que por su posición geográfica es susceptible de sufrir la presentación de desastres naturales asociados al agua dentro de su ciclo hidrológico.

<sup>3</sup> Datos disponibles hasta 2010. Estadísticas del agua en México, CONAGUA 2011

La cobertura de agua potable en México es del 88.2%, esto quiere decir que casi 100 millones de habitantes son abastecidos por tuberías hasta su población, sin embargo, no necesariamente contempla ni la calidad de ese servicio, ni la continuidad ni la accesibilidad desde el hogar de las familias. En la mayoría de estas redes, se estima que se pierde entre el 35 y el 40% de agua en fugas.

Parte la complicación de dar agua en cantidad y calidad suficiente es la ineficiencia de los sistemas de agua potable, que con frecuencia no cumplen con las características necesarias para proporcionar un servicio adecuado. Por otro lado, las inversiones que se realizan en el sector agua, particularmente en México, no están debidamente dirigidos a proyectos productivos que mejoren la situación del sistema; esto aunado a las leyes y regulaciones actuales que no dan lugar a la competencia entre organismos operadores y a la inversión privada que aumente la competitividad y así la eficiencia de los servicios de agua potable y saneamiento en el país

Se ha observado que los subsidios promueven una cultura de desperdicio, además de que generan poca remuneración económica, lo cual dificulta la implementación de tecnologías de conservación y re-utilización del agua, así como la investigación en las mismas. Sin embargo, la política niega la oportunidad de cambiar este régimen en la administración, principalmente por los costos políticos que estas acciones tendrían. Además, la administración del agua depende casi totalmente de los cambios gubernamentales que se dan periódicamente, y esto provoca falta de capacitación y de compromiso, que a su vez genera un bajo desarrollo institucional para dar paso a un cambio en las estrategias de mejoramiento de los servicios de agua.

En México, particularmente la mayor parte de los organismos prestadores del servicio de agua potable son públicos, toda vez que sólo tres organismos son privados y, en evaluaciones de desempeño, éstos mismos son 3 de los 6 mejor calificados, tanto en aspectos técnicos como administrativos. El actuar de los organismos operadores lamentablemente depende de los criterios políticos aplicables en un determinado momento, por lo que cualquier acción emprendida, como la sectorización en las delegaciones del Distrito Federal, está sujeta a tiempos políticos en constante cambio. Esto no promueve la mejora institucional de los organismos operadores que podría optimizar la administración del recurso, así como la implementación adecuada de tarifas y la aplicación focalizada de los subsidios, determinados por un consejo de administración lejos de criterios políticos. Curiosamente, los organismos más ineficientes son los que más subsidios solicitan y son además generalizados.

Mientras no haya empresas de administración en materia de agua autónomas, profesionales, con personal permanente, autosuficientes, eficientes, transparentes, incluyentes y reguladas, no se acabará con los problemas de abastecimiento de agua en todos los sentidos.

Se sabe que la salud financiera de los organismos operadores es fundamental para la inversión en mantenimiento y operación; en la Ciudad de México, la tarifa promedio de referencia es de \$12, con lo que el potencial de recaudación es aproximadamente de 12 mil mdp al año. Este monto sería suficiente para operación, mantenimiento y tratamiento, sin embargo, la recaudación en 2010 era de 4 mil mdp (déficit del 60%), lo que evidencia problemas administrativos severos; el costo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) es

de 9 mil mdp al año, lo cual implica subsidios a la gestión del agua y una consecuente incapacidad de inversión<sup>4</sup>.

En el mundo se invierte entre el 2 y el 3% del PIB de cada país en infraestructura hidráulica, sin embargo las pérdidas de agua por fugas se estiman entre 15 y 50%, a pesar de las fuertes inversiones que resultan insuficientes. En México, se construyó el Plan Hídrico Nacional, dentro del marco del Plan Nacional de Desarrollo, con horizonte al 2025. En este, se planeó invertir de 2001 a 2006 215 mil mdp y otros 500 mil mdp entre 2007 y 2025; en total se han invertido de 2001 a la fecha más de 231 mil mdp. En términos del PIB, se ha invertido menos del 0.2%, muy por debajo del promedio mundial<sup>5</sup>.

De acuerdo a lo anterior, la situación de la Ciudad de México en cuanto a la presión sobre el recurso no es nada positiva. La cuenca del Valle de México es cerrada, de manera que en teoría, depende de la precipitación. Se sabe que anteriormente la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) era un sistema lagunario que se fue desecando tanto por el drenaje del agua a las afueras de la cuenca como por el abastecimiento a la población que no ha dejado de crecer, salvo en un periodo de una década. De modo que, a raíz del alto crecimiento poblacional, se ha tenido la necesidad de explotar los mantos e incluso importar agua de otras cuencas. La sobreexplotación de los mantos acuíferos ha provocado serios hundimientos diferenciales en la ciudad, que van de los 10 a los 30 cm por año, lo cual daña a las tuberías rígidas instaladas en el suelo, que además datan de al menos 30 años atrás y en algunos casos superan los 50 años. Las tuberías dañadas no son únicamente de agua potable (provocando fugas) sino también de drenaje (provocando contaminación del subsuelo e intrusión de agua de fugas). Al estar tan terriblemente dañada la red de agua potable, promueve la práctica de los llamados “tandeos”, que continúan dañando a la red de por sí deteriorada, convirtiendo la situación en un círculo vicioso. La falta de vigilancia hace que continúe la sobreexplotación de los mantos acuíferos y así persista el problema de las fugas y con esto la dificultad en el abastecimiento.

4

En la ZMVM se extraen 59.5 m<sup>3</sup>/s del acuífero y se obtienen 22.4 m<sup>3</sup>/s de fuentes superficiales, incluyendo el sistema Lerma-Cutzamala. La cantidad de agua que requiere la ciudad es de 64.7 m<sup>3</sup>/s.

Por otro lado, se estima que en la Ciudad de México se pierde aproximadamente el **40%** del agua en el sistema en fugas y tomas clandestinas (datos gubernamentales), esto significa que de los 64.7m<sup>3</sup>/s, se pierden 25.88m<sup>3</sup>/s, esto es más de lo que se extrae del sistema Lerma-Cutzamala. Además, el problema de los hundimientos no se detendrá, ya que algunas fuentes señalan que se extraen del acuífero aproximadamente 45 m<sup>3</sup>/s y se recargan sólo 21 m<sup>3</sup>/s. Se sabe que el volumen de sobreexplotación del sistema Lerma-Cutzamala es de aproximadamente 30 m<sup>3</sup>/s, lo cual pone al sistema en una condición severa que compromete el recurso a largo plazo.

En un caso hipotético, si se eliminaran las fugas y desperdicios, se podrían dejar de extraer hasta 25 m<sup>3</sup>/s, eliminando el déficit en la recarga de acuíferos, frenando así los hundimientos y obteniendo agua potable de manera sustentable. Sin embargo, sabemos que es imposible eliminar el 100% de las fugas, no obstante, mediante la correcta implementación de modernas herramientas y estrategias adecuadas, se puede lograr un

---

<sup>4</sup> Comentarios del Ing. Gabriel Quadri en espacio informativo de contenido. Gestión del agua en la Ciudad de México. Consejo Consultivo del Agua.

<sup>5</sup> Fuentes internacionales, mismo documento, número 11

nivel mínimo aceptable de fugas que permita recuperar a largo plazo nuestras fuentes de agua, garantizando así la sostenibilidad de la ciudad por un largo tiempo.

En otras partes del mundo, la situación en cuanto a las pérdidas no dista mucho de la de México; en ciudades de Asia y Latinoamérica las pérdidas ascienden al 42% de las extracciones, en África representan el 39% y en Norteamérica alcanzan el 15% (Fig. 1).

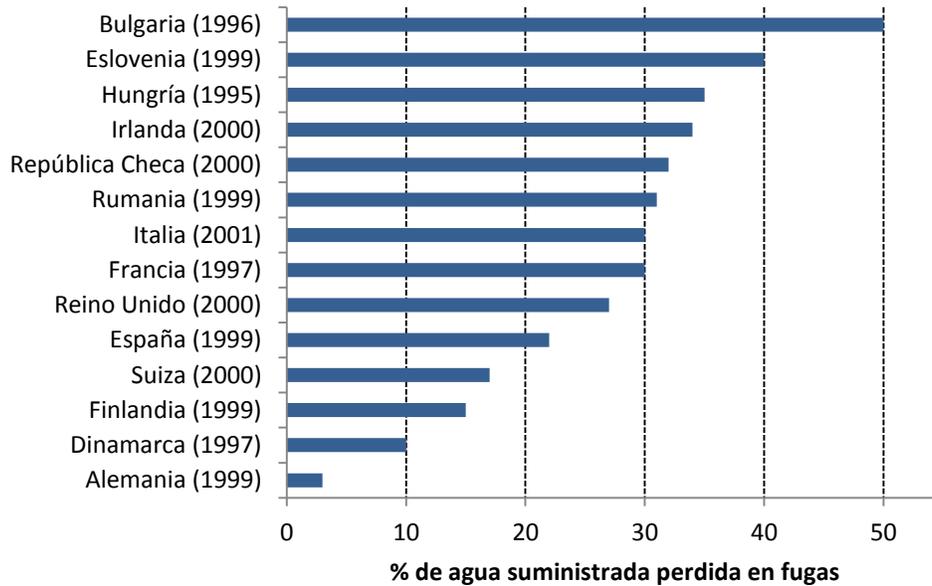


Figura 1. Pérdidas de agua en diferentes países (Fuente: European Environmental Agency)

Particularmente en algunas ciudades del mundo, de acuerdo a un benchmarking sobre niveles de fugas indica que en Tokio se tiene un 3.5% de fugas, Los Ángeles 9%, Moscú 10%, París un 20%, Londres 26% y dos ciudades mexicanas, Tijuana y Monterrey reportan un 19% y 28% de fugas, respectivamente; si bien estas cifras son altas en cuanto a niveles mundiales, resultan bajas con respecto a la media nacional.

## 1.2. Las pérdidas en las redes

Una manera de medir la eficiencia en los sistemas operadores de agua es a través de sus finanzas, de acuerdo a lo que el organismo proporciona y lo que cobra. El abastecimiento (A) es el consumo (C) más las pérdidas (P), las cuales son inversiones que el organismo no recupera y que, por ende, reducen la eficiencia del sistema.

$$A = C + P \quad (\text{ec. 1})$$

Las pérdidas se clasifican en pérdidas físicas y pérdidas comerciales; éstas últimas se conocen como volumen no facturado y son todos aquellos consumos que no son cobrados por el sistema comercial, como tomas de las que se conoce su existencia pero no se sabe cuánto consumen. Las pérdidas físicas tampoco son remuneradas, y se trata de las fugas, tomas clandestinas, tomas dobles, entre otras.

Las fugas son aberturas en cualquier punto de la red de las que no se tiene control y con frecuencia se desconoce su ubicación y a veces su existencia. Estas representan aproximadamente el **95%** de las pérdidas totales, mientras que el resto de los factores representan tan sólo el **5%** del volumen no facturado.

Es así como las fugas se hacen objeto de primera importancia en la formulación de estrategias para el aumento de la eficiencia en los sistemas de agua potable.

En este sentido, al perder menos agua en las redes de agua potable, las fuentes de abastecimiento podrían recuperar su capacidad y así la disponibilidad de agua para la población se verá notablemente aumentada, con lo que la sustentabilidad de las ciudades no estaría comprometida como lo está hoy en día.

### **1.3. Objetivos generales del trabajo escrito**

Esta tesis tiene el objeto de presentar la situación de las fugas en las redes de agua potable como principal factor de descontrol de las mismas y como el problema fundamental que genera desabasto. También describe algunos de los métodos que se practican alrededor del mundo para contribuir a dar solución al severo problema de las fugas, así como equipos de tecnología de punta que existen y que apoyan los métodos y para la reducción de pérdidas.

Como objetivo central, esta tesis describirá la utilización de algunos de los elementos explicados aplicados en la reducción de pérdidas en Ciudad Universitaria de la UNAM, con los que se pone a la vanguardia el manejo del agua en este campus. Así mismo, se da una perspectiva de los programas implementados en el campus y se ofrecen recomendaciones de corto y largo plazo para dar sostenibilidad a los programas y así aumentar la eficiencia del sistema.

## CAPÍTULO 2. EL PROBLEMA DE LAS FUGAS

### 2.1. Clasificación de las fugas

Las pérdidas son básicamente agua entregada no facturada, y se clasifican primordialmente como físicas y comerciales. Dentro del balance hidráulico, las pérdidas son separadas como aparentes y reales. Las primeras corresponden a las pérdidas dadas por la sub medición<sup>6</sup> y por las conexiones no autorizadas y se consideran pérdidas comerciales, mientras que las segundas (reales) que se consideran pérdidas físicas, y pueden ser intra domiciliarias o en la red principal de distribución; corresponden a las fugas visibles reportadas y no reportadas, a las fugas no visibles o de fondo y a los desperdicios no controlados, como pueden ser sobre niveles en cisternas, muebles de baño en mal estado, etc. Dentro de esta clasificación, las fugas más importantes son las visibles no reportadas y las no visibles en la red principal.

#### 2.1.1. Fugas superficiales

Las fugas que se manifiestan en la superficie, ya sea a través de las grietas en el piso firme o la humedad en terreno vegetal, se denotan como superficiales o visibles. Estas pueden ser reportadas o no reportadas; por lo general las que son reportadas se atienden en un lapso de tiempo no muy largo; son habitualmente de gran caudal y corta duración. Sin embargo, las no reportadas, a pesar de estar en la superficie o ser visibles no son reportadas ya que están en sitios de bajo tránsito o difícil acceso, por lo que no son observadas con facilidad; su caudal y duración dependen de los programas de control de fugas, ya que son fugas que, conocidas o no, no son atendidas y con el tiempo pueden crecer. Estas fugas son detectables y se localizan fácilmente mediante inspecciones simples.

#### 2.1.2. Fugas de fondo

Con frecuencia, este tipo de fugas de agua no se manifiestan en la superficie, incluso los usuarios no dejan de recibir el servicio, ya que aún con fugas la presión es suficiente para abastecer al usuario por lo que éste no se percató del desperdicio. El agua busca salida por el camino de menor resistencia, llegando incluso hasta el drenaje. De este modo, el agua de las fugas puede afectar las cimentaciones de las vialidades, edificios y casas. En innumerables ocasiones se han observado fugas que durante un largo tiempo han estado socavando la base de las estructuras, provocando el eventual colapso de las mismas, trayendo consigo grandes pérdidas económicas e incluso humanas.

Generalmente son de bajo caudal y larga duración, sólo de manera eventual las fugas de fondo pueden representar grandes caudales, pero en lo general, éstas terminan por manifestarse en la superficie tiempo después.

#### 2.1.3. Clasificación de las fugas por sus características físicas

Las fugas en sí mismas se pueden clasificar en primera instancia de acuerdo al punto en el que se presentan, es decir, tuberías o accesorios. De esta manera, su clasificación depende de su aspecto físico.

---

<sup>6</sup> Caudal no medido por inexactitud en los medidores

En las tuberías rígidas, ya sean de acero o pvc, se presentan 3 tipos de fallas fundamentalmente: fisura, picadura y rotura.

Las fisuras se clasifican en longitudinales, transversales y combinadas, de acuerdo al sentido de la fractura con respecto al tubo (Fig. 2).

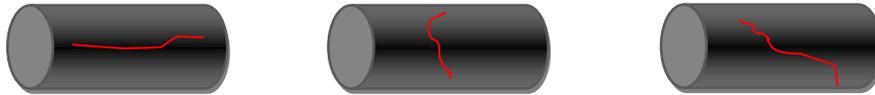


Figura 2. Fisuras en tuberías

Las picaduras son simplemente perforaciones en el tubo, causadas por corrosión del material o por un objeto duro que impacte al tubo (Fig. 3).



Figura 3. Orificios en tuberías

Las roturas, evidentemente, son el colapso de la tubería, dado generalmente por fuerzas de tensión o torsión.

En las tuberías flexibles las fallas más típicas son las fisuras de la tubería.

Por otro lado, existen las fallas que se dan en los accesorios de la tubería, como codos, tees, crucetas, tuercas unión, válvulas, etc. con la tubería (Fig. 4). Las fallas típicas en estos elementos se dan principalmente en la unión, ya sea soldable, roscada o bridada; puede ser por de desgaste del empaque, cristalización de la soldadura o algún elemento mecánico que afecte la estabilidad del arreglo. Se considera que la falla total de una unión térmica es una rotura del tubo.



Figura 4. Puntos de falla típicos en accesorios (puntos de unión)

Por otro lado, es muy común la falla en las válvulas, en lo que respecta a sus partes mecánicas. Eventualmente se da la fatiga o desgaste de los discos al interior de la válvula, que son los que restringen el paso del agua. (Fig. 6)



Figura 5. Partes de una válvula y puntos de falla típicos (rojo)

## 2.2. Factores y causas comunes de las fugas

### 2.2.1. Causas que inciden en la frecuencia de aparición o la cantidad de fugas

Diversos estudios alrededor del mundo, principalmente realizados por organizaciones no gubernamentales, mencionan las siguientes como las causas principales que afeoran el problema de las fugas. (Ver referencias internacionales)

- Discontinuidad en el suministro
- Longitud de las tuberías
- Número de conexiones de servicio
- Localización de las conexiones de servicio
- Inadecuado manejo de la presión
- El material y edad de la tubería
- La calidad en las prácticas constructivas
- La calidad del material de la tubería

La discontinuidad en el servicio provocará la fatiga de las tuberías que posteriormente fallarán a causa del daño por la operación. En lo que respecta a la longitud de las tuberías y la densidad de conexiones (número por kilómetro), el tener mayor cantidad de instalaciones inevitablemente aumenta la probabilidad de tener fugas en ellas. Por supuesto tienen gran influencia las condiciones en las que se encuentra localizada cada conexión y el mantenimiento al que sean sujetas de manera habitual.

El manejo de la presión es un factor fundamental para el control de las fugas, como se ha mencionado anteriormente, de manera que el manejo inadecuado de la misma puede provocar severos problemas en las redes.

Un ejemplo que muestra la repercusión de la calidad en la construcción es el de la tubería de polietileno de alta densidad, ya que tiene una técnica de instalación que requiere de un cuidadoso proceso de unión por termo fusión; si no es instalado adecuadamente, la unión puede cristalizarse y eventualmente fallar.

Otro ejemplo es el de las tuberías de acero, este puede soldarse, acoplarse con uniones roscadas o de sujeción. La junta soldada suele fallar cuando el trabajo o la soldadura son de mala calidad, o simplemente por el paso del tiempo; los cordones de soldadura con frecuencia presentan orificios por los que escapa el agua. Las uniones roscadas se llegan a dañar de la cuerda, mostrando desgaste en la misma y presentando filtraciones de agua a través de ellas. Las uniones de sujeción utilizan ligas (empaques flexibles) que con el tiempo se gastan y se rompen, con lo que dan paso al agua.

La antigüedad de la instalación es otro de los factores mencionados, ya que cuando los materiales superan su vida útil, es fundamental darles un considerado mantenimiento correctivo para prolongar su utilidad mientras se realiza el cambio.

### 2.2.2. Factores principales que inciden en la aparición de fugas

- (a) *Impacto*. Ya sea accidental o deliberado, en las tuberías provoca desde las picaduras hasta la rotura total del tubo, mientras que en los accesorios provoca su falla o la rotura de su unión con la tubería.
- (b) *Corrosión e incrustaciones*. Esta condición depende del tipo de suelo en el que se encuentre la tubería y las condiciones a las que esté expuesta la instalación, tales como humedad, salitre, cargas eléctricas, entre otras; esto para el exterior del tubo, mientras que para el interior, influye de manera determinante la calidad del agua.
- (c) *Fluctuación de la presión*. En algunas redes, las fluctuaciones de presión, producto del consumo o el arranque y paro de bombas, así como los llamados “tandeos”, son de magnitud importante, de manera tal que llegan a fatigar a la tubería y disminuir su vida útil, provocando fisuras, picaduras y hasta el colapso de la tubería, mientras que en los elementos provoca las fallas en sus partes mecánicas por fatiga.
- (d) *La calidad del material*. Algunos materiales no cumplen con las normas mínimas de resistencia y durabilidad, por lo que los factores a los que está normalmente expuesta la tubería y accesorios, incluyendo el procedimiento constructivo, pueden dañarlos con mayor facilidad que si estos cumplieran con la calidad requerida.

- (e) *Detalles en el proceso constructivo.* Con frecuencia el personal que realiza las instalaciones no cuenta con la preparación adecuada, por lo que comete errores o deja “vicios ocultos”, que posteriormente provocan fallas en la instalación, aunque ésta sea de reciente construcción.
- (f) *Asentamientos en el suelo.* Algunos tipos de suelo tienden a asentarse al menos un par de veces en un periodo de 10 a 30 años, lo cual generalmente no se prevé al momento del diseño, por lo que inevitablemente se presentan fugas si el material de la tubería es propenso a no resistir esfuerzos de tensión. Por otro lado, algunas construcciones se rellenan con material de composición irregular, por lo que deliberadamente existirán fugas por fuertes asentamientos, producto del acomodo y constante auto compactación del material.
- (g) *Actos de vandalismo.* Algunos materiales son sumamente atractivos para el público, por lo que al sustraer tramos de tubería o algunos accesorios, dejan el agua desperdiciándose hasta que alguien se percata de la situación. El tiempo en que llega a atenderse la situación pueden ser desde horas hasta algunos días, representando pérdidas de miles de metros cúbicos en poco tiempo.

Sin embargo, el efecto de las altas presiones en las redes es el factor fundamental que incide en la aparición de fugas, esta fundamental relación se describe en el apartado siguiente.

### 2.3. Relación entre la presión en la red y las fugas<sup>7</sup>

Diversos estudios publicados por la WLTf (water loss task force) de la International Water Association (IWA) indican la intrínseca relación que existe entre la presión en las redes de agua potable y las fugas en ella. Partiendo del hecho de que la presión y el gasto se relacionan de manera proporcional, el gasto que escapa por las fugas en la red también responde a este comportamiento.

Dichos estudios sostienen que la presión no sólo influye en el caudal que sale de las fugas sino también en la frecuencia en la aparición de las mismas.

La variación de fugas con las presiones puede ser tan significativa que su relación se puede representar con una función potencial. Las variaciones en la presión afectan notablemente el gasto de las fugas, con fines prácticos y como función de interpolación, esta relación se puede aproximar a una función potencial como se muestra a continuación.

$$Q_{fuga} = CH^x \quad (ec. 2)$$

$$C = AC_d * \sqrt{2g} \quad (ec. 3)$$

En donde  $Q_{fuga}$  es el gasto de las fugas,  $C$  una constante,  $H$  la carga hidráulica (presión en metros columna de agua),  $x$  un exponente que puede variar entre 0.5 y 2.5 dependiendo de la flexibilidad de los materiales de la red y los tipos de fuga en ella y  $g$  que es la aceleración de la gravedad. Con materiales flexibles, en las tuberías de distribución o en las acometidas, el valor de  $x$  puede llegar a ser de 2.5.

---

<sup>7</sup> Investigaciones de Lambert, ver referencia número 23

Tomando en cuenta que la velocidad a través de un orificio puede expresarse como:

$$v = C_d(2gH)^{0.5} \quad (\text{ec. 4})$$

Se considera que para cada una de las fugas, el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) puede cambiar dependiendo del régimen de flujo (laminar, turbulento, transición), ya que de esto depende el número de Reynolds, que implica la velocidad, viscosidad y el diámetro hidráulico.

El gasto que escapa por las fugas también depende del área del orificio y puede expresarse como sigue:

$$L = v \times A = C_d A(2gH)^{0.5} \quad (\text{ec. 5})$$

Sin embargo, se ha visto que el área varía con la presión y por supuesto el tiempo que está activa la fuga. Se ha probado que, al menos en PVC y PE, en las fisuras de una sola dimensión (longitudinal o transversal) su área varía en un orden de  $P^{1.0}$  y el gasto de las fugas de este tipo varía en  $P^{1.5}$ . Si la fisura es en dos dimensiones (combinada), el área varía en un rango de  $P^{2.0}$  -  $P^{2.5}$ .

Entonces, el gasto de las fugas varía en  $P^{N1}$ , donde  $N1$  es un número exponente que depende del tipo de fuga del que se trate y varía entre 0.5 y 2.5.

La WLTF ha realizado estudios en laboratorio el comportamiento de los agujeros en diferentes tuberías, encontrando que para tuberías metálicas las fallas por corrosión o fisuras en galvanizado y cobre principalmente, el valor de  $N1$  es de alrededor de 0.5. Para tuberías plásticas, el valor está cercano a 1.5, con una importante histéresis por los cambios de presión.

Por otro lado en pruebas de campo realizadas en Japón dirigidas por expertos de la IWA a pequeños sectores en sistemas de distribución con tuberías metálicas se cerraron todas las tomas para eliminar del estudio las fugas internas y el consumo. Se midió a la entrada de los sectores, la presión fue llevada desde 5 hasta 40mca y después reducida; cada prueba duro aproximadamente 45 minutos.

De esto se obtuvo un rango de  $N1$  de 0.65 a 2.12 (1.15 en promedio). Esto fue utilizado como valor estándar en Japón durante 20 años.

En el Reino Unido, tras una campaña de detección de fugas se llegó a un  $N1$  de entre 0.5 y 1.5. En Brasil, con altos índices de fugas,  $N1$  estuvo entre 0.52 y 0.67 para tuberías metálicas; en un par de zonas con alto índice de fugas como fisuras y juntas dañadas en tubos de pvc, el  $N1$  se acercó a 2.5.

En resumen, se puede decir que  $N1$  depende del material de la tubería y el nivel de fugas en una zona determinada. Para fugas de fondo (indetectables),  $N1$  está cercano a 1.5, independientemente del material de la tubería.

La prioridad en cualquier prueba es que se localicen y reparen las fugas lo más pronto posible. Las únicas fugas "aceptables" son las que se clasifican como "no detectables", porque representan un caudal muy pequeño y se encuentran en tuberías profundas. Estas fugas generalmente se dan en juntas y uniones, de modo que representa un gasto mucho mayor que el beneficio que se obtendría con la reparación.

En cuanto al momento preciso de realizar la rehabilitación o reparación de tuberías, se han hecho diversos modelos con base en estadísticas, modelos probabilísticos, la edad, material y diámetro de las tuberías, etc.

Algunos estudios internacionales sugieren ecuaciones lineales para determinar el momento de la primera fuga y una ecuación exponencial para determinar la tasa de roturas después de la primera. Sin embargo, de lo más ambicioso hasta el momento son los desarrollos de modelos de degradación estructural para sistemas de distribución de agua y organización para la integración de un sistema SIG con estimación de riesgos y priorización de acciones de recuperación de caudales. Un sistema de mejoramiento de tuberías abarca datos físicos, históricos y estadísticos; identificación de patrones de falla, descripción del comportamiento de la red, valoración de riesgos, ciclo de costos y SIG, entre otros datos del sistema.

Algunos estudios han evidenciado que para sistemas con servicio continuo, la frecuencia de roturas en tuberías se incrementa cuando la presión de servicio excede los 35 metros de carga. Estos sistemas con presiones altas resultan en altas frecuencias de roturas y por lo tanto altos costos de reparación innecesarios.

## **2.4. Efecto de las prácticas de operación en las fugas**

### **2.4.1. Efecto de las reparaciones de fugas en una red sin control de presiones**

Considerando una red limitada, al eliminar fugas en una conducción aumentará la presión de la misma y del sistema en sí, lo cual transmitirá el problema de la fuga (ya entonces reparada) a otro punto. Por esto, es fundamentalmente importante no atacar de manera aislada cada fuga, sino verificar que las condiciones de la Red sean óptimas para liberar la presión que eventualmente aumentará al reparar una fuga, en especial siendo ésta de magnitud considerable.

Una de las acciones más efectivas que se relacionan con el control de las presiones es la sectorización<sup>8</sup>, ya que permite controlar el comportamiento de la red y su funcionamiento hidráulico.

### **2.4.2. Mínima variación de presiones**

Los frecuentes y súbitos cambios en la presión reducen la vida útil de las tuberías, ya que se someten a una severa condición de fatiga continua. El caso extremo que son las situaciones de servicio intermitente (tandeos), fomentan la aparición de nuevas fugas hasta en un orden de 10 veces sobre las situaciones de servicio continuo. Naturalmente es de considerarse también que las bombas vayan directamente hacia los tanques y no hacia la red. Mediante la instalación de elementos de control automáticos, como válvulas, bombas y otros, así como la procuración de la continuidad del servicio reducirán notablemente la tasa de aparición de las fugas.

### **2.4.3. Efecto de los fenómenos transitorios dados por movimientos bruscos de válvulas y tandeos**

Dentro de los instrumentos que existen para modelación de redes, el más frecuentemente utilizado es EPANET<sup>9</sup>. Éste es un programa elaborado por el U. S. Army Corps of Engineers que permite modelar el comportamiento hidráulico de redes de agua a presión mediante la introducción de datos geométricos y de operación de la red. Simula transitorios muy lentos mediante modelos no inerciales, ya que no se tiene en cuenta la inercia del fluido

---

<sup>8</sup> Procedimiento que implica la separación de una red de distribución en secciones con una fuente de abastecimiento propia y de capacidad suficiente para cubrir la demanda de los usuarios en ella y sus variaciones en el tiempo y que permite controlar el comportamiento hidráulico en cada una.

<sup>9</sup> [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

y sus condiciones cambian con el tiempo. Los modelos inerciales permiten representar fenómenos transitorios más bruscos, ya que sí toman en cuenta la reacción del agua; dentro de esta clasificación, existen dos aproximaciones: modelos elásticos (golpe de ariete) y modelos rígidos (oscilación de masa); el primero considera la elasticidad del fluido y del material que lo conduce, mientras que el segundo no.

El golpe de ariete consta de 4 fases. En la primera el fluido se frena, parte del fluido se comprime, aumenta la presión; aumenta la densidad del fluido y continua su recorrido en dirección a la válvula cerrada. Después, en la segunda fase, el fluido llega a su distancia máxima (de vuelta) o un punto de expansión en el que pierde velocidad y presión. La tubería está expandida, una porción del fluido comienza un recorrido en el sentido original del flujo. Posteriormente, al llegar al final de su recorrido, cuando el fluido ha perdido presión, comienza un fenómeno de subpresión<sup>10</sup>, lo que es la tercera etapa. Finalmente, tras una serie de repeticiones de la segunda y tercera fase, la presión se uniformiza con la del depósito o zona de expansión y la tubería se relaja.

La celeridad es la velocidad con la que el fluido recorre la distancia máxima en el golpe de ariete en un tiempo determinado y depende de la elasticidad del material y del fluido. Los cierres bruscos que se repiten continuamente en la red, producen a largo plazo la fatiga de la tubería. Si los cambios de velocidad son muchos y variados, el efecto de los fenómenos transitorios provocados por la manipulación de las válvulas se asevera. Entre los efectos de estas prácticas se pueden señalar la cavitación, fatiga de los tubos y el reventamiento de los mismos.

Suponiendo que los tandeos sean operaciones controladas y cuidadosas, aún así los efectos de someter la tubería a las fluctuaciones de presión y de velocidad de manera continua provoca que eventualmente la tubería no tenga capacidad para resistir la sobre presión y subpresión ejercidas sobre ella.

Algunos estudios indican los efectos del cierre brusco de válvulas, tanto en modelos computacionales como en modelos físicos<sup>11</sup>. El modelo es capaz de mostrar resultados negativos, algo imperceptible en el modelo físico. Sin embargo, de acuerdo a la correlación que se puede notar en las gráficas de resultados entre el modelo físico y el computacional, es posible ver que podrían darse presiones negativas en la realidad.

---

<sup>10</sup> Efecto de presión negativa que contrae la tubería hacia el centro del eje de la misma, provocando eventualmente la implosión del tubo.

<sup>11</sup> Calibración y validación de un modelo en computador para simular el golpe de ariete en redes cerradas. Carlos Fernando Velásquez H. & Mauricio Toro B.. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2006

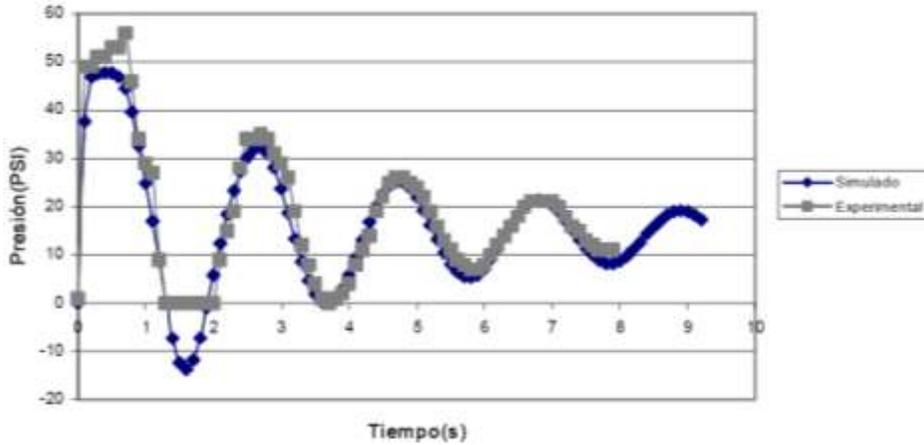


Figura 6. Resultados de la modelación y experimentación física del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula en tubo simple y en serie(1 PSI=07kg/cm<sup>2</sup>)

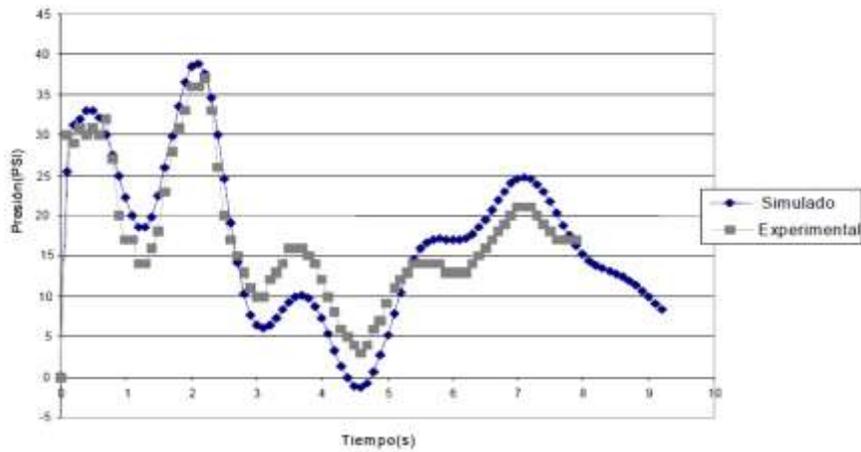


Figura 7. Resultados de la modelación y experimentación del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula en tubo simple y en paralelo

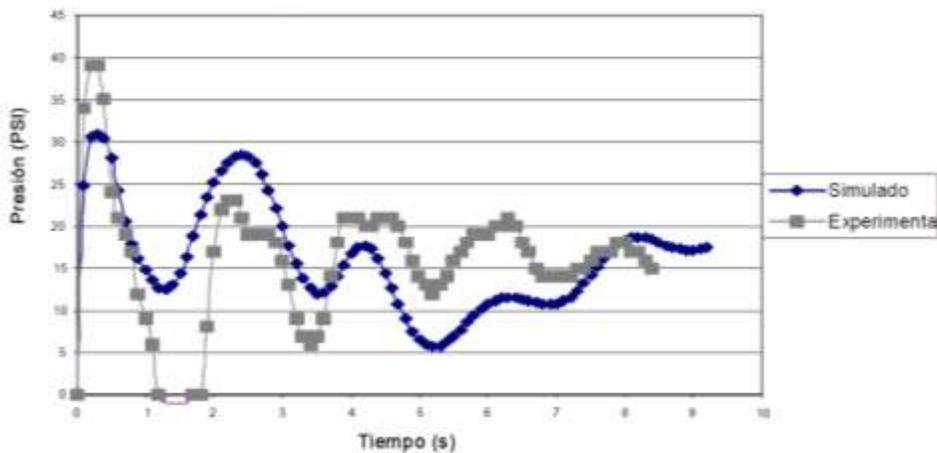


Figura 8. Resultados de la modelación y experimentación del golpe de ariete en redes hidráulicas, en válvula de red cerrada calibrada

Evidentemente, el efecto de los fenómenos transitorios en las tuberías y los elementos de una red puede ser catastrófico si éste es repetido frecuentemente.

## 2.5. El destino de las fugas

### 2.5.1. Influencia del tipo de suelo en la manifestación superficial de las fugas

Uno de los factores más importantes en el control de fugas es el tipo de suelo, ya que determina la capacidad de infiltración y así la velocidad con la que algunas fugas se manifiestan en la superficie.

- (a) El *suelo de relleno* llega a asentarse, lo cual provoca la rotura de tubería o el daño en ella.
- (b) El *suelo orgánico* es lo que se conoce como tierra vegetal, de consistencia suave y generalmente con vegetación en él. La presencia de árboles puede ser indicio de fugas, ya que las raíces abrazan los tubos y los presionan, llegando a fisurarlos o incluso romperlos.

Generalmente estos tipos de suelo promueven que las fugas se manifiesten en la superficie.

- (a) El *suelo de cascajo y de desecho* provoca picaduras en los tubos, por los elementos que se encuentran inmersos en él, como varillas, pedacería de concreto, entre otros.
- (b) El *suelo de roca* de manera muy fortuita llega a picar los tubos, sin embargo, su principal característica es que, al igual que el suelo de cascajo y de desecho, permite que el agua de las fugas drene y no se manifieste en la superficie, lo cual convierte la fuga en “fuga de fondo”.

### 2.5.2. Incorporación al drenaje

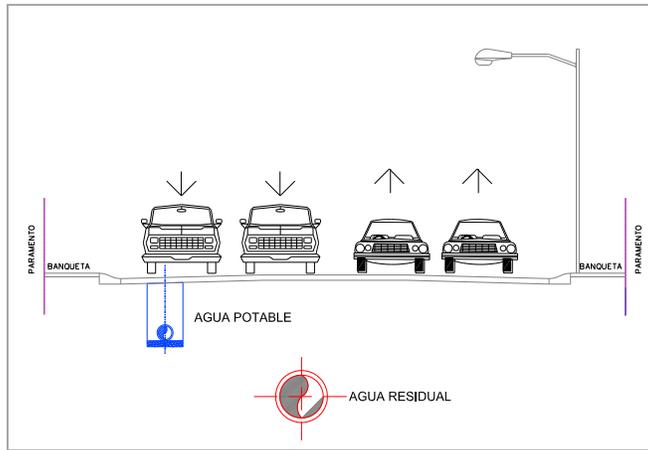
La experiencia en diferentes redes en el mundo ha dado lugar a la observación de flujos inusuales en el drenaje, esto es, que se observa un flujo continuo y con bajo contenido de sólidos, así como velocidades inusuales.

Dado el arreglo que por norma<sup>12</sup> debe cumplirse en las instalaciones y la influencia de la profundidad de la tubería de agua potable y el tipo de suelo circundante, parte del agua de las fugas en la red de agua potable puede terminar incorporándose al drenaje. El agua por supuesto busca el camino de más fácil salida y éste es el de mayor gradiente, que resulta ser en muchos casos el drenaje, considerando que es lo que principalmente se busca al diseñar el drenaje (fig. 9).

En teoría el drenaje debe ser hermético y debe encontrarse en un nivel de suelo por debajo del agua potable y otras instalaciones; sin embargo, aún hoy en día, la mayoría de las tuberías de drenaje aún son rígidas y no son herméticas; como se comentó en el capítulo 1, los asentamientos del terreno pueden dañar estas tuberías, provocando desde fisuras hasta la rotura del tubo y permitiendo así la eventual intrusión del agua de las fugas o del subsuelo al drenaje, provocando con esto que las fugas no sean evidentes por mucho tiempo, ya que en la mayoría de los casos, no saldrán nunca a la superficie.

---

<sup>12</sup> Subcapítulo 5.4 de Referencia número 14



**Figura 9. Disposición de las tuberías de agua potable y drenaje determinados por los lineamientos**

Estos dos factores, fundamentalmente, pueden facilitar o dificultar la manifestación de las fugas de manera superficial. Dichos factores pueden influir, en la localización de las fugas apoyados en métodos y técnicas adecuados, de los cuales algunos se describen en el capítulo siguiente.

## CAPÍTULO 3. MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LAS REDES DE AGUA POTABLE

La reducción de las pérdidas de agua implica pocas pero estratégicas actividades, que llevadas a cabo en el orden y con la metodología adecuada, pueden ayudar a reducir las pérdidas de manera significativa y no necesariamente onerosa.

Cada una de estas técnicas ha sido implementada en diferentes países del mundo, logrando significativos resultados que han permitido recuperar importantes cantidades de agua y mejorando el desempeño de las redes de ciudades con problemáticas similares a las existentes en la Ciudad Universitaria de la UNAM, sin embargo, por si solas no son suficientes y no todas son totalmente aplicables en la escala de CU, por lo que de estas se seleccionaron las más adecuadas.

### 3.1. Elaboración de un diagnóstico

El diagnóstico de una red sirve para encontrar los puntos álgidos de su funcionamiento y así determinar las acciones más apropiadas para solucionar los problemas que se detecten. Consiste básicamente de tres elementos, que son el balance hidráulico, las estadísticas de la incidencia de fugas y los estudios de campo necesarios.

Es de gran utilidad el uso de indicadores, a razón de evaluar en determinado momento el estado de la red y el efecto de las acciones emprendidas.

#### 3.1.1. Balance Hidráulico

El balance hidráulico consiste conocer cuánto de lo que se suministra a la red se consume y cuánto se pierde, y se obtiene midiendo a la entrada del suministro y a la entrada de los puntos de consumo. Básicamente la diferencia entre estas cifras son las fugas.

$$S = C + F(H)$$

El balance es fundamental para la evaluación del problema general y para definir los valores aceptables de pérdidas, considerando la relación beneficio/costo que está dispuesto a asumir el organismo operador de los servicios de agua.

#### 3.1.2. Indicadores de desempeño

El indicador fundamental es el volumen anual de pérdidas para la evaluación de un sistema; grandes y crecientes volúmenes de pérdidas indican un mantenimiento insuficiente y una deficiente política de operación.

Los principales indicadores de desempeño (PI: Performance Indicators) empleados en el mundo son los que siguen.

- a. Porcentaje de pérdidas con respecto al volumen suministrado
- b. Volumen de pérdidas por propietario por unidad de tiempo
- c. Volumen de pérdidas por conexión por unidad de tiempo
- d. Volumen de pérdidas por unidad de longitud por unidad de tiempo

Sin embargo, la mayoría de estos indicadores básicos no toman en cuenta algunos factores que se sabe que afectan el desempeño de la red, tales como la continuidad del servicio, la longitud total de tuberías, la localización de las tomas y la presión promedio de operación, de modo que no relacionan las características y el estado de la red con las pérdidas anuales en ella.

Por esto surge el **TIRL** (Technical Indicator for Real Losses), que es utilizado para redes en las que la densidad de conexiones es de consideración, ya que la mayor parte de las fugas podrían presentarse en estas conexiones. El TIRL toma en cuenta la continuidad del servicio y es, como su nombre lo muestra, un indicador técnico de pérdidas reales, que son las pérdidas por fugas reportadas, no reportadas fugas de fondo<sup>13</sup> y desperdicios no controlados. Para su cálculo es necesario dividir las pérdidas anuales (en litros), obtenidas del balance anual de agua, entre la multiplicación del número de conexiones por el tiempo que se encuentra presurizada la red y por los 365 días del año (ó 366).

$$TIRL = \frac{\text{Pérdidas reales (L/día)}}{[\text{no. Conexiones} * \text{porcentaje de tiempo de la red a presión (decimal)} * 365]} \quad (ec. 6)$$

19

Otros indicadores secundarios de los que se tiene conocimiento son, el UARL y el ILI.

El **UARL** (Unavoidable Annual Real Losses) es el volumen anual de pérdidas que un determinado organismo operador de agua está dispuesto a asumir, partiendo del hecho de que es imposible eliminar todas la fugas en un sistema, ya que no es económicamente viable ni técnicamente posible. Éste indicador no sólo toma en cuenta la presión a la que está sujeta la red, sino que además es posible considerarlo para efectos de cálculos financieros.

La relación que existe entre el UARL y el costo de las pérdidas, se puede representar con una curva que se obtiene de evaluar el promedio de pérdidas reales y el costo de los programas de control de fugas. Esta curva tiene un punto de inflexión en el que claramente se observa que llevar a cabo programas de control de fugas es redituable y económicamente viable, sin embargo, hay un punto a partir del cual es más costoso sostener programas de control que asumir pérdidas (Fig. 10).

En este punto se asume que:

- La infraestructura está en buenas condiciones
- Se han alcanzado los objetivos de reducción de pérdidas
- Las fugas de fondo han sido identificadas y son o serán reparadas de inmediato

El punto indica el volumen de pérdidas aceptado en el sistema

---

<sup>13</sup> Fugas que no se manifiestan en la superficie

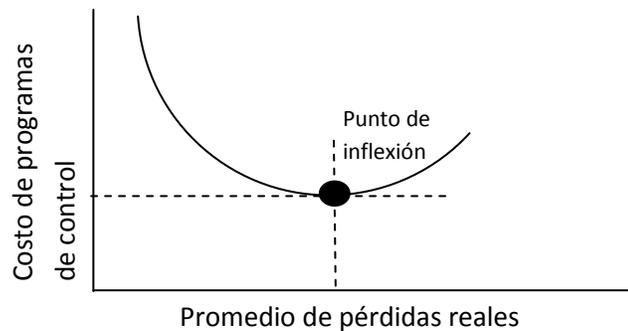


Figura 10. Relación costo beneficio ideal en los programas de control

La figura anterior representa la relación beneficio/costo (B/C); en ella que se acepta un determinado promedio de pérdidas reales, ya que implica el menor costo de los programas de control de pérdidas. Esto quiere decir que se ha invertido la cantidad necesaria para lograr el promedio de pérdidas que se puede aceptar sin invertir más de lo que se puede recuperar y esta debe ser la inversión ideal.

Los componentes básicos para el cálculo del UARL se muestran en la tabla siguiente. Algunos de los componentes se obtienen de estadísticas y estudios de campo propios de la red; sin embargo, como se mencionó anteriormente, se considera que la infraestructura está en buen estado, por lo que algunos de los componentes son objetivos de reducción que se pretenden alcanzar y que indicarán lo que se está dispuesto a asumir como pérdida.

Tabla 1. Parámetros para cálculo de UARL (Unavoidable Annual Real Loses)

Parámetros Requeridos para Calcular Pérdidas Reales Anuales Inevitables (UARL)				
Componente de Infraestructura	Fugas de fondo (No detectables)	Fugas Reportadas	Fugas No Reportadas	Total de fugas
Tuberías Principales	Longitud	Número por año	Número por año	En tuberías principales
	Presión	Presión	Presión	
	Tasa mínima de Pérdida por km*	Tasa de Flujo Promedio*	Tasa de Flujo Promedio*	
		Promedio de duración	Promedio de duración	
Conexiones de Servicio (a la Orilla de la Calle)	Número	Número por año	Número por año	En conexiones de servicio
	Presión	Presión	Presión	
	Tasa mínima de Pérdida por conexión*	Tasa de Flujo Promedio*	Tasa de Flujo Promedio*	
		Promedio de duración	Promedio de duración	
Tuberías secundarias (después de la toma)	Longitud	Número por año	Número por año	En tuberías secundarias
	Presión	Presión	Presión	
	Tasa mínima de Pérdida por km*	Tasa de Flujo Promedio*	Tasa de Flujo Promedio*	
		Promedio de duración	Promedio de duración	
* A alguna presión estándar específica				<b>UARL</b>

Fuente: Water Loss 2007

Estos datos dieron como resultado el cálculo de algunos componentes que pueden ser de utilidad para varias redes, toda vez que es un índice comparable entre diferentes sistemas.

Tabla 2. Componentes para el cálculo del UARL

Componentes para Calcular Pérdidas Reales Anuales Inevitables (UARL)					
Componente de Infraestructura	Fugas de fondo (No detectables)	Fugas Reportadas	Fugas No Reportadas	UARL total	unidades
Tuberías Principales	9.6	5.8	2.6	18	litros/km tubería/día /m de presión
Conexiones de Servicio (a # metros de la orilla de la Calle)	0.6	0.04	0.16	0.8	litros/conexión/día/m de presión
Tuberías secundarias sumergidas entre la toma y el medidor de consumo	16	1.9	7.1	25	litros/km tubería secundaria/día /m de presión

Fuente: *Water Loss 2007*

Se suman de los tres campos para cada componente de infraestructura, obteniendo así un UARL para cada componente. Finalmente, el UARL total de cada componente se multiplica por la cantidad de componentes en la red de estudio y se suman. Este resultado estará dado en litros por día por metro de presión (metros de columna de agua), por lo que al multiplicarlo por la presión de la red en estudio, se obtendrá el volumen anual de pérdidas aceptado en litros por día. Dado que se considera la continuidad del servicio, al multiplicar por los 365 días del año, el UARL será un indicador veraz.

21

$$UARL = (18 * Lm + 0.8 * Nc + 25 * Lp) * P / (Nc * \text{porcentaje de tiempo con red presurizada (decimal)} * 365) \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

*Lm*: longitud de tuberías principales

*Lp*: longitud de tuberías secundarias

*Nc*: Número de conexiones de servicio

Cabe mencionar que éste indicador es muy particular, es decir que sólo es aplicable a la red en estudio, ya que contiene los datos de la misma. No es un índice generalizado, ya que cada red tiene sus características particulares y requerimientos de control activo de fugas propios, aunque ambas tengan cierta similitud.

Se observó que en las redes con más de 20 conexiones por kilómetro de tubería (entre 30 y 100), el 50% del UARL se obtenía precisamente de las conexiones y no de las tuberías. Aunque, no se generalizó el índice, queda visto que la densidad de conexiones es un factor sumamente influyente en la aparición de fugas y el principal punto de atención para el control activo de fugas.

El uso del UARL como un indicador está limitado por la presión en la red, ya que si ésta es menor de 20m.c.a., las fugas no son detectables. Si a esto se suma un tipo de suelo que dificulte que las fugas se manifiesten en la superficie, el UARL resulta aún más limitado.

En resumen, el UARL representa lo que se espera obtener, considerando que la infraestructura está en buen estado, que las fugas visibles y las detectadas son o serán reparadas rápida y adecuadamente. Es un índice predictivo, no evaluativo.

Sin embargo el TIRL sí es un índice evaluativo, y es calculado en litros por conexión por día, de este modo, es internacionalmente comparable. Sus principales consideraciones son la presión de operación, las características locales y la densidad de conexiones. En un estudio de las redes de diferentes países, el TIRL varió entre 27 y 832 litros por conexión por día cuando el sistema está presurizado.

Éste índice tiene un amplio margen de aplicación, ya que considera el tiempo que el sistema está presurizado, por lo que la cifra que se obtenga de este puede ser multiplicado por las horas del día en que esta característica se cumple y así obtener el volumen real de pérdidas anuales que se están teniendo.

No deja de considerar las pérdidas en las tuberías, sin embargo estas no son primordiales, ya que el principal factor es la densidad de conexiones, que supera las 20 por kilómetro.

Por otro lado, el ILI (Infrastructure Leakage Index) es un indicador que considera tanto al UARL como al TIRL y únicamente revela el estado de la infraestructura con respecto a lo que se espera obtener, de modo tal que es un cociente entre el TIRL (numerador) y el UARL (denominador), por lo que se trata de un índice adimensional. Su utilidad está limitada, ya que generaliza el estado de la infraestructura y no indica el origen del problema que debe atacarse para lograr los objetivos, finalmente se requiere observar los indicadores de inicio.

$$ILI = TIRL / UARL \quad (ec. 7)$$

El ILI indica no sólo las pérdidas corrientes, sino que también permite la estimación inicial del potencial de reducción. Los valores bajos de ILI (cercanos a 1.0) indican un buen estado de la infraestructura, sin embargo, estos niveles son difíciles de alcanzar incluso para países desarrollados, aunque éstos cuenten con una infraestructura en buenas condiciones. El Banco Mundial y desarrolló una tabla que indica las pérdidas reales tanto como para países desarrollados como en desarrollo de acuerdo a la presión a la que esté sujeta la red; ésta tabla puede servir como referencia para lograr un primer objetivo de reducción de pérdidas reales.

Tabla 3. Tabla comparativa del ILI (Infrastructure Leakage Index)

Categoría de desarrollo técnico	ILI	Pérdidas reales en litros/ conexión /día cuando el sistema está presurizado a un promedio de:				
		10mca	20mca	30mca	40mca	50mca
Países desarrollados	A 1 - 2		< 50	< 75	< 100	< 125
	B 2 - 4		50 - 100	75 - 150	100 - 200	125 - 250
	C 4 - 8		100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	D > 8		> 200	> 300	> 400	> 500
Países en desarrollo	A 1 - 2	< 50	< 100	< 150	< 200	< 250
	B 4 - 8	50 - 100	100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	C 8 - 16	100 - 200	200 - 400	300 - 600	400 - 800	500 - 1000
	D > 16	> 200	> 400	> 600	> 800	> 1000

*Fuente: Water Loss 2007*

En general el nivel de pérdidas en un sistema depende principalmente de las políticas del organismo operador, y se ve influido generalmente por factores como los siguientes:

- ⊕ Recursos: financieros, humanos y de agua.
- ⊕ Condición de la infraestructura: materiales, política de renovación y presión corriente
- ⊕ Actitud institucional: Estructura, regulación y políticas.
- ⊕ Política de control de pérdidas: Actividad, percepción y experiencia técnica.

La conjunción de estos elementos, apoyados en los índices adecuados, pueden facilitar la integración de un programa de recuperación de caudales exitoso, a través de un diagnóstico certero y objetivo de la red, basado en los indicadores del estado de la infraestructura y las capacidades de mejora de la red.

### **3.1.3. Elaboración de estadísticas**

La construcción de estadísticas sobre la incidencia de fugas histórica, ofrecerá un panorama sobre las fugas atendidas y es necesario para concentrar actividades de inspección y eliminación de fugas.

Al concluir las estadísticas se sabrá en dónde se encuentran el mayor número de fugas visibles, de qué tipo son, en qué material se presentan con más frecuencia, la causa más habitual por la que se dan, la época del año en que se presenta un mayor número de fugas, entre otros datos de importancia.

Las estadísticas por sí mismas no representarán un gran avance, es de gran utilidad realizar mediciones de caudal en las zonas de mayor incidencia, con el fin de comprobar que las fugas que se presenten ahí se manifestarán en la superficie o, de lo contrario, sólo se está mostrando una parte de las fugas existentes y es necesario detectar las fugas no visibles.

En etapas avanzadas del programa de recuperación de caudales, las estadísticas servirán para evaluar los resultados de las acciones llevadas a cabo. La interpretación de los resultados puede beneficiar a la planeación del presupuesto y del personal de operación, mejorando así la atención a las fugas y por ende reduciendo pérdidas.

### **3.1.4. Estudios de campo básicos**

Los estudios de campo iniciales servirán para determinar el estado de la red y sus elementos, así como evaluar su diseño; esto permitirá encontrar las posibles causas de las fallas en el sistema. Algunos de los estudios más elementales se describen a continuación.

#### **a. Muestreo de medidores**

En numerosas redes del mundo, ésta práctica permite identificar problemas con respecto a la medición. Es este punto, es posible determinar la sub medición, que forma parte de las pérdidas aparentes del sistema.

Al realizar el muestreo, se determina el error de los medidores evaluados y se extrapola el resultado a los medidores registrados en el sistema. Así se ajusta el balance y se determinan con mayor precisión las pérdidas.

## **b. Revisión y evaluación del estado general de la red**

El estado en el que se encuentre la red indica la frecuencia de mantenimiento que se tiene en ella, así como los factores que pueden incidir en la aparición de fugas. Ésta condición tiene que ver con la edad de las tuberías y elementos, número de accesorios y longitud de tramos nuevos, estado físico de las tuberías (pintura, mantenimiento, corrosión, incrustaciones), estado de las cajas de válvulas, etc.

Todos los datos de este estudio, en conjunto con las estadísticas, podrían generar un diagnóstico particular de la zona.

## **c. Catastro y modelación matemática**

Un catastro es básicamente un inventario de elementos que existen en una red, está formado por una serie de fichas técnicas que indican todas las características, tanto físicas como asociadas, de dicha red, tales como su ubicación y estado de conservación. Este levantamiento general contiene los datos del terreno, el tipo de usuario, todos los detalles de las tuberías y accesorios, elementos, reservorios, fuentes de abastecimiento, padrón de usuarios, entre otros.

El catastro inicial requeriría de un fuerte trabajo de campo y de gabinete, sin embargo, en adelante lo fundamental será el correcto y continuo flujo de información entre las áreas, a razón de actualizar puntualmente cada modificación de la red.

24

La importancia de contar con un catastro de la red y de actualizar los datos continuamente es que a través de esto se puede modelar matemáticamente su comportamiento, para lo cual es necesario contar con los programas adecuados para representarla. Mediante el uso del modelo para la modificación de las condiciones de la red, rehabilitación de tuberías, entre otras actividades, es posible observar las implicaciones que tendría realizar dichas actividades y, de acuerdo a estos resultados y la evaluación financiera pertinente, determinar las acciones adecuadas para el mejoramiento del desempeño hidráulico de la red.

Una base de datos geográficamente referenciada resulta un instrumento sumamente útil para la integración del modelo, ya que prevé los datos geográficos necesarios, así como su estado real.

Estos elementos son básicos para la integración de un sistema SCADA, el cual no sólo contiene los datos geográficos y físicos de cada elemento de la red, sino que permite controlar las condiciones y comportamiento de la misma en tiempo real y de manera automática, minimizando y, en algunos casos, eliminando el error humano de la operación.

En el programa Epanet<sup>®</sup> es posible modelar mediante un coeficiente las fugas en la red y la reacción de la misma al aumentar o disminuir las fugas en determinado espacio o en toda la red. De este modo, pueden preverse las implicaciones que tendría llevar a cabo programas masivos de localización y reparación de fugas, más aún sin control de presiones. Este coeficiente se obtiene de experimentar con la relación presión-fugas y es igual a **N1**, como se mencionó anteriormente. Éste paquete es el más comúnmente utilizado y de libre acceso, sin embargo, existen otros que cumplen estas funciones y que tienen cierto costo, que bien puede ser cubierto con los beneficios que permite obtener.

#### **d. Evaluación de las elevaciones del terreno**

La topografía juega un papel fundamental en el diseño de las redes de agua potable y drenaje. A pesar de que el diseño inicial haya sido adecuado, el crecimiento de la red puede implicar problemas de abastecimiento no contemplados de principio. Es por eso que la obtención de la topografía del lugar será de gran utilidad en la revisión de las causas en las fallas del sistema y por supuesto de las fugas.

La mayoría de los sistemas en zonas con grandes desniveles topográficos funcionan a presiones excesivas más del 90% del tiempo que se encuentran en operación, a causa de las variaciones horarias a lo largo del día. La definición de estándares en la presión de servicio a través del aprovechamiento de la topografía puede tener una importante influencia en el volumen anual de pérdidas, logrando un adecuado manejo de presiones. En Japón, por ejemplo, la tendencia en el diseño de redes responde a los beneficios que se obtienen del aprovechamiento de la topografía para brindar la presión de servicio necesaria, minimizando así la ocurrencia de altas presiones.

#### **e. Revisión de las políticas de operación de la red**

Se ha hablado de los fenómenos transitorios que se presentan en las tuberías y las causas de los mismos. La propia operación de la red puede estar afectando la vida útil de las tuberías y accesorios, tal como se mencionó anteriormente con respecto a las fluctuaciones de presión determinadas por los bombeos directos a la red y los “tandeos”.

25

Es este aspecto, se debe considerar la continuidad del servicio, si existe bombeo directo a la red, promover su eliminación. La inclusión de elementos de acción automática son de gran utilidad, aunque se presenta una oportunidad de mejorar el desempeño de la red dando una correcta capacitación al personal de operación para que éstos reconozcan el efecto que tiene la apertura o cierre brusco de una válvula, así como la incorrecta operación de válvulas reguladoras de presión, expulsoras de aire y otras. Por supuesto, la importancia que tiene la adecuada reparación de fugas de modo que se evite su reactivación en un corto plazo.

### **3.2. Estrategias para la reducción de pérdidas**

#### **3.2.1. Sectorización**

La sectorización hidráulica es un método que consiste en separar la red en áreas bien definidas geográficamente con características hidráulicas similares y con una condición de frontera, tal como la presión o el gasto. Implica, físicamente, cierres de válvulas que aislen un sector de otro, de modo que cada sector hidráulico tenga preferiblemente una sola entrada de agua y, en algún caso, existan sectores con más de una entrada, todas ellas conectadas a la red primaria.

Ya que cada sector hidráulico de manera ideal aprovecha la topografía del lugar, es sumamente recomendable que el abastecimiento se obtenga de un tanque y el recurso sea distribuido por gravedad.

Para esto es muy útil el empleo de un modelo hidráulico que represente el comportamiento de la red y que defina claramente las zonas en cuanto a la distribución del recurso. De este modo, es posible observar las necesidades de la red y elegir y direccionar las estrategias adecuadas para la solución a dichos problemas.

El objetivo de sectorizar una red es identificar las necesidades y recursos de cada zona y administrarlos adecuadamente para lograr un desempeño hidráulico adecuado, proporcionando así un servicio de calidad.

Es necesario contar con los datos verídicos de las instalaciones, para lo cual es recomendable realizar un catastro, verificando en campo y corrigiendo los datos que se tengan desde el inicio del estudio. El beneficio de contar con un catastro en las tareas de detección de fugas es que se cuenta con los elementos necesarios requeridos por los equipos utilizados para tal fin; las inconsistencias entre los datos teóricos y las observaciones en campo pueden generar serias confusiones en la interpretación de los resultados y así dificultar la eliminación oportuna de las fugas.

Se asume que no será correcto el 100% de los datos, sin embargo, se tiene un registro lo más cercano posible a la realidad, con lo cual, la variación entre el modelo matemático y la red no debe ser significativo.

Una prueba de suma importancia para la evaluación inicial de un sector hidráulico es la prueba de presión cero, la cual consiste en verificar la hermeticidad de las válvulas de sectorización y posteriormente cerrar la entrada del sector en cuestión; esta prueba debe realizarse preferentemente por la noche, conociendo previamente el flujo de los consumos nocturnos.

Para evitar los errores provocados por el consumo nocturno normal o el aumento en este, se puede realizar la misma prueba en secciones más pequeñas dentro de los sectores hidráulicos, por ejemplo, en tuberías que pueden ser aisladas con una sola válvula límite y cuyas condiciones de consumo son conocidas. He aquí la importancia de un catastro, y es que ésta variación del método se limita a probar la hermeticidad de las válvulas límite conocidas, mientras que las que no se conocen representan un factor de inconsistencia en los resultados.

Por supuesto, las fugas no escapan a ninguno de los elementos mencionados, toda vez que de esto depende un programa activo de control de fugas efectivo. La sectorización ayudará a controlar el comportamiento hidráulico de la red, pero además definirá un espacio específico en el que se esperan encontrar o no fugas, de este modo, se direccionan adecuadamente las campañas de detección y localización de fugas. Por otro lado, ésta misma acción en cada etapa del monitoreo ayudará a evaluar continuamente las acciones llevadas a cabo propiamente para la detección y el control de las fugas, a través de los puntos de observación que representa la entrada a cada sector. Además, sin un catastro que indique las características reales de la red, podrían existir un buen número de fugas que no se midan antes de su reparación o que incluso ni si quiera se llegue a conocer de su existencia, al menos oportunamente.

#### **3.2.1.1. Tamaño ideal de un sector hidráulico**

El tamaño de un sector hidráulico puede estar definido por el número de conexiones existentes en él, pero no hay que dejar de lado los aspectos económicos que acompañan a cualquier estrategia de reducción de pérdidas.

Los criterios económicos para definir el tamaño ideal del sector son el costo mínimo de las estrategias de reducción y correspondientemente la pérdida que se asume, así como el nivel económicamente aceptable de fugas que puede ser establecido. Este nivel depende del costo marginal del agua, la frecuencia en la aparición de fugas y el costo de detectarlas.

En lo que respecta a las estrategias de reducción, una fundamentalmente importante es la detección, localización y eliminación de fugas. El costo de detectar las fugas incluye el costo de los equipos utilizados y el

personal involucrado, así como el periodo a considerar, que generalmente es de un año, para efectos de evaluación de resultados y para cuantificación de pérdidas. Por otro lado se considera el costo del agua que se está perdiendo, el cual incluye el costo marginal del agua, el promedio de la pérdida de agua en fugas y la frecuencia en la aparición de fugas. De este modo, se obtiene un balance entre lo que cuesta perder el agua y lo que cuesta recuperarla, observando el beneficio conseguido mediante la estrategia en cuestión.

En este sentido, según la WLTF (Water Loss Task Force), existen tres criterios básicos para determinar el tamaño ideal de un distrito de medición en función de la capacidad y el costo de intervenir en el distrito para localizar las fugas, que pueden ser considerados para la sectorización:

El primer criterio son los eventos de fugas mayores detectadas en flujos nocturnos. Esto implica que se sostiene un monitoreo constante y se identifica un flujo extraordinario que proviene de una fuga grande eventual en tuberías principales que debe ser localizada. Supone que estos eventos se dan con cierta frecuencia en la red y que deriva en aumentar el tamaño del sector y así disminuir el número de eventos por km de tubería.

El segundo criterio se refiere a eventos de fugas mayores detectadas en flujos nocturnos continuos o cuando el costo del agua perdida es igual que el costo de la intervención sólo en tuberías secundarias. Bajo el mismo criterio anterior, promueve el aumento del tamaño del sector para la disminución de eventos extraordinarios por km de tubería.

En estos dos casos, al aumentar el tamaño del sector y así disminuir el número de eventos por km de tubería, el costo de la intervención en el sector, cualquiera que sea la intención, disminuye.

El tercer criterio es aplicable cuando el costo del agua perdida es igual que el costo de la intervención en tuberías principales y secundarias; de esta manera, el costo anual decrece a medida que el tamaño del distrito crece, pero aumenta si el costo de intervención es mayor y obliga a disminuir el tamaño del sector.

En cualquiera de los tres casos, evidentemente el periodo ideal de intervención es el periodo en que se permite minimizar el costo anual total.

### **3.2.1.2. Subsectorización**

La sectorización hidráulica permite tener control de las características hidráulicas de una red, estableciendo parámetros particulares en cada zona y manteniéndolos estables. Por otra parte, minimiza los efectos colaterales que se asumen al hacer trabajos de reparación, rehabilitación o sustitución en algún punto de la red, afectando a un menor número de usuarios que si la red estuviese interconectada en varios puntos.

La Subsectorización, bajo el mismo criterio, permite aislar zonas más reducidas y con características hidráulicas y hábitos de consumo muy particulares. De esa manera, en áreas más reducidas y con la presión fluctuando en menor medida, se facilita la detección de fugas mediante el uso de equipo especializado, dirigido específicamente a las zonas con mayor gasto de fuga (medido por la noche en horas de mínimo o nulo consumo).

Un sector hidráulico puede contener varios distritos de medición, que son áreas que se aíslan hidráulicamente de otras mediante movimientos de válvulas, pero son temporales, a diferencia de los subsectores, que tienen el

objetivo de ser permanentes pero que ofrecen la posibilidad de ser abiertos de manera eventual y temporal para realizar reparaciones o estudios específicos.

La sostenibilidad de un sector hidráulico depende de la continuidad, ya que se trata de un método de resultados a largo plazo. Aunque llega a presentar resultados inmediatos, el desempeño de la red en general mejora si esto se sostiene el tiempo suficiente. Uno de los elementos más importantes para dar sostenibilidad al método es proveerlo de un sistema de organización e información, aunque previo a esto se debe considerar dar a conocer las técnicas, lograr su entera comprensión y generar un compromiso de largo plazo.

### 3.2.2. Control de presión

#### a. Instalación de elementos de control

Existen en el mercado diversos equipos y elementos que permiten controlar diversas características hidráulicas de las redes, logrando con esto reducir las pérdidas asociadas esencialmente a la red primaria.

**Válvulas de control automáticas.** Las válvulas de control son elementos que permiten, como su nombre lo indica, controlar ciertas características hidráulicas en la tubería, tales como el gasto y la presión (básicamente). Los beneficios obtenidos con el uso de estos accesorios son de suma importancia, ya que dan cabida a un mejor manejo y distribución del recurso.

Las válvulas pueden reducir el gasto, mantenerlo constante, reducir o sostener la presión en un punto determinado. Ahora, tratándose de válvulas automáticas, éstas operan sin la necesidad de ser manipuladas por un operador, de modo que trabajarán el mayor tiempo posible de manera eficiente. Sin lugar a dudas, esto resultaría en un gran beneficio, ya que al eliminar el error humano, el comportamiento de la tubería respondería de un modo determinado y seguramente adecuado, con lo cual, cualquier falla sería detectada a la brevedad, incluso de manera remota.

**Válvulas reductoras de presión.** Se instalan cuando una red tiene como condición de frontera la alta presión. En algunos sitios en que la diferencia de cotas es considerable, existen zonas de alta presión con alta incidencia de fugas. Por esto, al instalar una VRP se puede reducir la presión a la entrada de dicha zona y así disminuir la carga que se gana con la diferencia de cotas.

**Válvulas sostenedoras de presión.** Igualmente en sitios donde la diferencia de cotas es importante, sucede que la presión cae a la entrada de ciertas zonas, por lo que es necesario sostener la presión en un determinado nivel para garantizar cierta carga y así el suministro en el resto de la red.

**Válvulas de alivio.** Estos elementos instalados en lugares estratégicos permitirán en la red expulsar ciertas cantidades de aire que, de no ser eliminado, devendría en serios daños a la tubería y equipos, y la posterior aparición de una o varias fugas, ocasionados por cavitación y otros fenómenos.

**Válvulas de control de fugas.** Estas válvulas, tal como lo describe su nombre, controlan la aparición de fugas. Su principio de funcionamiento es el de una válvula de control de gasto, sin embargo, la diferencia básica radica en que el solenoide de la válvula detecta un exceso de gasto de acuerdo al especificado en la calibración de la misma; de este modo, la válvula actúa cerrándose, permitiendo su apertura únicamente de manera manual, así, además de alertar acerca de la presencia de una gran fuga aguas abajo, evita el desperdicio que deviene de ella.

La inversión en estos elementos puede dar elevados beneficios con respecto a los costos que representa, ya que es un solo elemento no necesariamente costoso que, al reducir la presión, por ejemplo, reduce el gasto que sale por las fugas existentes y reduce la probabilidad de ocurrencia de nuevas. Por otro lado, si el objetivo es sostener la presión, al realizar esta acción evita re-bombes que dañan poco a poco la tubería y, como se menciona anteriormente, reduce así la vida útil de las tuberías y elementos, provocando eventualmente fugas. Así, reduciendo la ocurrencia de fugas y alargando la vida de las tuberías, las inversiones en reparación de fugas, rehabilitación y sustitución de tuberías será mucho menor a mediano y largo plazo.

**Sensores de presión.** De la misma manera que los medidores de flujo, los sensores de presión más modernos contienen *data loggers* que guardan la información de un periodo de tiempo determinado y permiten detectar cualquier anomalía, en algunos casos contienen protocolos de comunicación en tiempo real.

Algunos de estos sensores no requieren ser insertados en la tubería, de manera que mediante tecnología ultrasónica son capaces de medir la presión en un punto de manera precisa y no intrusiva.

**Sensores insertables multifunción.** Estos sensores insertables en la tubería permiten obtener diversos datos como velocidad, gasto, presión, temperatura, viscosidad, entre otros. Son simples en cuanto a su instalación, incluso existen técnicas y herramientas que facilitan su inserción sin suspender el servicio, lo cual hace aún más versátil al aparato.

Por supuesto ya cuentan con *data logger* y protocolos de comunicación remota, de modo que se pueden tener al día los principales datos para el control de la red, lo cual por supuesto deriva en una atención más oportuna a las fugas existentes y las que surjan en adelante.



Figura 11. Instalación y puesta en marcha del sensor multifunción

### 3.2.3. Rehabilitación y/o sustitución de tuberías

La rehabilitación de tuberías es una opción viable que no requiere trabajos y presupuestos mayúsculos y aplaza programas de sustitución de tuberías, aunque de alguna manera, rehabilitar tuberías implica rehacer algunos tramos.

Existe una técnica para rehabilitar tuberías que consiste en introducir un tubo plástico flexible en el interior de un tubo rígido. Esta operación elementalmente implica la reducción del área hidráulica, sin embargo, gran parte de las redes se encuentran sobredimensionadas.

Es de consideración el hecho de que la fricción se reduce notablemente al pasar de un tubo metálico con incrustaciones a un tubo plástico prácticamente liso; de este modo, la pérdida de carga asociada a la reducción de área se compensa con la reducción en la fricción. La técnica evita excavaciones y acelera el proceso de instalación.

Parte de la rehabilitación consiste en el cambio de tramos de tubería y elementos, así como la aplicación de pintura y reparación de válvulas.

Por otro lado, la sustitución de tuberías evitará en un largo plazo la aparición de numerosas fugas, a reserva de la calidad con la que sean instaladas. En este caso, es importante buscar trayectorias que faciliten la inspección de las instalaciones y muy especialmente que faciliten reparaciones, evitando trabajos aparatosos y costosos.

El criterio para elegir realizar la rehabilitación de una tubería o sólo repararla es principalmente el índice de riesgo de falla, que indica la necesidad de cambiar un tubo fallado para evitar que el fenómeno se reproduzca a lo largo del tubo, ya que en la misma medida se escalan los costos de operación y mantenimiento.

Este índice se obtiene de un análisis numérico de datos históricos del comportamiento de la tubería, y permite identificar los factores de riesgo para las roturas de tuberías y su jerarquía de acuerdo a su severidad y su efecto causal.

#### **3.2.3.1. Valoración del grado de daño e identificación de la acción necesaria**

La realización de un proyecto de rehabilitación o sustitución de tuberías requiere de una cuidadosa evaluación técnica y económica, ya que por lo general se determina de acuerdo a la antigüedad de las tuberías o el crecimiento de la demanda, por lo que se entiende que la zona en estudio ha crecido, incluso tal vez de manera descontrolada, y algunas tuberías pueden encontrarse debajo de edificaciones, lo que innegablemente encarecerá el proyecto, ya sea por la cancelación del tramo o la intervención del edificio.

Por otro lado, las vialidades pueden haber cambiado de configuración, presentando el mismo dilema. En cualquier caso, habrá que realizar una puntual apreciación del problema y sus posibles soluciones.

Los aspectos más importantes que deben considerarse al momento de evaluar el estatus del problema y sus posibles soluciones son los siguientes.

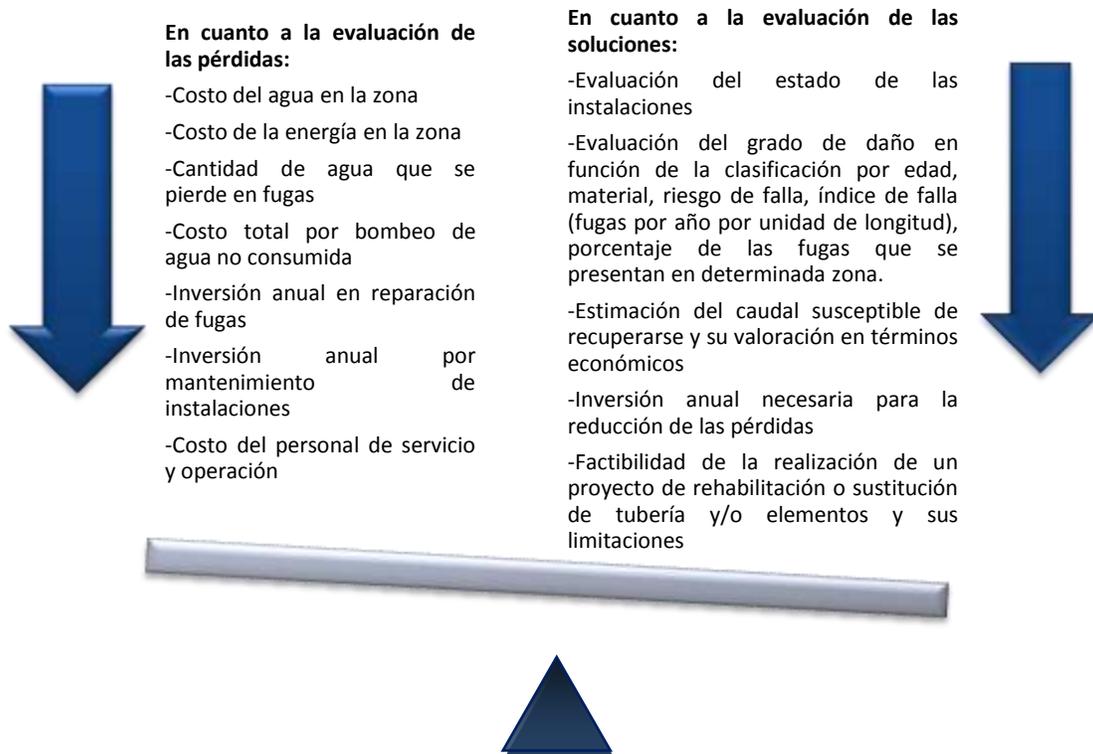


Figura 12. Determinación de la relación beneficio/costo en diferentes horizontes de tiempo

Al final puede determinarse que hay otras soluciones más viables para la zona que no representen la inversión que requeriría un programa de sustitución o rehabilitación, y esto no debe descartarse, por el contrario, atenderlo puede evitar en el corto plazo la necesidad de sustitución de tuberías y/o elementos, dando oportunidad al mantenimiento y extensión de la vida útil de la red.

### 3.2.3.2. Técnicas para la rehabilitación y/o sustitución de tuberías

#### a. Inserción de tuberías y elementos sin suspensión del servicio

Este es un procedimiento innovador que por supuesto hace uso de un gran avance tecnológico. Su uso es muy útil para cuando se requiere instalar un elemento, cambiarlo o realizar una reparación, por ejemplo, de una fuga mayor. Consiste en colocar una abrazadera en un extremo y otro del tramo involucrado para realizar inserciones en la tubería en cuestión y direccionar el gasto hacia un by-pass previamente armado, de este modo, se da continuidad al flujo y se puede trabajar durante el tiempo necesario para la actividad sin afectar a los usuarios.

Requiere de una zanja lo suficientemente grande para albergar al by-pass y permitir el libre movimiento de equipos y personal durante el desempeño de su trabajo, sin embargo, será la mínima afectación al tránsito, ya sea peatonal o vehicular, ya que se puede llevar a cabo incluso de manera vertical, ahorrando espacio tanto como se lo permita la actividad paralela.

Terminado el trabajo para el que se realizó este desvío temporal, lo que queda en el sitio son las abrazaderas, que resultan ser el único elemento no recuperable de la operación. Es un procedimiento relativamente caro, sin embargo, dadas las mínimas afectaciones al usuario, puede resultar muy valioso en ciertas ocasiones en que suspender el servicio tiene un costo y un valor muy altos.

#### **b. Rehabilitación de tuberías mediante camisas plásticas**

En muchas ocasiones resulta sumamente costoso realizar cambios de tubería por tramos o completa, principalmente por lo complicado de la obra, que requiere descubrir la tubería y realizar trabajos mayúsculos que demandan tiempo y recursos.

Las tuberías no siempre requieren ser sustituidas y pueden preventivamente ser rehabilitadas. La inserción de tuberías plásticas flexibles dentro de las tuberías metálicas permite realizar los trabajos con mayor velocidad y menor inversión.

Consiste en hacer una excavación tipo pozo para introducir el equipo y tener acceso a la tubería de acero vacía; se introduce un robot que tiene la tarea de limar la tubería para dejarla lo más lisa posible sin dañarla más de lo que ya está. Hecho esto se cubre el interior de la tubería de acero con un pegamento especial e inmediatamente se va pegando la tubería plástica nueva a las paredes del tubo original. Al terminar este trabajo a lo largo de la tubería, el robot realiza las perforaciones en las tomas y cambios de dirección que se encuentren en la trayectoria de la tubería.

Si bien es cierto que las incrustaciones reducen el área hidráulica de la tubería y que al introducir un tubo con cierto espesor se reduciría aún más ésta área hidráulica, también lo es el hecho de que las tuberías plásticas tienen mucho menor coeficiente de fricción que las metálicas, por lo que la velocidad no se vería afectada notablemente y el servicio continuaría teniendo prácticamente las mismas características de origen e incluso mejores; de cualquier manera, es necesario realizar estudios de capacidad de flujo para garantizar el servicio.

Existen diversas técnicas para la rehabilitación y sustitución de tuberías sin zanja.

Lo que se llama *pipe bursting* consiste en realizar una perforación y al mismo tiempo ir introduciendo tuberías plásticas, ya sea rígidas o flexibles. La reducción en cuanto a costos es de aproximadamente el 45%, mientras que la reducción en tiempo de instalación es del 75%, además de reducir el personal necesario para la operación. La única desventaja es que la vibración del equipo puede llegar a dañar eventualmente otras tuberías.

Mediante la técnica del *slip lining* es posible realizar la rehabilitación de tramos sin necesidad de cambiar toda la tubería, requiere básicamente las mismas actividades que el pipe bursting, que son una excavación en un extremo y en otro de la tubería a rehabilitar. Sin embargo, no es posible aplicar esta técnica en tuberías con cambios importantes de dirección o cuando existen colapsos en la tubería "camisa"; en estos puntos es necesario realizar excavaciones. Además las conexiones deben ser inhabilitadas durante el proceso de construcción.

La técnica *structural lining* consiste en introducir el tubo flexible en forma de U y jalarlo a lo largo del tubo rígido. Ya colocado, se somete a una temperatura superior a los 125° y una presión de alrededor de 1.8bars. Finalmente se cortan los extremos del tubo, se colocan los anillos finales y se une la tubería con el tramo existente mediante electrofusión o uniones mecánicas.

La técnica llamada the inliner consiste en impregnar un tubo flexible de base textil con resina epóxica e introducirlo invertido a lo largo del tubo a ser rehabilitado. Se somete a presión y altas temperaturas para lograr la poliadición de la resina. Se entiende entonces que el tubo queda continuo y que interactúa con el tubo “camisa”. La única limitación que tienen es con respecto a las curvas, ya que permiten un ángulo máximo de 90°, ya que curvas de mayor ángulo podrían representar un punto de falla potencial por las rugosidades internas y la tensión exterior.

Cualquiera de estas técnicas permite minimizar afectaciones al tránsito peatonal y vehicular, además de que reducen considerablemente los costos de construcción con respecto a la técnica de excavación de zanja.

Existen algunas limitaciones extraordinarias, que tienen que ver con el régimen de trabajo al que estará sujeto el tubo y trata sobre la interacción que tiene el tubo flexible con el tubo rígido: independiente o interactivo.

En el primer caso, el tubo flexible insertado debe ser capaz de resistir tanto cargas internas como externas; en tanto que en el segundo caso, el tubo flexible es capaz de resistir las cargas externas pero depende del tubo rígido para resistir cargas internas.

Para la selección del tubo, debe considerarse lo siguiente:

- |   |   |
|---|---|
| a. Modo de falla                                  | g. Número de tomas por km de tubería (densidad de conexiones) |
| b. Condición del tubo rígido (camisa)             | h. Tiempo máximo en que la línea puede estar sin servicio     |
| c. Problemas a resolver                           | i. Factores ambientales y de suelo                            |
| d. Requerimientos de presión                      | j. Tipo y localización de infraestructura adyacente           |
| e. Materiales, diámetros y edades de las tuberías |   |
| f. Tipo y localización de válvulas y accesorios   |   |

### 3.2.4. Método para la reducción de pérdidas físicas

La reducción de pérdidas físicas circunscribe básicamente tres etapas: **la detección, la localización y el control.**

La **detección** es definida como la ubicación de una fuga dentro de un espacio definido, conocido y limitado o una tubería determinada; parte de esto se logra con la medición de caudal o presión diferencial, entre otras actividades. La **localización** resulta ser más precisa en cuanto a la ubicación de la fuga, ya que se caracteriza por confirmar la existencia de la fuga e indicar el punto exacto donde se encuentra dicha fuga, considerando por supuesto un margen de error de acuerdo a la capacidad del equipo que se utilice para este fin.

Sucede que algunas fugas que se llegan a manifestar en la superficie, lo hacen en algunas ocasiones en el punto en que se encuentran, sin embargo, en numerosas ocasiones pasa que la fuga se encuentra a varios metros de distancia del sitio en que se manifiesta. En estas ocasiones es cuando se hace preciso detectar las fugas, a razón de evitar trabajos excesivos que resultan en costos y tiempos innecesarios. Es de considerarse que no todas las pérdidas son fugas, ya que existe lo que se llama desperdicios prevenibles, que pueden ser unidades de consumo en mal estado o tanques que rebosen agua de manera constante por mal funcionamiento de la válvula flotador o elemento de control de nivel.

La resistencia del estrato de suelo en el que está inmersa la tubería y las condiciones a las que esté sujeto, sumado a la profundidad de la tubería, determinarán la posibilidad de que una fuga se manifieste o no en la superficie. De otro modo, la fuga podría encontrar menor resistencia hacia estratos más profundos de suelo o grietas en él, entre otras cosas.

Nuevamente es necesario que el ejecutor cuente con la experiencia suficiente para identificar el sonido de una fuga inmersa en el suelo.

El *control* se efectúa una vez que se han determinado las soluciones y consiste en mantener en la mejor condición posible la red, a razón de poder lograr un mejor comportamiento; monitorear la red, generar una más eficiente política de atención a fugas, entre otras acciones.

### 3.2.5. Medición

Una de las acciones fundamentales para detección de fugas es la medición. Esta actividad permite conocer la magnitud de la pérdida y ofrece una macro-ubicación del problema, es parte de la detección. De este modo, es posible jerarquizar los puntos críticos para llevar a cabo otras acciones más enfocadas a lo que es la reducción de pérdidas.

La medición tiene limitantes, ya que en términos técnicos y económicos, no es práctico medir en todos los puntos posibles y, por esto, se hace necesario identificar los sitios en los que las mediciones puedan ser representativas en todos los sentidos y que, de esa manera, la medición sea una herramienta para la detección de fugas y no un punto de discrepancia y confusión en dicha tarea.

Mediante la medición, sumada a otras actividades, es posible conocer una red hidráulica por áreas, lo que se llama *sectorización*<sup>14</sup>. La medición tras la sectorización, permite poner en orden prioritario los sectores en los que las pérdidas sean mayores y formular planes determinados a reducir dichas pérdidas.

La medición presenta básicamente dos niveles, lo que es la macro-medición y la micro-medición. La primera se efectúa sobre grandes áreas y representa lo que es suministrado a un sector o área determinada desde una fuente de abastecimiento o simplemente desde la entrada al sector, que puede ser incluso una tubería proveniente de otro sector. La micro-medición representa esencialmente lo que es consumido por el usuario final. En teoría, la macro-medición y la micro-medición deben coincidir en sus cifras, sin embargo, en la práctica existen diferencias entre lo que se suministra y lo que se consume. Esta condición es precisamente la que permite ubicar las pérdidas.

La medición no sólo puede practicarse para efectos de conocer el gasto, sino también para los parámetros como presión, calidad del agua y otros.

Anteriormente se ha mencionado la relación intrínseca que existe entre la presión en una red y el gasto que por ella circula, y así la fuerte dependencia que tienen las fugas con respecto a ella. De ahí la importancia de tener un control preciso de la presión y, por supuesto, un monitoreo continuo de la misma.

---

<sup>14</sup> División de una red hidráulica en zonas con características conocidas de consumo, población, tubería y elementos, con el objetivo de hacer sostenible y continuo el servicio de agua potable a través del control de su comportamiento.

Para efectos de monitoreo del desempeño de la red se pueden establecer puntos de control, a razón de hacer un balance continuo o periódico de lo que entra a la red en términos de gasto. Por supuesto, además del consumo, que se debe tener identificado, se puede monitorear al gasto nocturno considerando usos mínimos. De esta manera, se emitirá una alarma que denote una falla o cualquier irregularidad en el sistema. Estos puntos de control bien pueden ser las entradas de los sectores y subsectores, que cumplen con las características necesarias para el monitoreo de la red.

Una anomalía en el patrón de consumo en una zona fácilmente puede ayudar a identificar tanto tomas nuevas como fugas eventuales.

### **3.2.6. Detección y localización**

#### **3.2.6.1. Prácticas de apoyo para ubicación de fugas**

##### ***a. Observación del drenaje***

Como se habló en el capítulo 2 acerca del destino de las fugas en las ciudades, el drenaje es un camino frecuente del agua proveniente de fugas de agua potable, que tiene que ver con la capacidad de infiltración del suelo y el estado del drenaje, básicamente.

En este sentido, el procedimiento para la localización de fugas apoyado en la observación del drenaje consiste en tomar un punto en la red de drenaje en el que se observe la descarga o el paso de agua clara y seguir la trayectoria de la red a través de puntos de observación (pozos de visita) en dirección aguas arriba, en el entendido de que una red de drenaje trabaja a gravedad.

El seguimiento a partir de bifurcaciones debe hacerse bajo el criterio del mayor flujo. Es conveniente que el procedimiento se lleve a cabo durante la noche o mientras se considera flujo de aguas residuales mínimo o nulo. De este modo, se identificará la posible fuente de agua clara con menor probabilidad de error.

Adicionalmente se puede contar con pruebas de residuo de cloro o ph, que son exámenes sencillos que se realizan en sitio y ayudan a identificar el origen del flujo (potable o residual)

##### ***b. Seccionamiento sistemático***

Apoyado en equipos, métodos y técnicas para detectar fugas, el seccionamiento sistemático consiste en cerrar válvulas de manera gradual y con un orden muy preciso a razón de identificar los sitios en los que se encuentran las fugas detectadas en un sector o subsector determinado.

Con un medidor instalado a la entrada del sector o subsector, se pueden utilizar dos criterios: uno consiste en cerrar las tomas para determinar si las fugas se encuentran al interior de los edificios (considerando que estos no cuentan con medidor), otra consiste en cerrar válvulas generales o de seccionamiento, lo cual permitiría identificar sitios específicos en los que se encuentren las fugas conociendo además su magnitud.

Por otro lado, sabiendo que el principio de funcionamiento de los equipos para detección de fugas es el procesamiento de los sonidos que emiten las fugas, al reducirse el flujo en ellas, los sonidos irán disminuyendo de intensidad y cambiarán su rango de frecuencias, de manera que se identificarán fácilmente.

**c. *Inspecciones continuas para identificar fugas visibles***

Este tipo de prácticas puede ayudar principalmente a detectar y eliminar fugas visibles no reportadas y verificar las reportadas, así como prevenir la aparición de fugas en el corto plazo, programando mantenimiento correctivo en donde se identifique un daño severo a las instalaciones y que podría posteriormente desencadenar en una fuga.

**3.2.6.2. Equipos de apoyo para campañas de detección**

**c. *Medidores***

El funcionamiento básico de los medidores sigue siendo el mismo. Por supuesto se ha ido mejorando la capacidad de los medidores en tanto que puedan responder a las exigencias principalmente tarifarias.

Los medidores tienen un principio de funcionamiento, ya sea de velocidad o de volumen. La aplicación de cualquiera de estos depende del objetivo que desee lograrse, por ejemplo, los medidores volumétricos tienen mayor exactitud en tomas domiciliarias, mientras que el uso de los medidores velocimétricos se acentúa en las líneas de conducción y pozos de extracción.

La tendencia en la medición es realizarla de manera electrónica y no propiamente mecánica, de modo que a través de sensores, ya sean ultrasónicos o electromagnéticos, obtienen la velocidad del flujo y, dado que contiene los datos y las características geométricas de la tubería, calculan el gasto que está pasando por una conducción. Son sumamente precisos y su mantenimiento es mucho más simple que los que contienen piezas mecánicas en contacto con el agua. Estos equipos requieren de energía eléctrica, que puede ser la única salvedad en cuanto a la sencillez de su funcionamiento.

La innovación en la medición se sitúa en el control de la misma de manera remota, mediante data loggers (almacenadores de información) y antenas de transmisión que permiten monitorear el consumo de varios medidores incluso en tiempo real y, de esta manera, detectar cualquier anomalía. Por otro lado, permite hacer evaluaciones más oportunas de la distribución del recurso y mejorar así las políticas de operación.

Los materiales de que se componen los medidores le dan una mayor vida útil y requieren de menor mantenimiento que además resulta más sencillo, por lo que los medidores salen de operación con menor frecuencia y se logra una mejor consistencia en la información que se puede obtener de ellos, además de que los hace menos atractivos para quienes sustraerían el medidor si les resultara llamativo.

**d. *Pre-indicadores***

Estos son equipos con sensores de sonido que emiten una alarma de posible fuga en cualquier dirección respecto a donde se encuentran instalados. Es necesario colocarlos sobre la tubería en puntos estratégicos para lograr una amplia cobertura en la red. Su función es básicamente de monitoreo y su aplicación puede extenderse desde la campaña de detección hasta la etapa de monitoreo continuo.

Permiten identificar posibles fugas en un radio de aproximadamente 150m, lo cual hace posible la detección de alguna fuga potencial en este derredor, especialmente si sobre la misma línea se tienen más sensores y estos indican la posibilidad de una fuga también.

Estos equipos también tienen protocolos de transmisión de datos vía remota, de modo que es un elemento de monitoreo ideal, que puede ser utilizado en conjunto con los medidores y dará mayor veracidad en cuanto a la sospecha de encontrar fugas en una zona determinada.

#### **e. *Geófono***

Son el equipo más básico para la detección de fugas y el más preciso para la localización de las mismas. Su utilidad es extendida desde la campaña de detección hasta la etapa de monitoreo. Es un equipo de uso puntual, por lo que no requiere data logger ni protocolos de transmisión de datos.

Su principio de funcionamiento es sonoro y lo que hace es amplificar y definir los sonidos que emite la tubería. De este modo, se hacen identificables los que son propios de las fugas y se diferencian de los que no necesariamente lo son.

La capacidad de este equipo para lograr escuchar las fugas en la red depende de las características físicas de la instalación, como lo es el material y diámetro de la tubería, la profundidad a la que se encuentra, el tipo de suelo, el tipo de superficie y la presión de operación.

Para el uso eficiente de este equipo es necesario contar con cierta experiencia en cuanto a la identificación del sonido característico de las fugas en diversos materiales y sujeto a distintas presiones, ya que es la única complicación en el uso del aparato. Las tuberías emiten sonidos de manera normal que, sin la experiencia mínima necesaria, fácilmente pueden ser confundidos con el sonido de una fuga.

Es muy conveniente, para efectos de la localización de las fugas, que la tubería se encuentre en un periodo de uso mínimo o nulo, para evitar que los consumos puedan confundirse con fugas.

#### **f. *Correlador***

Es un equipo de apoyo para la localización de fugas. Cuenta con radio sensores igual que los pre-indicadores, sólo que estos transmiten en tiempo real a una unidad procesadora señales sonoras transformadas a gráfico, indicando la distancia de una posible fuga con respecto a cada uno de los radios.

No son un equipo de monitoreo, ya que a diferencia de los pre-indicadores, estos sensores indican los datos de la posible fuga en tiempo real, comunicándose con otro radio sensor en línea con él mismo, mientras que los pre-indicadores trabajan por sí mismos cada uno de manera independiente y no indican ninguna distancia a la que se podría encontrar la posible fuga.

Podría decirse que cada radio se comunica con el o los radios que se encuentren a su alrededor y, entre un radio y otro determinan la distancia a la que se encuentra una posible fuga con respecto a cada uno de ellos.

El gráfico que emite en un instante dado indica el nivel de ruido escuchado en un rango de frecuencias y generalmente lo hacen sin una escala específica sino instantánea, tomando como referencia el sonido más fuerte de los que se detectaron a lo largo del tramo de tubería comprendido entre dos radios.

Las fugas en acero emiten ruidos en frecuencias altas, de entre 800 y 1500 Hz, mientras que las fugas en plástico emiten sonidos dentro de frecuencias bajas, de entre 200 y 600 Hz. Sin embargo el aparato no sólo detecta los ruidos del agua en la tubería ya que, tratándose de un medio en contacto con otros medios, detecta también algunas vibraciones producto, por ejemplo, del tránsito vehicular, del consumo normal, de equipos de enfriamiento o subestaciones eléctricas, etc. Por esto es que debe buscarse la coincidencia entre varios gráficos instantáneos que puedan llevar a determinar la posibilidad de alguna fuga con la mayor precisión posible, abordando la sospecha que se tiene a partir de un sondeo previo con el geófono o la alarma de uno o más pre-indicadores.

**g. *Esfera detectora de fugas (Smart ball)***

Es una esfera de espuma con corazón de aluminio capaz de detectar y localizar fugas muy pequeñas. Al ser introducida en la tubería puede recabar información por aproximadamente 15 horas, recorriendo varios kilómetros en su viaje. El tamaño de la esfera se selecciona para una inspección específica y depende del diámetro de la tubería, ubicación de válvulas en línea, el tamaño de los accesorios a través de los cuales se inserta y se recupera, así como la presencia de otras líneas laterales. Normalmente el tamaño de la esfera es la tercera parte del diámetro de la tubería.

Emite un tipo de gráfica continua en el que indica el nivel de ruido encontrado. Como va por dentro de la tubería, tiene la capacidad de eliminar los ruidos exteriores y escuchar únicamente los de las fugas. Contiene un equipo de seguimiento, lo cual además puede dar una idea precisa de la trayectoria de la tubería, que con frecuencia no se conoce en un gran número de redes. No presenta ninguna dificultad con respecto al diámetro o material de la tubería.

Su aplicación es limitada, ya que a pesar de que puede recuperar una gran cantidad de información y dar de la manera más veraz la información acerca de las fugas en una conducción, el costo (actualmente) de un equipo de esta categoría es ciertamente oneroso en nuestro país. Si el beneficio obtenido es menor que la inversión que requiere no sólo localizarlas, sino repararlas, pues evidentemente se verá en seria desventaja con respecto a otros métodos y/o equipos.

**h. *Robots-carro para inspección de tuberías***

En el entendido de que es posible encontrar fugas a través del drenaje, estos equipos de inspección determinados a realizar observaciones al estado de las tuberías, también pueden ayudar a identificar filtraciones en la tubería que podrían resultar de origen potable y así lograr la localización de fugas de agua cercanas (o no) a la tubería de drenaje en cuestión.

Por supuesto son un equipo de apoyo, ya que las detecciones deben realizarse sobre la tubería de agua potable, de manera ideal. Dado que se trata de un equipo de observación, se realiza en tiempo real; se compone de cámaras y lámparas de alto poder, además de un cable guía. Se maneja con un control remoto de corto alcance y permite grabar la video-inspección.

Es de utilidad como parte de una estrategia o simplemente de un procedimiento, ya que de complicarse la detección de algunas fugas sobre la red de agua potable y teniendo elementos suficientes para detectar estas fugas en el drenaje, se tendrá bien dirigida la inspección y se tendrán resultados más concretos al respecto.



Figura 13. Intrusión de agua limpia a tubería de drenaje (fuente: Teasa)

### 3.2.6.3. Procedimiento para la ubicación de fugas utilizando los equipos

#### *\*Instalación de sensores pre-indicadores*

La instalación de estos equipos no es de primera importancia y puede establecerse para redes grandes; para un procedimiento inmediato no tienen mayor relevancia.

Estos equipos, únicamente emiten una alarma de posible fuga en cualquier dirección sobre la tubería partiendo de la ubicación del sensor. Algunos cuentan con data logger, que permite almacenar esta información por un periodo de tiempo para ser descargado en un momento establecido de inicio. Su principio de funcionamiento es sonoro.

Idealmente, se pueden tener este tipo de sensores instalados en puntos estratégicos de la red, de modo tal que pueda mantenerse un monitoreo continuo de grandes extensiones y facilite la localización de las fugas existentes y eventuales.

#### *a. Sondeo*

Consiste en una inspección preliminar de las instalaciones, llevada a cabo con herramientas o equipos que permiten escuchar de manera directa los sonidos emitidos por las fugas (o el consumo normal), entrando en contacto con la tubería o cualquier elemento de ella.

Debe ser desarrollado sistemáticamente, siguiendo ordenadamente los sonidos que se perciban en la tubería y obteniendo como resultado una imagen de los sonidos escuchados en un sitio. Esto permitirá determinar si es necesario seguir con el paso siguiente o si se debe continuar en el siguiente punto con el sondeo.

Es importante que el ejecutor cuente con la experiencia necesaria en la identificación de los sonidos característicos de las fugas en diferentes materiales, a diferentes presiones y con diferente magnitud, garantizando de ese modo que el dictamen que emita sobre su inspección esté sujeto al menor error posible.

#### **b. Correlación de tramos**

Este paso generalmente forma parte de la etapa de detección, sin embargo únicamente en este capítulo se anota en la etapa de localización porque el resultado que emite da la ubicación puntual de una posible fuga, lo cual dirige la confirmación de la fuga a lugares muy precisos.

La correlación de tramos puede realizarse antes o después del sondeo, el orden incidiría en el tiempo de la prueba y la interpretación de los resultados.

Si se efectúa antes del sondeo, podría dar lugar a sospechas infundadas y representaría trabajo adicional, sin embargo, también podría dar un claro indicio de alguna fuga, por lo que los sonidos que se llegaran a escuchar en el sondeo tendrían un sentido dirigido. Si se efectúa después del sondeo, daría el sentido a lo escuchado anteriormente; además reduce trabajo al dirigir la atención únicamente a las líneas con posibilidades claras de fuga.

Las fugas de gran caudal en una línea con suficiente presión (2.5-4.0) suenan sumamente fuerte, por lo que no escaparían al oído del ejecutor del sondeo y, por supuesto, tampoco al equipo de correlación.

#### **c. Confirmación**

Consiste básicamente en confirmar la existencia de una fuga, por una parte, y por otra, en confirmar el sitio en el que se indica la fuga en el paso anterior.

### **3.2.7. Control de fugas**

El control forma parte fundamental del proceso de reducción de pérdidas e implica actividades que si bien por sí mismas arrojan resultados satisfactorios, siendo parte de un procedimiento aumentará su capacidad de recuperación del recurso.

El factor fundamental es el monitoreo continuo del comportamiento de la red. Sus reacciones ante las medidas tomadas y los nuevos requerimientos serán observados en el modelo, el cual debe haber sido retroalimentado con los datos verificados en campo, para representar fielmente las características de la red, ya que los mínimos errores u omisiones pueden representar serias variaciones.

El monitoreo se divide en tres etapas: *inicial, de verificación y de seguimiento*. La primera consiste en monitorear el comportamiento de la red a fin de identificar los puntos neurálgicos de la misma para comenzar a tomar acciones determinadas a mejorar su estado; la segunda consiste en monitorear tanto en campo como en gabinete las reacciones de la red con respecto a las modificaciones que está sufriendo, sin pasar por alto ningún detalle. La última etapa se caracteriza por darle seguimiento a las reacciones que tiene la red y controlar así cualquier alteración que esta sufra, ya que para ésta etapa se conoce el comportamiento que se espera obtener.

Evidentemente es de primera necesidad desde la sectorización el establecimiento de puntos de control en los que pueda observarse gasto, presión, calidad del agua, etc., a razón de tener la información completa, suficiente, uniforme y representativa de cada sector.

Por otro lado, como se anotó antes, la continuidad es la clave de la sostenibilidad de cualquier proyecto, esto implica la capacitación, el mantenimiento, programas periódicos de detección y localización de fugas, actualización del padrón, etc.

### 3.2.7.1. Calidad

El éxito en la eliminación de fugas consiste principalmente en el control de calidad de la reparación. Este control debe ser sumamente estricto y abarca el cuidado de la calidad tanto en los materiales como en la mano de obra.

La calidad en los materiales se puede garantizar mediante certificados obtenidos del fabricante, incluso puede ser determinado en laboratorio realizando arreglos típicos y simulando el comportamiento de la red en las probetas, incluso con proveedores conocidos por años.

La calidad en la mano de obra se puede buscar ofreciendo capacitación continua, incentivos y supervisión adecuada.

#### a. Capacitación

Para una capacitación ideal se pueden identificar tres etapas: conocimiento, integración y evaluación.

41

- i. La etapa de *conocimiento* consiste en dar a saber una actividad determinada, los objetivos que se esperan alcanzar y los procedimientos que se llevarán a cabo para llegar al objetivo.
- ii. En la etapa de *integración* se incluye a cada uno de los actores en la actividad, a quienes se determinará la responsabilidad sobre una parte del proceso, haciendo extensiva la necesidad de que realice adecuadamente su tarea, enfatizando en la dependencia que existe entre cada actividad y logrando que se comprometa con la obtención de los resultados. Durante el desarrollo de esta etapa, se instruye en métodos y técnicas actualizados y estandarizados para el mantenimiento de la red y la eliminación de fugas.
- iii. Finalmente, se promueve una autoevaluación y a la vez se efectúa una *evaluación* sistemática de modo que cada participante se motive a realizar sus tareas cada vez mejor, dando lugar al progreso del equipo y el mejoramiento en sus procesos y sus resultados finales.

En este sentido existen cinco elementos básicos para la integración del cambio, que da lugar a una continua capacitación que permite la innovación y que apoya las etapas de la capacitación adecuada; sin embargo, no hay que dejar de lado los elementos que frenan el avance en cualquier organización.

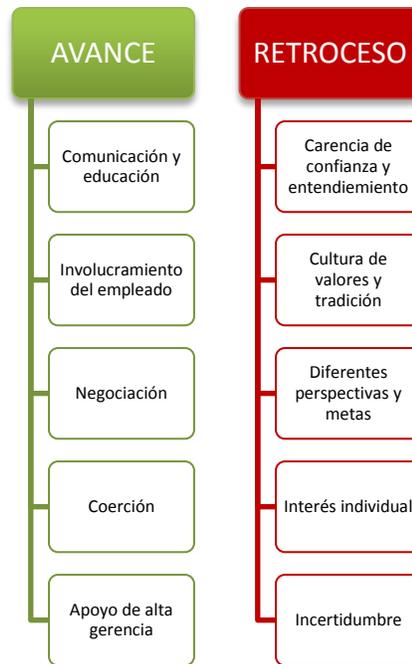


Figura 14. Elementos que influyen en el desempeño de una organización

Un elemento muy efectivo para una evaluación crítica y progresiva, es el benchmarking.

El **benchmarking** es definido por los expertos como un proceso continuo de evaluación con el objetivo de llegar a la excelencia; se supone la práctica continua de comparar el desempeño de una organización contra otra del mismo tipo.

Sus tres ejes de acción son la *calidad*, la *productividad* y el *tiempo*, en busca de una mejor y más ardua competencia, esto sin dejar de lado la eficiencia económica, ya que debe buscarse el mejor desempeño con los recursos estrictamente necesarios.

Este procedimiento se divide en cuatro categorías:

*Interno*. Dentro de una misma organización, se busca el mejoramiento en el desempeño del personal, ya sea dividido en equipos, departamentos, etc. En este se busca el alcance de objetivos claros, específicos, realizables y medibles.

*Competitivo*. Se da entre competidores totalmente aparejados, es decir, que cumplen con las mismas características competitivas para el alcance de un solo objetivo y que en ese entendido, competirán para llegar al resultado final.

*Funcional*. En esta categoría, el objetivo es comparar resultados sin afán competitivo, únicamente con el fin de alcanzar resultados comunes a los de la otra parte tratando de reproducir sus métodos para conseguir dichos resultados.

*Genérico*. Esta categoría se caracteriza por comparar técnicas y métodos y en su caso reproducirlos, todo esto sin tendencia competitiva, ya que se da entre organizaciones sin características competitivas similares, que no

pertenecen a un mismo ramo ni tienen un objetivo común. Sin embargo, los métodos de una resultan aplicables a la organización que busca su mejoramiento, razón por la cual se convierten en un modelo.

Así mismo, existen dos fases en el benchmarking: *medición y proceso*

En la primera fase, las organizaciones únicamente miden y comparan su desempeño con respecto a otras, mientras que en la segunda etapa, las organizaciones ponen en práctica métodos, procedimientos y técnicas para mejorar su desempeño y superar los resultados obtenidos por otras organizaciones en aspectos específicos.

### b. Evaluación y políticas de acción

En tanto una red se deteriora, las pérdidas tienden a incrementarse. Existen cuatro acciones básicas para el manejo de las fugas, de las que fundamentalmente el manejo de la presión es la más importante y con mayor impacto sobre las fugas, propiamente en lo físico.

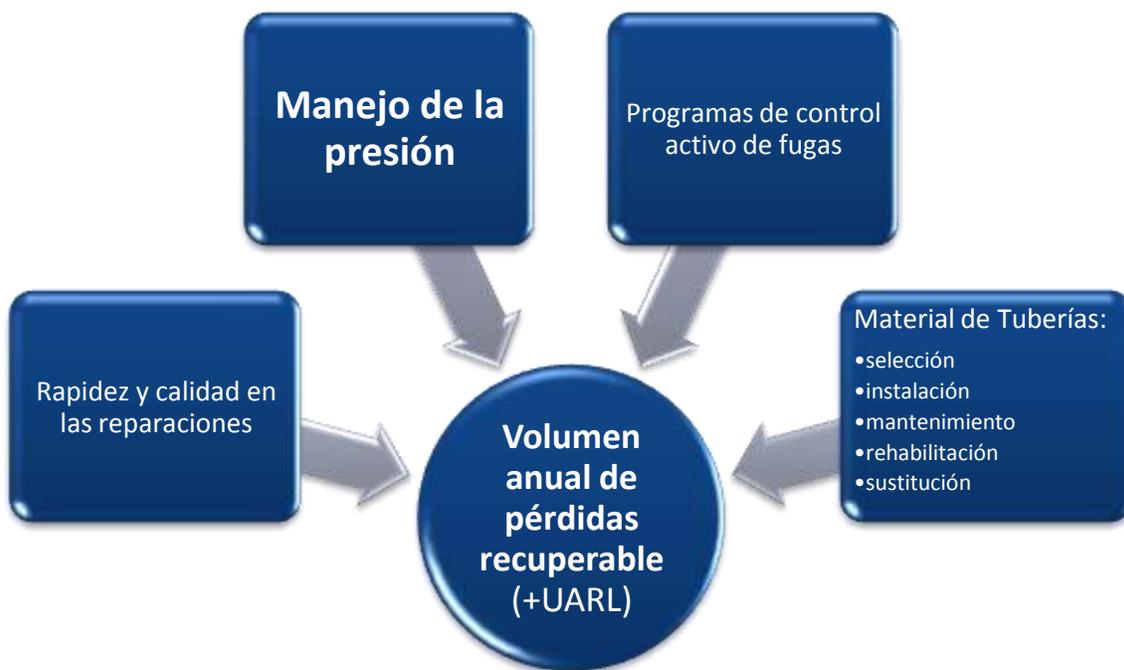


Figura 15. Políticas de acción basados en el UARL para la recuperación de caudales

Para mantener una política de operación adecuada encaminada a la reducción de fugas son de observancia obligada las consideraciones siguientes:

- a. La presión debe mantenerse en un margen de mínimas variaciones, determinadas únicamente por el consumo
- b. La relación que existe entre las altas presiones y la frecuencia con que ocurren nuevas fugas
- c. La relación intrínseca que existe entre la presión corriente y el flujo que escapa por las fugas existentes
- d. Las predicciones que es posible obtener acerca de los efectos de la presión en la cantidad de fugas, el consumo y el cobro
- e. La influencia de los estándares mínimos de servicio y la topografía

### c. Gestión de la calidad

El empleo de las gráficas mencionadas para la evaluación del desempeño de una red se pueden ajustar a modelos estadísticos comunes y sumamente prácticos.

Por ejemplo, un histograma es una gráfica de frecuencias y se utiliza para evaluar la distribución de los datos de diferentes categorías de un mismo aspecto; las gráficas de Pareto son utilizadas para evaluar dos aspectos relacionados entre sí, ya que se trata de una gráfica de barras asociada a una línea y se puede aplicar a la “regla” 80/20<sup>15</sup>. Por ejemplo, la inversión que se realiza en reparación de fugas mensualmente asociada con el ahorro que representa la reducción de pérdidas en el mismo periodo.

Por otro lado, existen las gráficas de control, que son sumamente claras y que resultan las más efectivas para la evaluación, tanto como del desempeño de una red como de sus operadores, además de poder evaluar estrategias de manera puntual y tener control sobre esto. Esto se logra asignando valores límite tanto altos como bajos y, de este modo, introducir los valores obtenidos de la observación para su evaluación gráfica con respecto a los límites establecidos, asignando además un valor aceptable de falla.

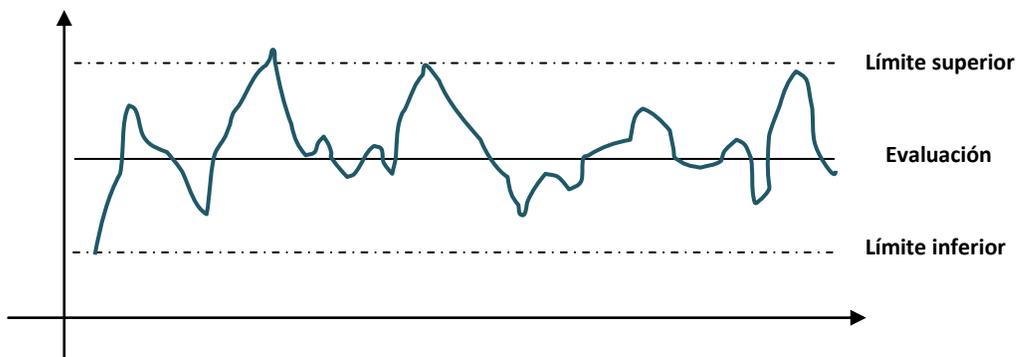


Figura 16. Ejemplo de gráfica de control para la evaluación de diversos aspectos

Un mapa de flujos ayuda a llevar a cabo procesos de manera ordenada y ofrece la posibilidad de evaluarlos y así poder encontrar el punto de la falla o la clave del éxito en él, logrando así mejorar cualquier aspecto en la búsqueda de la calidad.

### d. Jerarquización y selección de estrategias

La medición, como se ha dicho, es un punto de partida en lo que es la detección y localización de fugas. La jerarquización de estrategias dependerá de los indicadores seleccionados para la evaluación y diagnóstico de la red en cuestión.

<sup>15</sup> Regla que dicta que el 80% de una inversión se realiza sobre el 20% de un proyecto, mientras que el 20% restante de la inversión se realiza en el 80% de un proyecto.

Es de fundamental importancia determinar un periodo de acción en el que sean evaluables los resultados obtenidos con las estrategias implementadas, de modo que resulte económica y técnicamente posible hacer un oportuno cambio en las estrategias de manera que se obtenga de esto un beneficio y no un desperdicio de recursos sin resultados tangibles.

Para esto, hay que mantener un monitoreo continuo de las acciones y los resultados obtenidos, mediante fechas y puntos clave.

El primer indicador es la diferencia entre el consumo y el suministro, para conocer cuánto de lo que se extrae se está perdiendo en fugas. Esto se expresa generalmente como un porcentaje y es comparable con las pérdidas que se tienen en otras redes (% de pérdidas con respecto al volumen suministrado). Esto únicamente dimensiona, de alguna manera, el problema generalizado que se tiene en la red completa, incluyendo consumidores, pero no indica el estado en el que se encuentra la red ni el rubro en que se está perdiendo la mayor parte del recurso y sobre el cual se tienen que tomar acciones inmediatas.

El segundo indicador es la pérdida por zona o por sector, en caso de que se haya sectorizado ya (caso ideal). Este indicador, presentado como el porcentaje de pérdidas que se tiene en cada zona con respecto al total de pérdidas en la red, direcciona la atención prioritaria hacia un área en específico, permitiendo atender la zona con mayor problema, independientemente de si éste tiene fallas esencialmente en la red principal, la secundaria o los usuarios.

De acuerdo al tamaño y características del sector puede ser conveniente sub-sectorizar la red para obtener en una menor área las pérdidas asociadas a la misma. De este modo, se procederá como arriba para jerarquizar zonas más reducidas y específicas.

Debe ser considerado el UARL (descrito anteriormente), ya que es el objetivo que se pretende alcanzar y que es económica y técnicamente viable y realizable.

Por otro lado, se atiende a algunos indicadores principales mencionados en el capítulo anterior:

- ⇒ Volumen de pérdidas por toma por unidad de tiempo
- ⇒ Volumen de pérdidas por unidad de longitud por unidad de tiempo

La información necesaria para la obtención de éstos índices es obtenida de la práctica del monitoreo inicial y continuo.

Todos estos indicadores serán de gran utilidad para la correcta selección de estrategias, tanto iniciales como continuas, ya que el conjunto de ellos y de otras acciones previas darán el panorama del punto neurálgico del problema que habrá que atacar con mayor prioridad.

Por ejemplo, si el volumen de pérdidas al interior de las dependencias fuese un porcentaje importante con respecto al total y que superara las previsiones, la acción principal sería evaluar el estado de cada red interna, así como de sus puntos de consumo y localizar las fugas mediante los métodos apropiados para el caso. Sin embargo, si estas pérdidas representaran una parte poco significativa, las acciones fundamentales se enfocarían a la red principal. A partir de esta conjetura, la estrategia a seguir dependería de indicadores como las pérdidas por zona, por km de tubería, mayor frecuencia de fugas, etc.

#### **e. Cambio oportuno de estrategias**

Una estrategia deja de ser exitosa cuando el resultado se aleja sustancialmente del éxito esperado. Para esto, es determinante indicar desde el principio qué tan alejado se aceptará estar del resultado esperado y, en función de esto, se hará oportuno el cambio en la estrategia.

Se enfrenta entonces una segunda disyuntiva, cuál estrategia o acción específica a elegir. Inicialmente es necesario identificar la falla concreta que ha devenido en el fracaso o falla parcial de la estrategia. Posterior a esto, considerando las posibilidades más próximas previamente evaluadas, la estrategia puede ser mejorada o sustituida, no dejando de lado la determinación de nuevas metas a lograr.

Posterior a la evaluación de las estrategias y la proposición de nuevas metas, se buscará lograr mejores resultados que los obtenidos anteriormente. Para esto, es fundamental calendarizar cada acción que se realiza sobre la red, mediante una bitácora del día a día.

En las tablas que aparecen a continuación, se ejemplifica la evaluación de estrategias emprendidas y la proposición de nuevas metas a alcanzar. El uso de indicadores numéricos es fundamental porque es fácilmente medible y comparable, sin embargo, la tabla muestra valoración de las estrategias y de las fallas, con el objetivo de dar un dictamen y después de esto continuar o partir hacia nuevas estrategias. Los detalles de cada acción son importantes en la medida en que se requiera, vale considerar que los detalles no son más que un resumen de las acciones fundamentales llevadas a cabo y que representan el eje de la estrategia.

Tabla 4. Ejemplo de evaluación de estrategias aplicadas para la recuperación de caudales

Evaluación de estrategias				
Estrategia de recuperación de caudales		acciones fundamentales realizadas	posible falla	actividades clave
Acción inicial	Sectorización	Cierre sistemático de válvulas para seccionamiento Verificación de estabilidad de presión en manómetros dentro de cada sector	Válvulas en mal estado que dificulten la hermeticidad del cierre	Comunicación y coordinación. Previo mantenimiento de válvulas
Acción de control	Regulación de la presión mediante VRP	Desviación de flujo por instalación de válvula y macromedidor/apertura de válvulas de sectorización. Calibración de válvula al 50% de la presión aguas arriba.	Falta de control en manipulación de válvulas, rompimiento de la sectorización	Calibración adecuada de válvula
Acción adicional a control	Programa diurno de detección de fugas	Sondeo en tomas y cruceros Correlación de tramos	Posible frecuencia de usos del agua durante la operación	Distribución adecuada de los equipos
Redireccionamiento de campaña	Programa nocturno de detección de fugas	Sondeo en tomas y cruceros Correlación de tramos		Distribución adecuada de los equipos. Usos mínimos a nulos en la red

Evaluación de estrategias								
Estrategia de recuperación de caudales		indicador	valor esperado	variación aceptable	valor inicial	valor final	valor de la variación	valoración
Acción inicial	Sectorización	% fugas respecto a suministro	45%	(+ -)5%	52%	48%	7%	ganancia muy aceptable
Acción de control	Regulación de la presión mediante VRP	% fugas respecto a suministro	26%	(+ -)15%	52%	31%	19%	ganancia aceptable
Acción adicional a control	Programa diurno de detección de fugas	% fugas respecto a suministro	20%	(+ -)20%	31%	28%	40%	ganancia no aceptable
edireccionamiento de campaña	Programa nocturno de detección de fugas	% fugas respecto a suministro	20%	(+ -)10%	28%	23%	15%	ganancia poco aceptable

### 3.2.8. Casos exitosos en el mundo

Lo que principalmente ha definido el éxito en la reducción de pérdidas alrededor del mundo es la innovación en métodos y técnicas de reducción. Más allá del empleo de tecnología, la metodología y los procedimientos han sido el punto central de los programas de reducción. El mejoramiento en los equipos más modernos ha facilitado notablemente los trabajos, sin embargo, la modificación de las políticas de operación en diversas redes, además de la investigación sobre las causas de las fugas y el efecto de la presión en ellas han alcanzado metas insospechadas.

#### 3.2.8.1. Implementación de distritos de medición

Mediante la implementación de los distritos de medición, países como *Estados Unidos, Canadá, Malasia e Indonesia*, han logrado reducir sus fugas hasta en un **50%**, ya que mediante esa técnica han identificado claramente el nivel de fugas susceptible de ser recuperado, por supuesto en combinación con otros instrumentos.

Por otro lado, en *Chipre*, el análisis de datos históricos sobre incidencia de fugas y sus características y efectos causales, dio lugar a la rehabilitación de tuberías. El estudio realizado indicó lo que se muestra en la tabla siguiente, donde claramente se tiene una alta densidad de conexiones, un suministro de más de 80 m<sup>3</sup>/año, que resulta una dotación de 220.8 L/hab/día., que es superior al promedio mundial.

Tabla 5. Diagnóstico de la red en Chipre

Edad de tuberías	50 años
Longitud de tuberías	795 km
Rango de diámetros	4" ≥ 10"
Residentes	170,000
Medidores de consumo	64,000
Volumen anual suministrado	13,700,000 m <sup>3</sup>
Área	70 km <sup>2</sup>
Zonas de presión divididos en	Distritos de medición
Tamaño de DMA	50 a 7000 propietarios (3000 promedio)

El análisis de riesgo de falla se hizo a través de un análisis numérico por zona de presión (que contiene uno o más distritos de medición) evaluando datos históricos de incidencia de fugas (cómo y cuando suceden), para identificar y definir patrones de comportamiento de la red, de modo que se pudiesen prever nuevas fugas y eventualmente prevenirlas.

Esto permite al organismo operador revisar el estatus de su red en términos de dónde y cuándo se presentan las fugas y determinar acciones específicas para la disminución o eliminación del factor de riesgo de falla.

Una de las observaciones principales que se notó es que el factor principal que causa la falla es la antigüedad de las tuberías y que el factor que representa menor riesgo es la intervención externa.

La mayor parte de las fugas no reportadas, identificadas y localizadas en tres años se presentaron en tuberías de acero y el total de agua recuperada fue de 140 000 m<sup>3</sup> al año, que representa un valor monetario de US\$ 45,000(0.32 US\$/m<sup>3</sup>) por año.

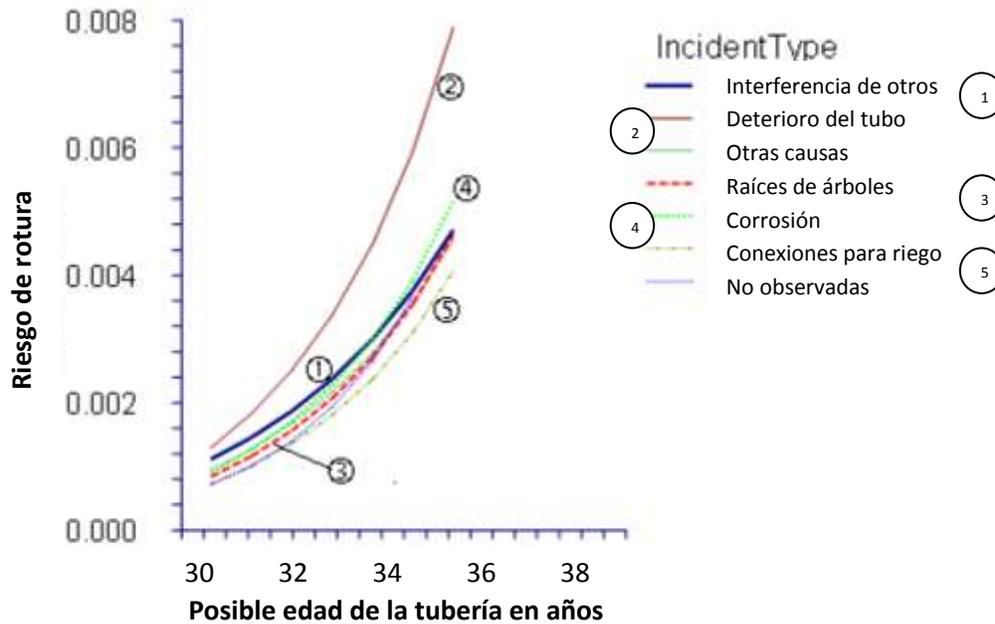


Figura 17. Riesgo de rotura de las tuberías por su edad, influido por factores que provocan fugas

### 3.2.8.2. Evaluación de aspectos económicos

En un estudio realizado en Budapest, se observó que las acciones correctivas para la disminución de pérdidas representan un costo mayor que las acciones preventivas. Sin embargo, las acciones orientadas, que no son otra cosa que las actividades específicas de mantenimiento, resultan mejor inversión a largo plazo que cualquiera de las otras dos estrategias, que son atención a emergencias y prevención de apariciones.

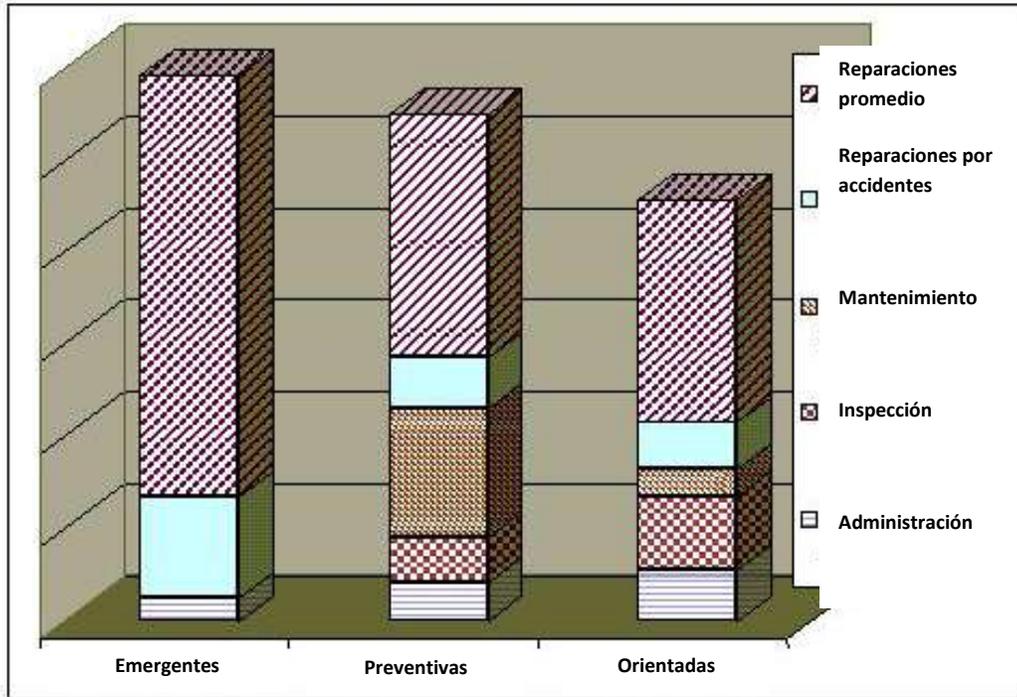


Figura 18. Evaluación de inversión en acciones emprendidas en la red de Budapest

### 3.2.8.3. Aplicación de acciones de recuperación de caudales

La extracción de agua en *Ginebra* es de aproximadamente 70Mm<sup>3</sup> anuales para 450,000 clientes. Mediante el método de la IWA, Geneva Water estimó un total de pérdidas del 13.7% de las extracciones., de los cuales, la mayor parte eran pérdidas reales y en menor medida las pérdidas aparentes.

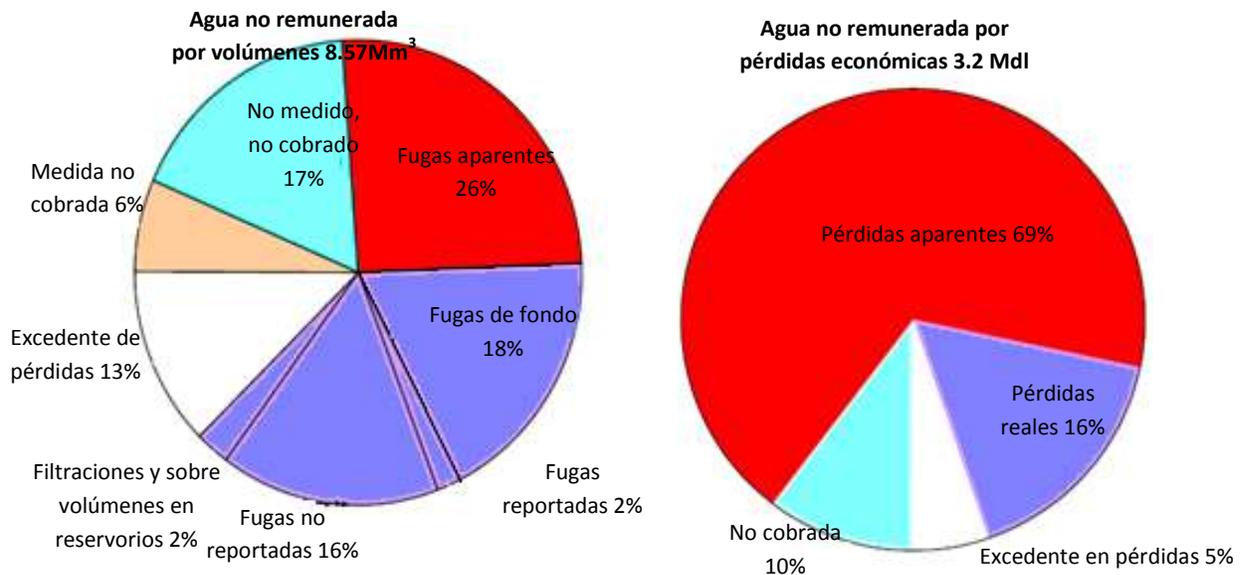


Figura 19. Balance hidráulico y comercial de la red de la ciudad de Ginebra (2005)

Algunas acciones fueron sumamente simples y se llevaron a cabo de inmediato, como la prevención de los desperdicios por roturas en las tuberías por el frío del invierno. Sin embargo, otras requirieron de mayor planeación e inversión para fijar un valor aceptable de pérdidas como límite.

La primera acción estratégica, enfocada a la reducción de pérdidas aparentes, fue el chequeo de medidores y el muestreo de algunos para la determinación de índices. Esto permitiría tener mayor exactitud en el análisis de las pérdidas y de esta manera se dará lugar a las acciones adecuadas para la reducción de las mismas.

La segunda acción, determinada a la reducción de pérdidas tanto reales como aparentes, fue la sectorización con control de presiones, el cálculo del ILI y la renovación de medidores. Mediante estas actividades, se implementarían las acciones de reducción directas, se fomentaría la investigación y el mejoramiento de las técnicas para tal fin.

Se encontró que más del 50% de los medidores muestreados tenían un error de medición del 30%. Se consideró como posibilidad que la mayoría de los medidores estaban sobre dimensionados, por lo que no medían con precisión los caudales mínimos, que corren la mayor parte del tiempo, operando entonces a menos del 50% de su capacidad.

Por otro lado, las acciones de reducción fueron iniciadas sin ninguna investigación previa. El ILI fue estimado entre 2.3 y 3, por lo que se considera que su infraestructura hidráulica se encuentra en un estado medianamente adecuado. En cuanto a los sectores hidráulicos, se observó la presión máxima en  $7.5\text{kg/cm}^2$ , se identificaron los requerimientos y los elementos necesarios para la reducción de la presión.

La presión y el gasto tienen un comportamiento similar, de modo que las fugas de fondo se notan disminuidas en caudal cuando se reduce la presión, lo que lleva a una inminente reducción de pérdidas.



Figura 20. Fórmula implementada en la red de la ciudad de Ginebra

# CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA

## 4.1. Estimación de pérdidas

Como primera acción en el desarrollo de un programa de reducción de pérdidas se deben estimar las mismas para tener un claro dimensionamiento del problema al que se ha de atacar y, por supuesto, tener mediante indicadores un punto de partida y que éstos faciliten la continua evaluación del avance que se tenga en un momento determinado.

El agua potable en Ciudad Universitaria proviene de tres pozos que se encuentran dentro del territorio universitario. La energía eléctrica empleada por concepto de bombeo resulta sumamente onerosa. La Universidad tiene la obligación de reportar a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) los volúmenes de agua extraídos de los pozos mencionados.

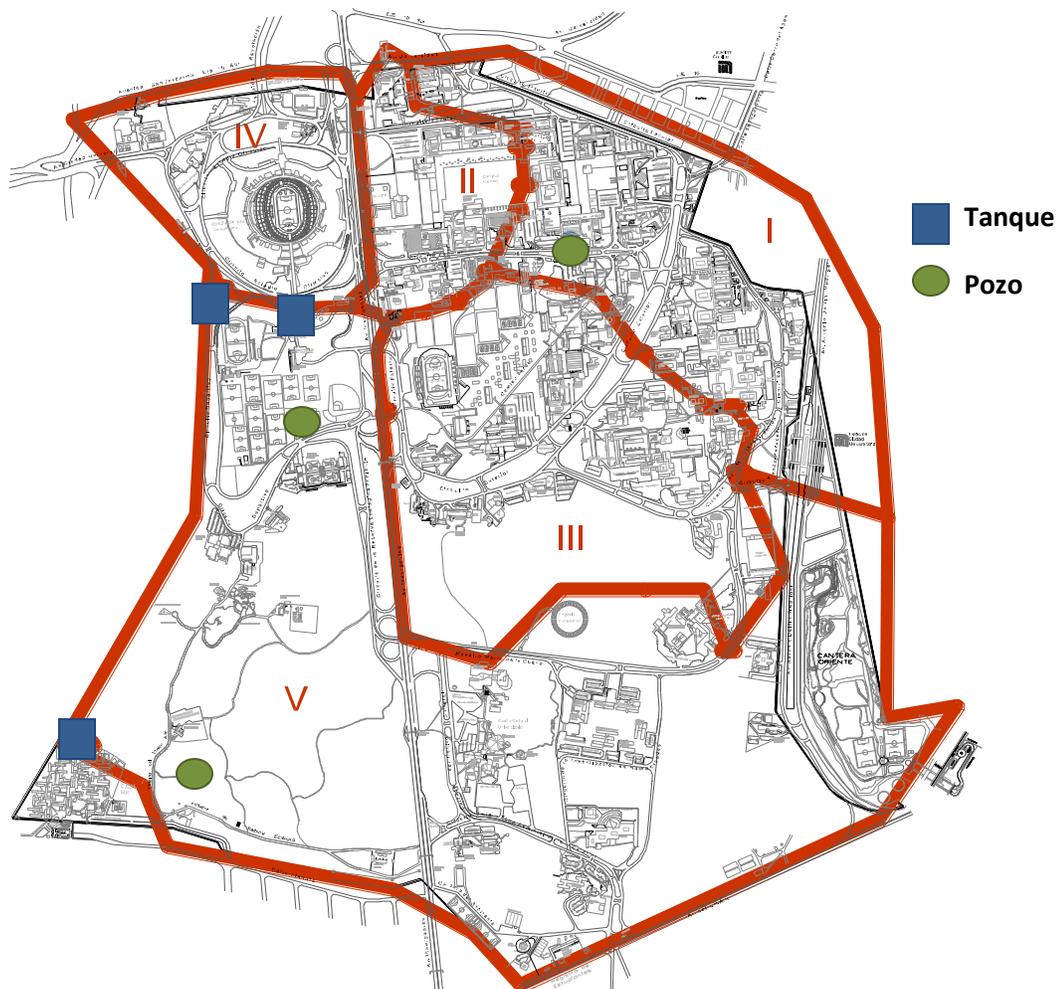


Figura 21. Fuentes de abastecimiento y estructuras de almacenamiento en Ciudad Universitaria (y sectores hidráulicos)

La instancia mide estos volúmenes de agua a través de medidores de propela instalados en cada uno de los pozos, los cuales deben ser monitoreados por el personal de operación de la Universidad y cuyos registros horarios deben coincidir al momento de la revisión de la CONAGUA.

Ciudad Universitaria cuenta además con tres tanques de almacenamiento en los que, tal como en los pozos, se tiene instalado un medidor a la salida de cada tanque del mismo tipo que aquellos y de los que también existe un registro horario emitido por el personal de operación.

Estos registros fueron solicitados a la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM (DGOOC) para su captura en modo electrónico de manera que se pudiesen obtener curvas horarias y así conseguir el patrón de extracción y el patrón de consumo en el campus. Con esta información y algunas estimaciones del consumo de la población universitaria se logró un balance hidráulico que permitió estimar las pérdidas de agua potable en porcentaje<sup>16</sup>.

Se llegó a la apreciación de que en Ciudad Universitaria se perdía aproximadamente el 50% del agua extraída de los pozos en fugas.

Esta aseveración llevó a tomar inmediatamente cartas en el asunto, proponiendo de inicio la sectorización de la red de agua potable de Ciudad Universitaria, entre otras estrategias de éxito en el mundo. Para esto, se llevaron a cabo algunas acciones en un periodo de experimentación y, posteriormente se organizaron mejor para obtener mayores resultados, como se describe en adelante.

54

## **4.2. Programas piloto**

Diversos procedimientos practicados en el mundo fueron implementados en Ciudad Universitaria en una primera etapa en la que no se contaba con medición, equipo especializado y otros beneficios que permiten integrar técnicas y métodos tendientes a mejorar las estrategias para la recuperación de caudales.

Todos estos medios arrojaron resultados favorables, sin embargo, éstos fueron escasos y aislados, no propiamente parte de un programa estratégico. No obstante, sirvieron de experiencia para, precisamente, integrar más adelante una estrategia que incluyera todos estos elementos desligados y permitiera obtener resultados efectivos.

## **4.3. Estrategias exitosas**

A consecuencia de todos los medios experimentados y sus escasos resultados obtenidos, se optó por cambiar la estrategia, de modo que pudiesen obtenerse efectos más concretos. Haciendo la lectura de los resultados de las acciones anteriores, tenemos lo siguiente:

---

<sup>16</sup> Ing. J. Daniel Rocha Guzmán. Sectorización de la red de agua potable de Ciudad Universitaria. Tesis de licenciatura, 2010.

Tabla 6. Actividades realizadas

ETAPAS		Acciones primarias	Resultados previos	Acciones secundarias	Resultados
SIN MEDICIÓN	MACROMEDICIÓN	Captura y procesamiento de registros de pozos y tanques	Estimación de pérdidas y dimensionamiento de macromedidores	Panorama de pérdidas	Aislados
		Estadísticas	Mapa de fugas (reportadas)	Clasificación general de las fugas	
		Visitas de campo para observación de fugas en vivo	Detalle y especificación de fugas con gastos asociados	Asociación e identificación de gastos de fuga y sus características	
	MICROMEDICIÓN	Sectorización (5 sectores hidráulicos)	Control sectorial de presiones, identificación de zonas de consumo	Proposición de macromedidores y válvulas reguladoras de presión	Transitorios
		Adquisición de equipo para localización de fugas	Algunas fugas detectadas	Creación de procedimiento para la localización de fugas	Contundentes
		Recorridos de inspección a la red de drenaje	Identificación de gastos inusuales en la red.	Sistematización de recorridos al drenaje	
			Localización de una fuga mayor y dos menores	Mapa de flujos en la red de drenaje	
		Adquisición de equipo para detección de fugas	Detección y localización de una fuga de gran caudal	Creación de un plan de detección en líneas principales	
		Detección y localización de fugas en líneas principales	8 fugas en 4 km de tuberías principales detectadas y localizadas, <i>confirmadas como no existentes</i>	Asociación de características preliminares, resultados obtenidos y observaciones particulares	
		Cambio de estrategia, formulación de planes de subsectorización, medición y análisis	Identificación de zonas con más fuga (lps) de cada sector hidráulico	Jerarquización y sistematización de acciones anteriores	
Subsectorización total o parcial de sectores hidráulicos	Localización de 20 fugas, dos de caudal importante	Monitoreo y supervisión de la reparación de cada fuga			

#### 4.3.1. Inicio de la medición

A partir de éste momento, se comenzó la sectorización paulatina de la red, con lo que se dio inicio una etapa de control en ella, sin embargo, se continuó sin medir los grandes sectores de manera continua, haciéndolo únicamente de manera eventual.

Así mismo, se comenzó la micro-medición, que si bien es una acción que da resultados contundentes, en el caso de CU fue un elemento de discrepancia, ya que no se estaba siendo consistente en el avance, llevándolo a cabo en tiempos y sitios regidos por el avance en la comunicación del programa.

#### 4.3.2. El balance hidráulico

Las extracciones de agua de los pozos hasta 2008 se registraron de manera manual y se sabe que se extraen casi 3 millones de metros cúbicos al año en promedio. La población de Ciudad Universitaria hasta ese año 2008 se contemplaba en 131,682 personas, con una tendencia al crecimiento; para 2010 era de 145,506 personas.

Tabla 7. Extracciones anuales de cada pozo

Pozo	Capacidad instalada (lps)	Extracción m³/año			
		2006	2007	2008	Promedio
Química	31	655,685	349,972	264,335	423,331
Multifamiliar	91	1,482,845	1,464,206	1,995,088	1,647,380
Vivero Alto	48	778,714	684,081	674,630	712,475
<b>TOTAL</b>	<b>170</b>	<b>2,919,250</b>	<b>2,500,266</b>	<b>2,936,061</b>	<b>2,785,192</b>

Los días hábiles al año en Ciudad Universitaria son aproximadamente 273 y los días de riego 112.

Tabla 8. Estimación del consumo de agua por tipo de usuario en Ciudad Universitaria

Estimación del consumo de agua potable en Ciudad Universitaria						
Población	no. Hab	Consumo humano			días hábiles al año	Consumo
		[lt/hab/día]	[lt/día]	[m³/día]		[m³/año]
Administrativa	9,541	40	381,640	382	273	104,188
Academica	21,899	40	875,960	876		239,137
Estudiantil	100,242	20	2,004,840	2,005		547,321
<b>Subtotal</b>	<b>131,682</b>	-	<b>3,262,440</b>	<b>3,262</b>		<b>890,646</b>
Riego	Tot Ha	Cons/ha	Cons/Terr	Cons/Terr	días de riego al año	Cons/Terr
		[lt/día]	[lt/día]	[m³/día]		[m³/año]
	100	30,000	3,000,000	3,000	112	336,000
<b>Total</b>		<b>30,000</b>	<b>6,262,440</b>	<b>6,262</b>	-	<b>1,226,646</b>

56

De esta manera se estimaron las pérdidas en más el 56% de las extracciones, lo cual no sólo representa una pérdida del recurso sino un gasto excesivo de energía eléctrica por bombeo.

Tabla 9. Estimación de pérdidas de agua anuales en Ciudad Universitaria

Estimación de pérdidas			
Extracción	Consumo	Pérdidas	
[m³/año]	[m³/año]	[m³/año]	% extracción
2,785,192	1,226,646	1,558,546	56%

Estas estimaciones ofrecieron un panorama no muy claro pero sí suficiente para iniciar pronto la implementación de estrategias de reducción y dio pie en un principio a la necesidad de conocer los problemas que desembocaban en las grandes pérdidas estimadas.

Tabla 10. Mediciones puntuales realizadas de 2008 a 2010 en los sectores hidráulicos

Mediciones puntuales de los sectores hidráulicos										
Sector	Primera medición		Segunda medición		Tercera medición		Cuarta medición		Quinta medición	
	Q FUGAS	Vol FUGAS	Q FUGAS	Vol FUGAS	Q FUGAS	Vol FUGAS	Q FUGAS	Vol FUGAS	Q FUGAS	Vol FUGAS
	lps	m <sup>3</sup> /día	lps	m <sup>3</sup> /día	lps	m <sup>3</sup> /día	lps	m <sup>3</sup> /día	lps	m <sup>3</sup> /día
I	20	1693	16	1417	16	1417	12	1071	n.e.	-
II	5	397	5	415	n.e.	-	7	605	n.e.	-
III	9	786	10	881	13	1123	18	1512	20	1685
IV	2	173	2	173	n.e.	-	1	66	1	66
V	13	1123	n.e.	-	15	1296	15	1296	n.e.	-
<b>SUMA</b>	<b>48</b>	<b>4173</b>	<b>33</b>	<b>2886</b>	<b>44</b>	<b>3836</b>	<b>53</b>	<b>4550</b>	<b>20</b>	<b>1750</b>
n.e.: no efectuada										

La medición puntual es entonces una útil herramienta en los trabajos de detección y localización de fugas.

#### 4.3.3. Clasificación de las fugas

Las fugas se pudieron clasificar por su tipo, su causa, el material o el diámetro del tubo o elemento dañado, entre otras.

Esto permitió asociar las zonas afectadas con sus características y direccionar campañas de detección de fugas, considerando el tipo de fuga que se esperaba encontrar en la zona y definir el principal factor que estimuló la incidencia de fugas ahí.

La clasificación es propia de Ciudad Universitaria, y el objetivo principal fue la construcción de un formato que ayudara a la recolección de datos reales y el control de la información, así como la determinación de las acciones necesarias para dar solución a cada tipo de problema en cada zona.

#### 4.3.4. Formación de estadísticas

Las estadísticas sobre la incidencia de fugas en CU se formaron a partir de las órdenes de trabajo emitidas por la Dirección de Obras y Conservación (DGOC) como control de actividades para los trabajadores de los diferentes talleres de la dependencia.

De éstas se obtuvo una gran cantidad de información, aunque también una gran cantidad de ambigüedades acerca de ella, lo cual representó un reto para la agrupación y clasificación de los datos obtenidos.

El objetivo de este trabajo fue constituir un panorama que permitiera ponderar el problema y establecer un criterio en la incidencia de fugas, de modo que se tuviera un “mapa de incidencia de fugas” y, de esta manera, obtener un punto de partida para la búsqueda de las fugas estimadas inicialmente (punto 4.1).

#### 4.3.4.1. Observaciones de las estadísticas de la incidencia de fugas visibles

La conclusión de las estadísticas ha formado un panorama muy claro sobre la incidencia de las fuga visibles. Por principio se notó una tendencia de disminución en la incidencia de fugas, por lo que se espera que en los próximos años esta tendencia se vea en la realidad.

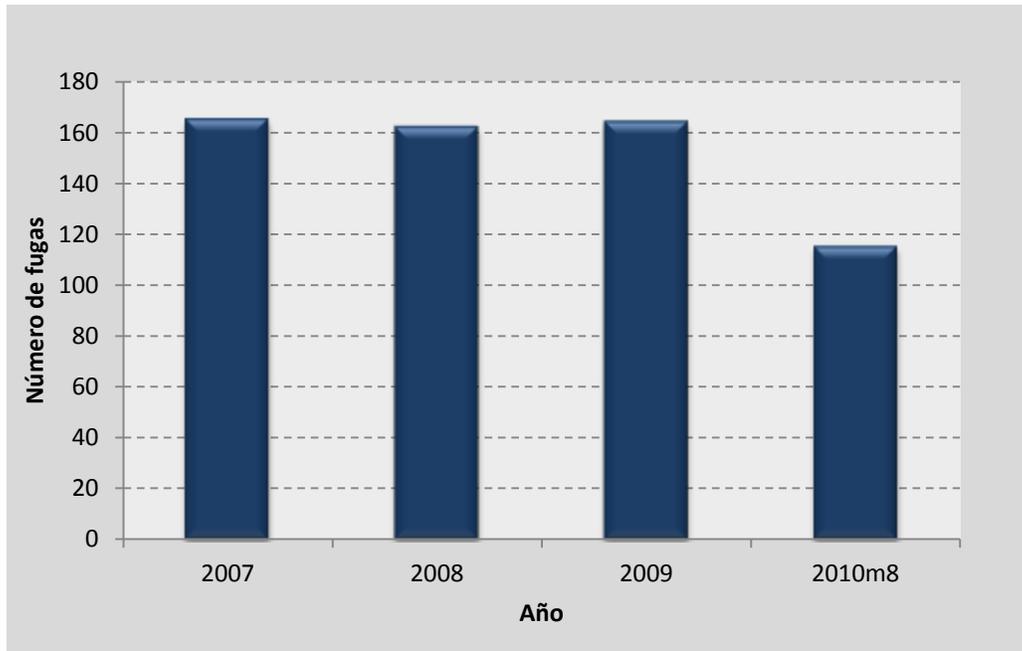


Figura 22. Fugas visibles reportadas por año y su tendencia (m8: datos hasta agosto)

58

Se encontró que los sectores hidráulicos con mayor incidencia de fugas (visibles) son el 1, 3 y 2, en ese orden, mientras que el 5 y 4 tienen menor número de fugas atendidas. Los meses en los que se atienden mayor número de fugas son los periodos de enero-abril y septiembre-noviembre.

Tabla 11. Incidencia de fugas por sector hidráulico

Incidencia de fugas por sector				
Sector	2007	2008	2009	2010 <sub>m8</sub>
1	86	92	90	45
2	49	46	45	18
3	65	69	61	33
4	9	16	10	8
5	28	29	39	11
<b>TOTAL</b>	<b>237</b>	<b>252</b>	<b>245</b>	<b>115</b>

Cabe mencionar que la DGOC cuenta con dos administraciones para la conservación; la división central atiende principalmente la red de los sectores 1 a 4 y sólo en casos especiales el sector 5, mientras que la división de la zona cultural se encarga de trabajos menores en el sector 5, de manera que muchas de las fugas en este sector no fueron consideradas en estadísticas por falta de información al respecto.

En cuanto a las causas y tipo de las fugas, los datos durante 2007 y 2008 estuvieron sumamente dispersos, debido a que el personal del taller maneja únicamente órdenes de trabajo que contienen información muy básica y no son de utilidad para la clasificación de las fugas; sin embargo, para 2009 y 2010 se pudo contar con gran apoyo del personal de operación y así obtener información más específica de las mismas ordenes de trabajo. A partir de esto se diseñó un formato (ver 4.3.12.3, iv) para el registro de las fugas con todas las características necesarias para su clasificación, de modo que se pudiera contar con información completa, concreta y específica de cada evento para la construcción de estadísticas reales.

**Tabla 12. Incidencia anual de fugas de 2007 a 2010 por su origen**

Incidencia de fugas por origen				
Origen	2007	2008	2009	2010 <sub>m8</sub>
Antigüedad	24	17	32	31
Impacto accidental	15	14	24	10
Corrosión e incrustaciones	20	11	16	14
Fluctuación de presión	16	8	6	2
Mala calidad de material	12	3	6	2
Detalles constructivos	8	4	17	3
Asentamiento	0	1	14	5
Vandalismo	5	5	16	3
Desconocido	132	179	92	45
Otros	5	10	22	0
<b>TOTAL</b>	<b>237</b>	<b>252</b>	<b>245</b>	<b>115</b>

59

**Tabla 13. Incidencia anual de fugas por su tipo**

Incidencia de fugas por tipo				
Tipo	2007	2008	2009	2010 <sub>m8</sub>
Falla de accesorio	29	14	24	19
Falla en junta	18	12	13	3
Válvula de acoplamiento rápido (var <sup>17</sup> )	67	67	54	25
Tubo picado	22	29	26	10
Tubo fisurado	6	2	8	5
Tubo roto	16	18	20	16
Tubo dañado	17	11	31	16
Desconocido	62	99	69	21
<b>TOTAL</b>	<b>237</b>	<b>252</b>	<b>245</b>	<b>115</b>

<sup>17</sup> Válvula para inserción de acoplador para colocación de aspersor o arreglo con manómetro

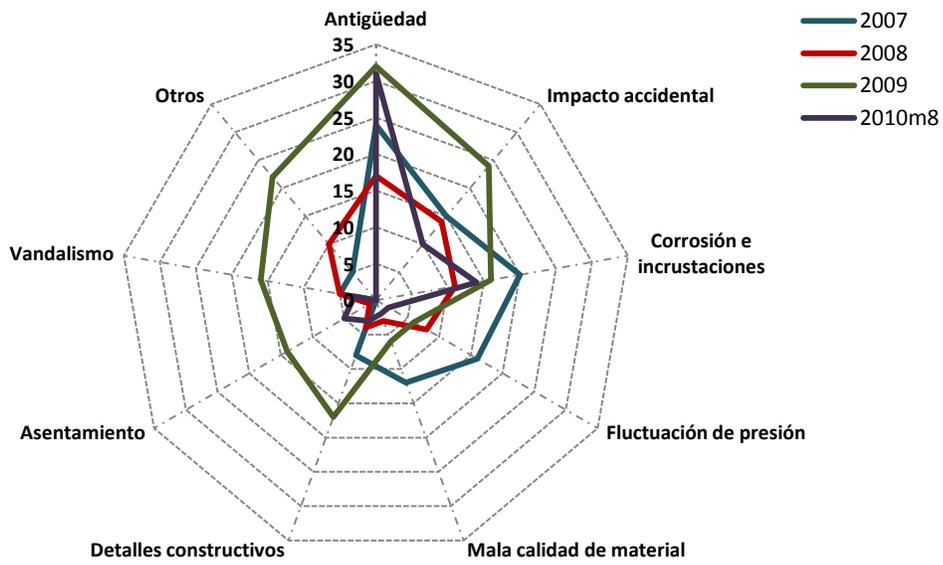


Figura 23. Incidencia de fugas por su origen

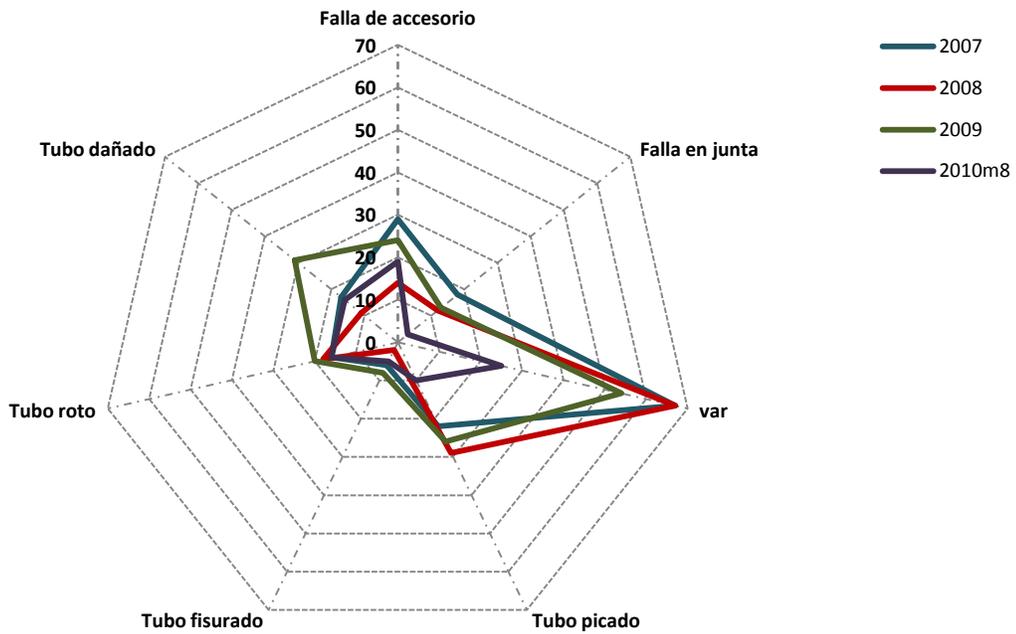


Figura 24. Incidencia de fugas por su tipo

Es común que en los meses de lluvias y los periodos vacacionales aumente el número de fugas, por efecto de la permanencia prolongada de altas presiones en muchas zonas de la red.

Los meses en que se presentan mayor número de fugas son el periodo de enero a abril y noviembre. La tendencia para estos periodos es mantener un comportamiento típico y probablemente reducirlo; en cuanto a los meses de mayo y junio, se tiene un nivel medio de fugas y la tendencia es disminuirla. Julio y agosto son los meses en que se atienden menor número de fugas, así como diciembre, aunque los dos primeros tienden a disminuir, contrario al tercero cuya tendencia es aumentar. En cuanto a septiembre y octubre, generalmente presentan niveles medios de fugas, pero no tienen una tendencia marcada a disminuir, sino conservarse. De 2007 a 2010 se ha notado una importante reducción en el número de fugas atendidas y esto ayuda a prever una tendencia de reducción en lo futuro, por supuesto manteniendo el control de la red como hasta este día.

Lo anterior porque al identificar las fechas de los movimientos más importantes que se han dado en la red se puede notar que durante los meses subsiguientes a la sectorización se da un efecto positivo en cuanto a la aparición de fugas visibles.

Analizando la incidencia de fugas por sector, se puede notar que al sector 1 mantiene una tendencia del mayor número de fugas al año, seguido por el sector 3 ; sin embargo, se trata de dos los sectores de mayor área, por lo que contienen mayor densidad de tuberías y por ende mayor número de fugas visibles.

Por su parte, el sector 2 presenta mayor número de fugas que el sector 4, a pesar de que el área de ambos sectores es similar, sin embargo el sector 4 tiene mayor densidad de tuberías.

A pesar de que el sector 5 envuelve una gran área, mayor que la de los otros sectores, el número de fugas atendidas por año es bajo, probablemente porque gran parte del sector es atendido por la división de talleres de conservación de la zona cultural y no de la zona central.

**Tabla 14. Índice de pérdidas por sector hidráulico**

Sector	Área	No. fugas /año	Fugas/km <sup>2</sup> /año	Longitud de tuberías	Lugas/km tubería
	km <sup>2</sup>			km	
1	1.3	78	61	18	4
2	0.4	40	99	6	7
3	1.4	57	40	12	5
4	0.6	11	17	3	4
5	3.9	27	7	15	2
<b>TOTAL</b>	<b>7.7</b>	<b>213</b>	<b>224</b>	<b>53</b>	<b>4</b>

Es de notarse la alta incidencia de fugas por km<sup>2</sup> al año en los sectores 1 y 2, aunque no así en el número de fugas por km al año, en los que la mayor incidencia se presenta en los sectores 2 y 3. Los sectores 4 y 5 no muestran incidencias tan altas, pero no hay que pasar por alto que se trata únicamente de fugas visibles atendidas, falta considerar las fugas no visibles.

Con esto notamos que el sector con más grave condición en cuanto a fugas visibles es el sector 2, que abarca justamente parte importante del Casco Viejo, la zona más antigua de Ciudad Universitaria.

En cuanto a los materiales, hay dos que redujeron notablemente su incidencia de fugas de 2007 a 2010, se trata del acero al carbón, el PVC y el PEAD. Esto se pudo haber dado probablemente porque el acero al carbón tiene un índice de falla relativamente bajo y, al reducir la fluctuaciones de presión con la sectorización, se redujo su riesgo de falla. En el caso del PVC, la causa más probable puede ser que el personal de la DGOC se ha dado a la tarea de reducir su uso y existencia en el campus, especialmente donde la incidencia de fugas es alta. Así mismo para el PEAD, el mismo personal procura reducir la existencia de juntas térmicas, sustituyéndolas por juntas mecánicas.

La mayor incidencia de fugas en el campus se da en el acero galvanizado, principalmente porque es el de mayor extensión y eventualmente el de mayor antigüedad. Sin embargo, no hay que tratar de manera aislada la incidencia de fugas en cada material, ya que la frecuencia de falla está totalmente relacionada con las características del terreno y las condiciones de operación. De esta manera, las causas de las fugas en los diferentes materiales difieren de acuerdo a dichas condiciones.

Una de las causas que puede influir en la presentación de fugas en cualquier sector es la antigüedad de las instalaciones.

**Tabla 15. Asociación de causas y origen de las fugas a la edad de la tubería**

sector	edad mínima	edad máxima	origen más frecuente	tipo de fugas más frecuente
1	30	50	antigüedad	falla de tubo y accesorio
2	40	50	antigüedad	falla de tubo y var
3	30	40	antigüedad / corrosión	falla de tubo, accesorio y var
4	40	50	antigüedad	falla de tubo, accesorio y var
5	20	40	corrosión / asentamiento	falla de tubo y accesorio

Evidentemente la principal causa de fallas en el sector 1 ha sido desde 2007 hasta 2010 la antigüedad de las instalaciones, sin embargo, se nota un efecto positivo en cuanto a las fugas por fluctuación de presión, que se redujeron paulatinamente desde 2007 hasta llegar a cero en 2010.

Durante 2010 salieron a la vista varias fugas cuya causa fue la mala calidad en la instalación, entre otras.

El tipo de fuga más común es la falla en los accesorios, fugas en válvulas de acoplamiento rápido (var), ya sea por impacto, vandalismo o uso indebido, aunque generalmente la causa se desconoce.

Los tubos rotos o dañados también son un tipo de fuga frecuente, aunque un tubo dañado puede representar la picadura, fisura o fractura del mismo, pero no se especifica en las estadísticas.

Se puede decir entonces que los daños en los tubos y accesorios se dan en este sector principalmente por la antigüedad de las instalaciones y eventualmente por las altas presiones y la fluctuación de las mismas.

En el sector 2 la causa que con más frecuencia influye en la aparición de fugas es la antigüedad de la infraestructura, tal como en el sector 1, así como el impacto a las válvulas de acoplamiento y tubos; nuevamente se nota una reducción de las fallas por fluctuación de presión. Un tipo de fuga muy usual es la falla en juntas y con más alta incidencia el tubo dañado, picado y roto; sin embargo, el tipo más abundante es la fuga en var, seguramente porque el sector abarca un área pública muy concurrida y extensa (las Islas), que está totalmente expuesta al público en general y es sede de numerosos eventos que requieren de la colocación de lonas y carpas que dañan las instalaciones.

En los sectores 1 y 2 se presenta un gran número de fugas en cobre, que a estos días ha llegado al término de su vida útil. Parte de estas tuberías han sido sustituidas por pead, y esto ha llevado a que las altas presiones del sector provoquen fallas en este material.

Para el sector 3 se identificó como la causa más habitual la corrosión e incrustaciones, aunque no se descarta la antigüedad, que está sumamente relacionada con lo anterior. A pesar de la disminución en las fugas por fluctuación de presión desde 2007 hasta 2009, se nota un leve repunte en las apariciones de 2010. Esto puede estar relacionado con las constantes violaciones a los límites de los sectores, realizadas intencionalmente ya sea por eventualidades que obligan la operación o de manera descontrolada.

El tipo de fuga más abundante es por var, aunque esto es de manera individual, ya que las fallas por tubo dañado, roto, fisurado y picado en conjunto denotan el punto álgido del sector.

De esta manera, se observa que las tuberías y accesorios, así como las juntas, fallan por las severas condiciones de corrosión e incrustación que presentan, pero principalmente por la fatiga a la que está sujeta la instalación, dados por los constantes cambios que surgen de la apertura y cierre de las válvulas límite del sector.

El material en que se presentan fugas con mayor frecuencia en este sector es el acero galvanizado, aunque no es despreciable la cantidad de fugas en cobre. Hay que considerar que gran parte del sector 3 es zona deportiva, por lo que hay momentos del día en que no hay vigilancia o mucha gente y esto facilita la sustracción del material si está a la vista, ya que resulta muy atractivo económicamente.

La causa más usual de la aparición de fugas en el sector 4, del orden de 3 por año como máximo, nuevamente es la antigüedad de las instalaciones. Por su parte, el tipo de fuga más frecuente es en var, y prácticamente no fallan tubos y accesorios. Éste sector es precisamente el que sostiene presiones por debajo de los 3 kg/cm<sup>2</sup>, razón por la que el número de fugas al año es sumamente bajo.

En lo que respecta al sector 5, no hay una causa frecuente identificada, sin embargo de 2007 a 2009 fueron constantes las fallas constructivas que provocaron fugas, así como los tubos con corrosión e incrustaciones. Particularmente en 2009 se dieron más fallas por asentamiento que por otra razón.

Las var representaron el mayor potencial de fuga de 2007 a 2009; sin embargo, las fallas en tubos y accesorios en conjunto fueron el tipo de fuga más atendido. Para 2010 la rotura de tubo fue el tipo de fuga atendido más veces.

Por esto, el material en que más frecuentemente se presentan fugas en los sectores 4 y 5 es el acero galvanizado, aunque en el sector 5 se ha presentado un gran número de fugas en pvc, posiblemente asociado al asentamiento del terreno antes mencionado.

Así entonces, parece que la falta de regulación, supervisión y asesoría durante las obras, provocaron diversas fallas, que salieron a la luz en los últimos años. Por otro lado, sería conveniente reubicar las válvulas de acoplamiento rápido en sitios de menor riesgo, tanto de impacto como de vandalismo.

Con todo esto, dada la antigüedad de las instalaciones en los sectores 1 y 2 y el alto índice de fugas en acero galvanizado y cobre por esta causa, se sugiere realizar un levantamiento completo de las tuberías de estos materiales y proyectar su sustitución. En el Campus Central, conocido como las Islas, sería de gran utilidad realizar la automatización del sistema de riego.

En el sector 3 convendría realizar sustitución y rehabilitación de tuberías, especialmente en los que restan de asbesto cemento. Se sabe que en la zona de Institutos del sector 3 se presentan eventualmente importantes fluctuaciones de presión que rompen tuberías, es conveniente investigar a fondo éste fenómeno para así evitar fallas a futuro.

En el sector 4 convendría únicamente vigilar la zona, ya que no tiene problemas muy pronunciados. En cuanto al sector 5, es de suma importancia eliminar las tuberías de PVC, aunque antes que esto hay que conocer con certeza cuántas, cuales y de qué servicio son dichas tuberías, ya que al momento existen diversas ambigüedades en el sistema, lo cual dificulta la identificación de los problemas en ellas. Cabe recordar que el tipo de suelo dominante en la zona es rocoso, y esto puede influir para que las fugas en este material y otros no salgan a la superficie y se atiendan un reducido número de fugas visibles, contrastando con el gran caudal de fuga medido en el sector y el mínimo caudal medido al interior de las dependencias. Es decir, existe un gran caudal fugándose día y noche en el sector, sin embargo, los medidores instalados en las dependencias muestran niveles mínimos de fuga (incluso ceros) y se atienden pocas fugas visibles, por lo que hay un gran caudal que no estamos viendo y que posiblemente se está filtrando a través del suelo rocoso de la zona. Por esto, es de fundamental importancia conocer a fondo las instalaciones y llevar a cabo campañas de detección de fugas.

#### **4.3.5. Índices de desempeño**

Los indicadores de desempeño sirven como una herramienta de diagnóstico, sin embargo, no es recomendable tomarlos como referencia única, sino como un elemento integrable al análisis de las condiciones y el diagnóstico general.

En CU se tienen registrados en planos aproximadamente 53 km de tuberías principales. Esta es una cantidad relativamente pequeña, sin embargo, el área de Ciudad Universitaria es de 7.24 km<sup>2</sup>, de manera que se tienen 7.45 km de tubería por km<sup>2</sup>.

De los pozos se extraen en promedio 93 L/s de agua y, como se mencionó anteriormente, aproximadamente el 50% de esto se pierde en fugas. Esto quiere decir que por cada km de tubería se pierden 0.86 L/s, aunque no en su estricto sentido, recordemos que se trata únicamente de tuberías principales. Éste índice nos da una idea del estado de la infraestructura hidráulica y es el primer paso para evaluar la rehabilitación o sustitución de tramos de tubería u otras acciones.

Por otro lado, en CU se atendieron entre 2007 y 2010 en promedio 243 fugas por año; tomando en cuenta de nuevo que se tienen 53 km de tuberías principales, podemos decir que se atienden 4.50 fugas por km al año. En este sentido, notamos que es un número relativamente alto, entonces se comenzaron a buscar las causas de ello.

Datos adicionales de las estadísticas (no propios de las fugas) indicaron que se invierten alrededor de 5000 horas hombre por año en la atención a fugas y que, en promedio, cada fuga requiere de 8.5 horas para ser eliminada. Comparando esto con el rendimiento normal de un oficial plomero con un ayudante, una fuga promedio de dificultad media-alta debe ser de 15 horas/fuga, atendida por un oficial plomero y un ayudante. Con esto, vemos que se invierte 58% menos tiempo en atención a fugas y, posiblemente por esto, el número de fugas que se atienden cada año es prácticamente el mismo, no disminuye. Cabe mencionar que se invierte además 125% más personal del requerido y además, el personal de la Red de agua supera los 10 años de experiencia y prácticamente no invierte tiempo en mantenimiento preventivo. Por supuesto todas estas cifras se refieren a fugas visibles.

Todos estos índices nos revelan que la Ciudad Universitaria (CU) es una ciudad tipo, con la salvedad de que está a menor escala. CU tiene los mismos problemas que algunas ciudades totalmente urbanizadas, incluyendo la falta de capacitación, iniciativa, innovación técnica y tecnológica y aplicación de estrategias efectivas, por lo que también necesita de un cambio de fondo en estos aspectos.

Tal como se describió en el capítulo 3, los principales indicadores de desempeño son el TIRL (Technical Indicator for Real Losses), el UARL (Unavoidable Annual Real Losses) y el ILI (Infrastructure Leakage Index), ya que se calculan considerando su configuración, así como las condiciones de operación de la red. Haciendo uso de las ecuaciones 6 y 7, los resultados del cálculo del ILI y UARL se observan en la tabla siguiente.

**Tabla 16. Cálculo de indicadores de desempeño de la red en Ciudad Universitaria**

Sector	Pérdidas reales		Número de conexiones	Longitud de tuberías		Presión promedio [mca]	TIRL	UARL	ILI
	lps	L/día		Principales (Lm) [km]	Secundarias (Lp) [km]				
1	16.4	1,416,960	55	17.81	0.39	39.51	71	5.79	12
2	5	432,000	27	5.82	0.19	36.69	44	1.88	23
3	9	777,600	34	11.56	0.24	37.22	63	3.52	18
4	1	69,120	11	2.99	0.08	25	17	0.63	27
5	13	1,123,200	32	14.69	0.22	21	96	2.43	40
<b>Total</b>	<b>44.2</b>	<b>3,818,880</b>	<b>159</b>	<b>52.87</b>	<b>1.11</b>	<b>31.88</b>	<b>66</b>	<b>13.81</b>	<b>5</b>

*En esta tabla se usaron las mediciones más actualizadas y con menor rango de error de las realizadas durante todo el proceso*

De acuerdo a la tabla 3 del capítulo 3, el ILI, considerado para países en desarrollo, indica que en general el Campus se encuentra en un nivel de fugas relativamente aceptable porque tiene oportunidad de obtener mejoras en el manejo de las fugas (B). La presión promedio en el campus es de 3.2 kg/cm<sup>2</sup>, de manera que se espera que las pérdidas asciendan a 150-300 litros por conexión al día.

Por otro lado, observando el resultado del ILI en cada uno de los sectores, se puede notar que el manejo de las fugas es pobre y requiere de atención inmediata. Se tiene que las pérdidas podrían llegar a superar los 600 litros por conexión al día, y la clasificación (D) describe que el uso de los recursos es completamente ineficiente y evidentemente un mantenimiento y una condición del sistema verdaderamente deplorables. Así que de manera individual el sector peor clasificado y que requiere de mayor atención no sólo en mantenimiento sino administrativa, es nuevamente el 5.

Sin embargo, hay que aclarar que éste índice es únicamente una referencia, ya que las pérdidas en el sector 4 no resultan tan importantes como lo presenta el ILI, aunque del resultado del UARL se puede notar que el tamaño del sector es fundamental para la cantidad aceptable de pérdidas, de manera que el sector 4, debido a su tamaño, acepta un nivel menor de pérdidas que el sector 5, que es el más grande. En este sentido, el sector con mayor problemática es el 1, que en términos del TIRL se encuentra en una segunda posición prioritaria, por debajo, nuevamente, del 5.

Todos los índices promueven atender el sector 5 como prioridad, sin embargo, resulta ser el sector menos atendido y, a esto puede atribuirse la lenta eficacia del programa en gran escala.

#### **4.3.6. Visitas de campo**

Como complemento a la formación de estadísticas y con el objetivo de dimensionar el efecto de la presión en las fugas de CU, se realizaron recorridos de campo.

Estos recorridos consistieron básicamente en la apreciación de fugas en vivo, fugas controladas (fugas que se tienen localizadas pero que a razón de no poderla reparar inmediatamente se controla únicamente el desperdicio) y fugas reparadas, incluso a algunas fugas se les dio seguimiento desde su reporte a la DGOC hasta su reparación, eventos que permitieron verificar, comprobar y obtener datos que no se reportan en la orden de trabajo y que son de vital importancia para el desarrollo y mejoramiento de técnicas.

Por otra parte, algunos recorridos tuvieron como objetivo observar y evaluar en campo el desempeño de algunos equipos para detección y localización de fugas a razón de elegir el o los más adecuados para la red de CU.

##### **4.3.6.1. Observaciones de las visitas de campo realizadas para detección en líneas principales**

Durante estos recorridos con personal de la DGOC se encontró que efectivamente las altas presiones fatigan las tuberías y dañan las válvulas de seccionamiento; algunas de las válvulas en el campus están abiertas en cierto porcentaje, lo que las personas de operación llaman “calibradas”, esto para controlar la presión a través del control del gasto. Así, el mecanismo de cierre de las válvulas se va dañando poco a poco hasta hacerlos fallar.

Sin embargo, lo mayormente observado fue la antigüedad de la infraestructura, toda vez que se visitaron las zonas de mayor edad en el campus, principalmente.



Figura 25. Fuga en PVC por asentamiento del terreno y su reparación en 2008



Figura 26. Fuga en fierro fundido de 12", tramo reparado por falla típica 5 veces en 3 años y su reparación (2008-2011)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27. Fugas por picadura de tubo de acero galvanizado durante 2008. Facultad de Derecho (a), Biblioteca Central (b), Facultad de Odontología (c) y Torre de Humanidades (d) (Zona Central)



Figura 28. Fugas por fisura de tubos plásticos y de acero galvanizado de 2009 y 2010. Centro de Ciencias de la Atmósfera (a), Facultad de Economía (b), Registro de Aspirantes (c) e Institutos de Investigación en Humanidades (d).

Las fechas de las fugas en las imágenes difieren en meses, esto hace evidente el estado de la tubería que va fallando y se manifiesta por periodos de tiempo. Es de considerarse que estas pequeñas secciones de la red que sufren fallas de este tipo, cuentan con reparaciones similares, es decir, se sustituye el tramo de tubo dañado, uniendo el tramo nuevo a la línea mediante juntas gibault o tuercas unión (uniones mecánicas) que potencialmente representan una posibilidad de fuga. En estos casos, sustituir tramos largos de tubería o secciones de la red reduciría el uso de uniones mecánicas y juntas térmicas, reduciendo a la vez las fugas potenciales y sobre todo las inconsistencias en la red y los constantes cambios de material que alteran el comportamiento esperado de la misma.

Algunos recorridos realizados con personal del equipo de detección de fugas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) hicieron notar la falta de procedimiento que tienen durante sus operaciones, y es así como trabajan en la red de la ciudad. Se sabe que una de las condiciones que ayudan a detectar fugas con mayor eficacia es el uso mínimo de las instalaciones y el silencio ambiente, especialmente si no se conocen las trayectorias de las tuberías y la ubicación de las tomas. La experiencia es un gran aliado, sin embargo, nunca hay que dejar de lado el procedimiento más adecuado para realizar las detecciones, con mayor razón cuando no se cuenta con equipo de apoyo o éste ya ha perdido efectividad y exactitud. El procedimiento se determina mediante el uso de la información disponible y tras un diagnóstico preliminar, no de manera arbitraria.

A esto se debe, pues, que no se haya encontrado ninguna fuga en los más de 5 km de tubería sondeados con un geófono modelo Aqua Scoupe marca Healt Consultant, tecnología que data de más de 10 años atrás.

#### **Observaciones fundamentales durante las visitas de campo**

- Efecto negativo de la alta presión en la red
- Antigüedad, incrustaciones y corrosión de las instalaciones
- Inconsistencias de la red en campo con respecto al plano
- Estructura organizacional desordenada
- Vicios, ineficiencia y falta de compromiso
- Ineficacia de los procedimientos arbitrarios o mal planificados

Todo esto llevó a mejorar la comunicación interna y externa del programa, a razón de tratar de reducir sobre todo los últimos tres puntos negativos hallados y que son tarea principalmente del personal de operación. También se trabajó en estudiar y planear adecuadamente los procedimientos, también en ambos niveles.

En cuanto a los primeros tres puntos enunciados, se convirtieron en la ocupación primordial del programa.

#### **4.3.7. Recorridos a la red de drenaje**

Se analizó la posibilidad de que el agua que se fuga de las tuberías de agua potable pudiera introducirse a través las paredes de los tubos del drenaje, ya sea por grietas o por filtración, toda vez que la mayor parte del drenaje de CU fue construida alrededor de 1954, superando su tiempo de vida útil, esta posibilidad es bastante viable. Así, se comenzaron recorridos a la red del drenaje.

En el entendido de que el drenaje trabaja a gravedad, su pendiente típica es del 2 al 5% y la velocidad del agua residual en el tubo no debe superar los 3 m/s, se notaron grandes flujos de agua con características organolépticas<sup>18</sup> muy diferentes de las del agua residual y sumamente similares a las del agua potable, todo esto en horas de consumo mínimo a nulo, lo cual resulta ilógico.

Bajo estas observaciones, se trabajó sobre aproximadamente el 20% de la red de drenaje, interrumpiendo los recorridos cuando ya no fue técnicamente viable continuarlos y a efecto de no lograr resultados más contundentes.

Sin embargo, este trabajo ya había dado un indicio de la cantidad de agua que se pierde en el drenaje a consecuencia de las fugas, a pesar de que es un método netamente indirecto, toda vez que si bien una fuga de caudal importante está perdiéndose ahí, no necesariamente estará dentro de un perímetro reducido, sino que puede tener una fuente lejana al punto en observación; incluso puede tratarse de varias fugas pequeñas que deriven a un mismo punto, lo cual diversifica las posibilidades y disminuye las probabilidades de dar con ellas.

En general, también la red principal de alcantarillado tiene algunas inconsistencias con respecto al plano, sin embargo es menor que en el agua potable, ya que a pesar de esto, se pudieron realizar los recorridos a la red sin mayores contratiempos.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales ubicada en la salida hacia la calle Cerro del Agua tiene tres aportaciones. El emisor principal recoge las aguas residuales desde la zona de Institutos nuevos cercanos al Jardín Botánico, pasando por la zona deportiva circundante al estadio de prácticas "Tapatío Méndez", el Estadio Olímpico y toda la Zona Central o Casco Viejo. Un segundo emisor lleva a la Planta las aguas residuales de la Facultad de Medicina y un tercer emisor transporta las aguas residuales de la zona de Institutos de Investigación Científica y las Facultades de Ciencias Exactas y de Medicina Veterinaria.

Así entonces, prácticamente la mitad del campus cuenta con drenaje. El emisor principal transporta una cantidad de agua sumamente importante, pero sucede que la mayor parte del agua que circula por el emisor, especialmente en fines de semana, es agua no utilizada. El segundo emisor se encuentra en la misma condición, sólo que el área que sirve es mucho más reducida que el anterior, lo cual salta a la atención. Igualmente el tercer emisor lleva una gran cantidad de agua no utilizada, sin embargo, se sabe que en esta zona existen algunos equipos que requieren de agua corriente prácticamente todo el tiempo y algunos no la reciclan, a lo cual podría deberse este desperdicio.

En la investigación acerca del origen de estos caudales se llegó a varias conclusiones:

***Emisor 1:***

Existen caudales de agua limpia con origen en el Estadio Olímpico, la Biblioteca Central y la Facultad de Derecho.

La mayor aportación de caudal "limpio" se origina en la zona de la Facultad de Química, en la cual, importa recordar, se encuentra un pozo de extracción.

---

<sup>18</sup> Características físicas del agua, observables o perceptibles mediante sentidos básicos: olfato y vista

Parte importante de caudal se origina en la zona alta del Estadio Olímpico cerca de la estación de Bomberos y descarga en el estacionamiento de la Facultad de Ingeniería, se trata de agua de filtración y pluvial. Lo positivo es que no se trata de una o varias fugas, sin embargo es importante recalcar que es un recurso aprovechable que se está desperdiciando continuamente.

Otra cantidad igualmente importante tiene su fuente al otro lado del Circuito Exterior, cruzando desde la Escuela Nacional de Trabajo Social, y corresponde a zonas altas, aunque no se descarta la existencia de fugas hacia este punto, correspondiente a CCADET.

De modo tal que se centra la atención en la zona de Química, Medicina e Institutos Científicos para la ubicación de fugas detectables.

***Emisor 2:***

Nuevamente se pone atención a la Facultad de Medicina como el posible origen de los grandes caudales, aunque las mismas inconsistencias en el plano de drenaje parecen no figurar la conexión entre la red de la Facultad de Medicina con la red del emisor 1.

***Emisor 3:***

La zona de mayor importancia parte de Programas Universitarios, aunque no involucra a la dependencia, ya que el gran caudal, no necesariamente limpio, se origina aguas arriba y se desconoce su fuente.

Los Institutos de Investigación de Química, Fisiología Celular, Geología, Geofísica y Geografía circundan una parte de la red de drenaje con sustanciosos caudales no utilizados que tienen orígenes aún desconocidos, principalmente por la complicación de las trayectorias en la zona.

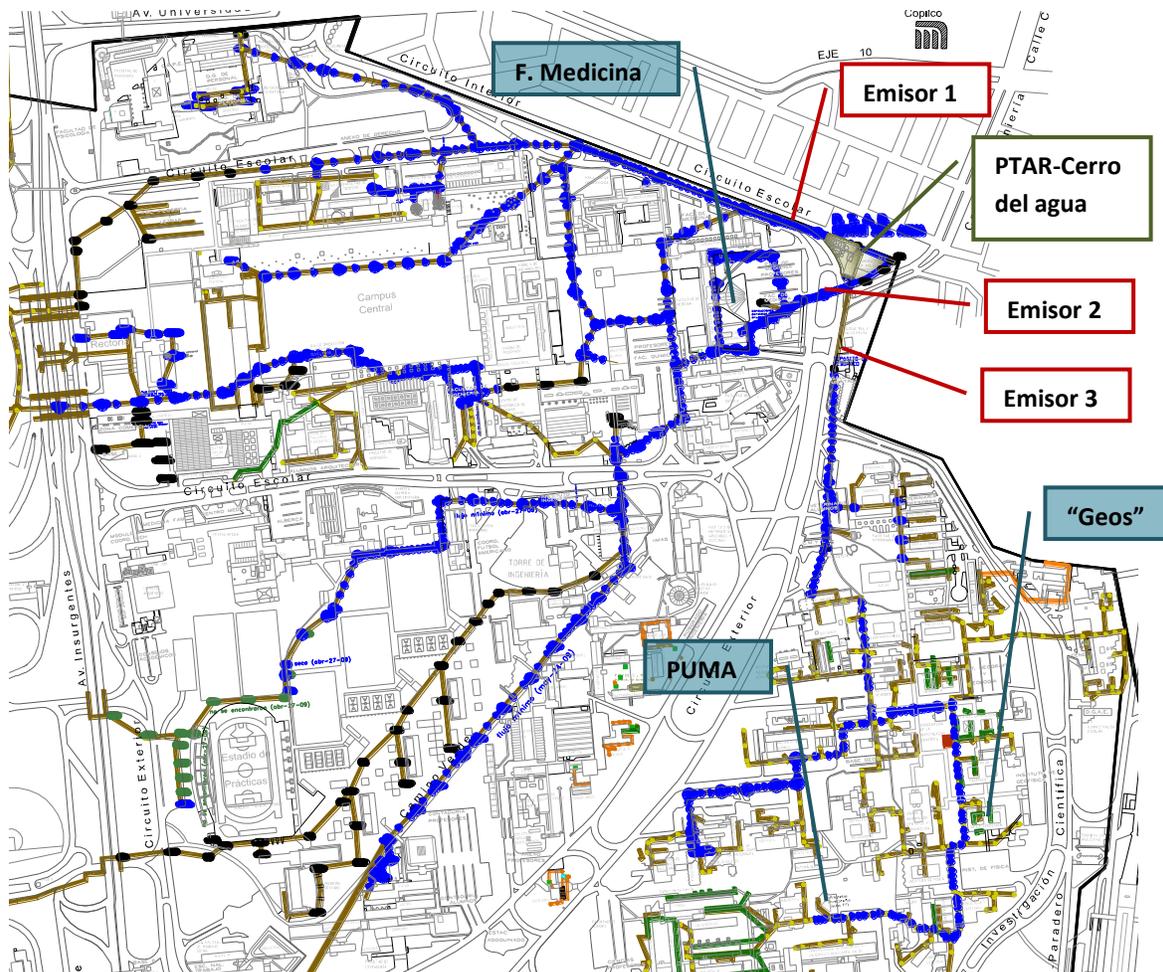


Figura 29. Sección de la red de drenaje de CU marcada con la inspección realizada

El ejemplo más claro en lo que se refiere a los resultados obtenidos por las actividades de inspección al drenaje, se puede mencionar el del auditorio de la Facultad de Economía, cuya pérdida representaba aproximadamente unos 5 lps (ver figuras 10 y 11 ).

Se siguió el flujo de acuerdo a procedimiento sobre la red de drenaje que corre por el Circuito Escolar; se notó un gran volumen de agua clara en un pozo de visita, del cual se buscó el origen, es decir, su conexión aguas arriba. Así se dio con la descarga directa del edificio del Auditorio C.E.D.E.M. al pozo de visita con conexión a la red principal de drenaje.

En el mismo instante se indagó sobre el origen de tal cantidad de agua, encontrando que se hallaba justo bajo un muro falso apoyado sobre una losa de concreto de 25 cm de espesor que impedía que la humedad provocada por la fuga pudiera salir a la superficie, a pesar de que el tubo estaba pegado a la losa, es decir, prácticamente a ras de suelo.

Esta fuga llevaba más de 10 años activa y jamás había sido reportada, ya que la población en general e incluso el personal de servicio no tiene el panorama de lo que las fugas representan y sus manifestaciones, de modo que nunca se percataron de la existencia de esta fuga aún con el intenso ruido que emitía.

La fuga observada correspondía a las características típicas locales:

- Edad de la tubería: superior a su vida útil (54 años)
- Condición: serias incrustaciones internas y externas
- Características del material: tubo rolado en frío de acero galvanizado de 4" con costura
- Tipo de fuga: fisura longitudinal de 80cm de extensión y picadura del tubo en varios puntos

De modo que las estadísticas y las visitas de campo dieron un panorama bastante acertado de lo que se esperaba encontrar en este punto y que se pudo comprobar en sitio.



Figura 30. Pozo de visita sobre el Circuito Escolar a la Altura de la Facultad de Medicina (emisor 1)



Figura 31. Pozo de visita en el estacionamiento de profesores de la Facultad de Economía. Descarga desde Auditorio CEDEM



Figura 32. Pozo de visita de descarga directa del auditorio CEDEM. Sanitarios al fondo del lado derecho



Figura 33. Pozo de visita en el estacionamiento de profesores de la Facultad de Economía. Flujo notablemente menor tras la reparación de la fuga de aproximadamente 3 lps.

#### 4.3.8. Adquisición de equipo para detección y localización de fugas

En el entendido de que se estaba perdiendo una cantidad inverosímil de agua a diario y que aún no se contaba con elementos de medición continua, se procuró un equipo de medición portátil que permitiera obtener mediciones de caudal velocidad y volumen suministrado en diferentes puntos de la red; se seleccionó el medidor ultrasónico portátil modelo PT878 marca GE. Posteriormente se realizó la adquisición de equipo para detección y localización de fugas, un geófono modelo AS3 marca Gutermann, en paralelo con los trabajos de instalación de algunos micro-medidores y dimensionamiento de macro-medidores.

En el momento de operar los equipos se experimentó que la falta de capacitación y de una estrategia bien fundamentada y dirigida, mermaba los resultados que se esperaba obtener.

Más tarde se adquirió otro equipo para detección de fugas, un correlador modelo AQ610 de la marca Gutermann (correlador). Éste equipo generalmente da resultados muy claros, sin embargo, también suele crear confusión en la interpretación de los mismos.



Figura 34. Geófono completo y su unidad (derecha)



Figura 35. Correlador completo y su unidad (derecha)

Así pues, es sumamente importante contar con la capacitación adecuada y suficiente experiencia para tener deducciones lo más acertadas posibles y así, hacer un apropiado trabajo de detección y localización de fugas. Esto por supuesto sin ignorar la necesidad de llevar a cabo un procedimiento ordenado y debidamente apuntado y de contar además con las herramientas adicionales necesarias.

La posesión de los equipos adquiridos dio lugar a la proposición de un plan de detección en las líneas principales, apoyado en las observaciones de acciones anteriores. Esto tuvo consecuencias positivas en el sentido de que se pudieron llegar a conocer las capacidades del equipo y sus detalles de operación e interpretación, sin embargo, en lo práctico no resultó tan exitoso como se esperaba, ya que se trabajó en 4 km de tubería, localizando 8 fugas de las que únicamente 2 fueron confirmadas como reales.

#### 4.3.8.1. Capacitación en el uso de equipo especializado

De acuerdo con las observaciones obtenidas durante los primeros trabajos con el equipo de detección y localización de fugas, se tuvo una etapa de capacitación básica y tutoría remota que permitió mejorar el uso de los equipos y obtener más rendimiento de los mismos.

La capacitación consistió en una visita de la empresa que proporcionó el equipo y la posterior resolución de dudas en una segunda visita. Durante las visitas, se determinó el procedimiento y las capacidades de los equipos y ayudó así a integrar el procedimiento correcto, enfatizando en lo siguiente:

La ubicación de las fugas se realiza básicamente en dos etapas: *detección y localización*.

La primera etapa ubica espacialmente la fuga, de modo que se puede dividir en dos niveles. Los equipos que permiten obtener esta información preliminar son el macro-medidor, ya sea portátil o fijo, el geófono y el correlador, aunque existen otros más en el mercado que ayudan a esta etapa que no han sido utilizados en el campus por que no se ha requerido.

La medición puntual indica si existe algún flujo adicional al consumo que se pudiera identificar como fugas, de esta manera, evita trabajar en zonas donde no hay fugas bajo la sospecha de que las hay.

Posterior a la medición, se inicia la detección mediante el uso de uno de los micrófonos del geófono para la determinación de la posibilidad de fuga en la línea; posteriormente se utiliza el correlador, colocando los radio-sensores en puntos estratégicos y conocidos, de manera que sea posible estudiar la mayor cantidad de tuberías en el menor tiempo.

La segunda etapa ubica con precisión la fuga anteriormente detectada. En los puntos indicados con posibilidad de fuga por el correlador, se utiliza el geófono con el micrófono adecuado (piso, terracería o toque) y se hace la confirmación y, en su caso, la localización puntual de la(s) fuga(s).

77



Figura 36. Capacitación efectuada por Gutermann a personal de PUMAGUA

Dentro de las observaciones realizadas al geófono es la medición de sus capacidades en campo, verificando las expuestas por el fabricante.

Tabla 17. Caracterización de la operación del geófono. Capacidad de operación de un geófono bajo condiciones típicas (estudio realizado con equipo modelo AS3 marca Gutermann)

Tubería	Rango de diámetros	Rango de presión	Nivel aproximado de ruido esperado (directo)	Distancia del micrófono a la fuga	Nivel aproximado de ruido esperado (background)	Profundidad de la tubería con respecto a la superficie
	in	(kg/cm <sup>2</sup> )	DB	m	DB	m
Plástico	2 a 4	2 a 3	30	25	25	1 a 2
		3 a 4	45	20	30	< 1
Metal	1 a 4	2 a 3	60	60	40	2 a 4
		3 a 4	75	100	60	< 2
Asbesto	2 a 4	2 a 3	40	30	40	1 a 2
		3 a 4	60	10	45	< 1

En general, fueron determinados los detalles para la integración del método, sin embargo, ninguno de los equipos por sí solos pueden garantizar la localización de las fugas, es necesario contar con la capacitación suficiente y sobre todo integrar una estrategia con el uso de los equipos que son auxiliares en los trabajos de detección y localización de fugas, pero no de manera aislada.

#### 4.3.9. Sectorización

Se propusieron 5 sectores hidráulicos cuya finalidad es crear zonas de igual presión, de esta manera, quedaron definidos los sectores siguientes:

Sector 1: *Casco Viejo e Investigación*

Sector 2: *Zona Comercial*

Sector 3: *Zona Deportiva*

Sector 4: *Estadio Olímpico*

Sector 5: *Zona Cultural y Humanidades*

La separación de estos sectores hidráulicos permitió, por una parte, comprobar que la presión y el gasto tienen una intrínseca relación que es directamente proporcional y, por otra parte, comprobar que la presión permanece constante en cada zona al realizar el seccionamiento lo cual permite que las condiciones de abastecimiento permanezcan adecuadamente.

#### 4.3.10. Medición estratégica

Tras la sectorización de la red con la presión como condición de frontera, se comenzó la macro medición puntual de los sectores hidráulicos. Un tiempo más adelante se comenzó la instalación de micro-medidores en el campus, aunque no de manera ordenada. Esto se pudo hacer más adelante, con lo que se logró tener un balance preliminar.

Se encontró, mediante la macro-medición portátil, que la mayor pérdida se encontraba en el sector 1, resultado coincidente con la inspección del drenaje y con los resultados de las estadísticas presentadas. El comportamiento para los otros sectores fue muy similar en todos los campos, con la salvedad de que en el sector 5 no había drenaje construido hasta el momento y que una parte de las fugas no son atendidas por el personal de la red de agua, encargados básicamente de la zona central.

Tabla 18. Fugas por km de tubería por sector hidráulico.

Sector	Longitud de tuberías	$Q_{fuga}$	$Q_{fuga/km\ tubería}$
	km	lps	lps/km
1	18	20	1.1
2	6	5	0.79
3	12	9	0.78
4	3	1	0.25
5	15	13	0.88
TOTAL	53	47	0.89

79

Esto se siguió realizando, ya que ofrece un certero panorama del comportamiento de la red. Así, se ha notado en varias ocasiones que los límites de los sectores han sido violados y las válvulas que seccionan se han llegado a abrir por personal no autorizado, afectando el comportamiento de la red y, por consiguiente, provocando fugas y alteraciones en los resultados esperados. Por supuesto esto dificulta el análisis de la información y la consiguiente detección y localización de fugas, ya que abre posibilidades falsas en todos los sentidos.

#### 4.3.11. Sistematización de micro-medición

A partir de los resultados obtenidos con la micro-medición en algunas dependencias y la macro-medición en los sectores hidráulicos, se comenzó a llevar un avance más constante y dirigido hacia el dimensionamiento, proposición e instalación de micro-medidores por sector hidráulico, teniendo como prioridad los sectores con mayores pérdidas identificadas.

Los medidores instalados son de tipo volumétrico, específicamente de disco nutativo. Este tipo de medidor tiene la ventaja de detectar consumos muy pequeños, lo que ofrece una ventaja operativa ya que permite identificar fugas mínimas dentro de la dependencia con gran exactitud. Los medidores cuentan con un data logger que almacena datos por un espacio de tiempo relativamente prolongado y además posee una antena que envía datos de manera remota cada cierto tiempo, de modo que el sistema de medición puede ser monitoreado continuamente.

Se logró con esto obtener curvas de demanda por tipo de usuario que, consecuentemente, servirán para la calibración de la modelación ya existente. Adicionalmente ha sido de gran ayuda para la detección oportuna de fugas dentro de las dependencias.

A partir de la información datada en los registros de los medidores, se llegó a la estimación de que aproximadamente el 30% del caudal total de fuga en los sectores se podría encontrar dentro de las dependencias, aunque no se tomó como un punto de partida para la detección de fugas en estos puntos, sino que se incentivó la instalación de más medidores.

Entonces, sobre el sector 1 se sabía que:

- El 40% del total del caudal de fugas del campus se perdía en este sector
- La detección de fugas en la mitad del sector indicó la ausencia de fugas
- Parte importante del sector lo ocupa una sola facultad (Medicina Veterinaria y Zootecnia)
- La tercera parte del sector es zona rocosa y de grietas
- Gran parte del sector tiene micro-medición sin fugas significativas dentro de los edificios
- Se ha logrado evitar las fluctuaciones fuertes de presión durante el día

A partir de esto, se esperaría tener un diagnóstico similar de cada sector.

#### **4.3.12. Subsectorización**

En este sentido, se comenzó a instrumentar un plan para subdividir los sectores hidráulicos, rompiendo, por decirlo de algún modo, los circuitos en la red de agua y separando además pequeñas zonas con un patrón de consumo similar, controlando así también la presión dentro de ellas.

Se logró separar 19 subsectores y evaluar las posibilidades de estudio y requerimientos de cada uno. El estudio de estas áreas se haría, pues, en tres etapas, que adelante se describen.

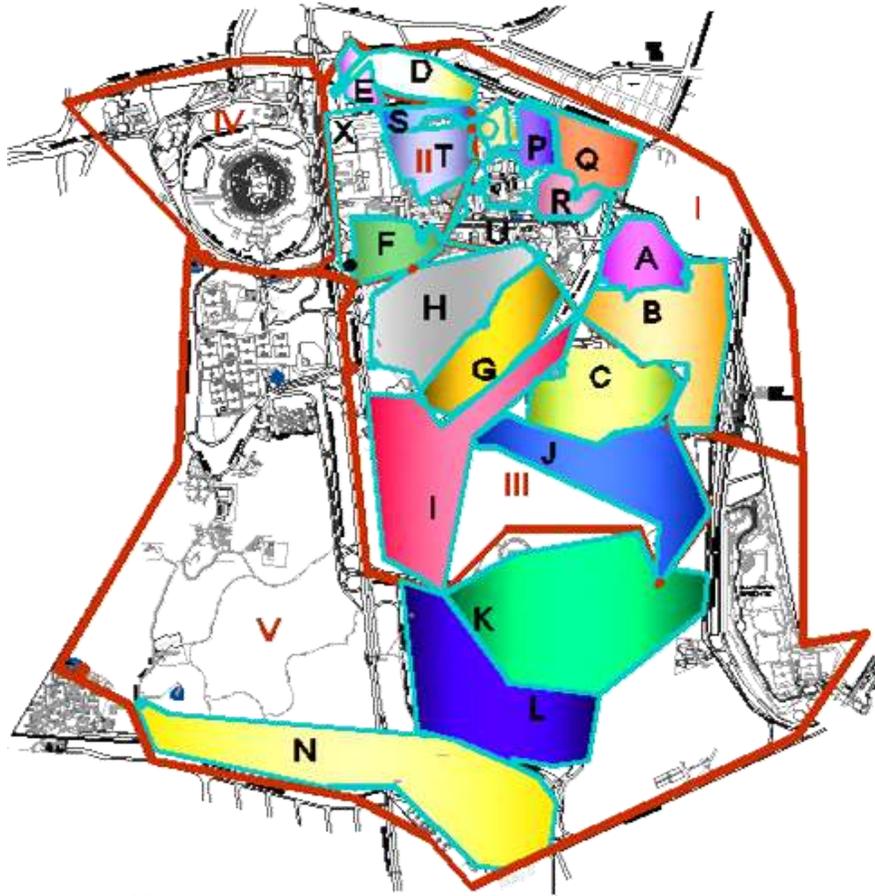


Figura 37. Subsectores separados en CU

#### 4.3.12.1. Actividades de inicio

##### i. Estudio de características técnicas y operativas

Mediante visitas de campo a los sitios propuestos para medición y seccionamiento, se verificaron las características necesarias para efectuar las actividades mencionadas.

El medidor ultrasónico portátil (marca GE modelo PT878), por ejemplo, requiere de un espacio libre de aproximadamente 10 diámetros a lo largo, que dentro de este espacio las velocidades estén en rangos aceptables y que el flujo sea uniforme; además, es necesario garantizar que los transductores tendrán contacto perfecto con la tubería, es decir que la superficie del tubo esté lo más lisa posible.

En el caso de las válvulas límite, se debe de garantizar la hermeticidad de las mismas, a razón de evitar que cualquier flujo, por mínimo que sea, escape al otro lado del subsector o que le sea introducido algún flujo y, en consecuencia, sea más difícil identificar el problema dentro del subsector. Para la válvula principal, es importante garantizar su hermeticidad para que, eventualmente, se pueda realizar de manera exitosa alguna prueba de presión cero.

## ii. **Medición de caudal de fugas**

Verificadas las características necesarias, se efectúa la medición de caudal de fuga, instalando y poniendo en marcha el medidor cuando el consumo (en teoría) es de mínimo a nulo en la zona. Esto es posible identificarlo durante la noche, particularmente en Ciudad Universitaria, se logra entre las 0:00 y las 5:00 hrs de cada día, y en fines de semana.

Por supuesto no se puede ignorar que, tratándose de zonas de investigación, es posible que algunas dependencias requieran suministro de agua continuo e ininterrumpido. Para descartar estas cifras de las fugas, se utilizan los registros de la micro-medición en el mismo periodo de tiempo, así como criterios de apreciación en la medición del ultrasónico y las cifras de suministro nocturno de agua reportados por las dependencias.

### 4.3.12.2. **Actividades de apoyo**

#### i. **Inspección de drenaje**

Esta actividad había sido efectuada antes y durante la sectorización, por lo que se tenía un determinado avance en los trabajos de reconocimiento de la red y algunos caudales inusuales identificados.

De esta manera y con la red dividida mediante los subsectores, se identificarían los caudales con un mejor criterio, relacionando las pérdidas en el subsector con los flujos en el drenaje.

No se tiene aún un criterio para definir si las fugas grandes tienen como destino el drenaje (al menos en CU), o si estos flujos inusuales de agua son la acumulación de varias fugas pequeñas que tienen su origen en las dependencias. Esto pretende relacionarse con los registros de micro-medición y el balance logrado en el subsector.

#### ii. **Monitoreo de manómetros**

En un estado estático, las fluctuaciones de presión deben ser nulas; sin embargo, dado que esto es una utopía, se asume que habrá fluctuaciones de presión mínimas, siempre que no existan fugas de gran caudal que hagan oscilar la presión de manera importante.

Mantener un constante monitoreo de manómetros ayuda a identificar posibles fugas en cada subsector.

Como primer paso, considerando que no se cuenta con sensores de presión de percepción remota, se hace la lectura de manómetros todos los días a la misma hora durante un periodo determinado. Cuando se ha logrado tener una imagen del comportamiento de la presión en el subsector, se establece un criterio de variación de la presión compatible con la variación del gasto.

Las pérdidas de carga que se aprecien serán constatadas con la diferencia de cotas existente en el terreno y, si esta coincide, se descarta la posibilidad de una fuga y se incluye en el criterio mencionado anteriormente; por el contrario, si difiere de manera considerable, se plantea la posibilidad de una fuga entre ambos manómetros.

#### 4.3.12.3. Actividades centrales

Para esta etapa, se ha determinado un orden jerárquico en los subsectores en estudio, por lo que se sabe en este momento, lo que se espera encontrar.

Se ha relacionado el caudal de fuga y la micro-medición con el comportamiento del drenaje, se han monitoreado los manómetros por un periodo adecuado y se ha fijado una imagen de presiones en cada subsector. Se tiene además un registro de fugas reportadas en la zona y, por lo tanto, se conoce el tipo de fuga y sus causas predominantes en el sitio.

##### i. Sondeo

Esta actividad, así como las siguientes dos, requieren que haya un uso mínimo o nulo de las instalaciones, ya que su principio de operación es sonoro y cualquier demanda de agua sería registrada y posiblemente confundida con una fuga.

En cada cruce se escucha la tubería de manera directa y se percibe el nivel de ruido en el punto y la calidad del sonido. Se evalúa y emite la posibilidad de una fuga en los alrededores del sitio.

Si se expresa la posibilidad de una fuga en más de dos cruces, se procede a la correlación de sonidos en el o los tramos involucrados.

##### ii. Correlación

Con una distancia entre sensores recomendada por el fabricante y evaluada por el operador del equipo, se realiza la correlación de sonidos en los tramos de tubería propuestos en la fase anterior.

Aquí se encuentran posibilidades más específicas de fugas, se tiene una gráfica de nivel de ruido, una de frecuencias y una de señales sonoras de tiempo real que confirman o descartan la posibilidad de una fuga, evaluados mediante el criterio de los operadores. Es posible y recomendable entonces pasar a la fase de localización.

##### iii. Localización

Con un equipo para confirmación de fugas de tipo no destructivo, se confirman las posibles fugas en los puntos indicados por el equipo de correlación.

De la misma manera como se procedió en la fase de sondeo, se realiza para el punto marcado, colocando el equipo de escucha indirecta sobre el punto en cuestión, se registra el nivel de ruido y la calidad del sonido. Finalmente se confirma o descarta la existencia y ubicación de la fuga con la mayor exactitud posible.

Los detalles no indicados por el proveedor para el uso y error del equipo deben ser determinados por los operadores, ya que cada red es distinta y así su comportamiento y características definirán el error específico que se espera asumir para la red en particular. Esto se realizó en fugas observadas, en las que fue posible determinar el error esperado para fugas con determinada presión y características físicas de la tubería.

#### iv. Control

El control engloba varias prácticas que llevadas adelante permiten efectivamente controlar las fugas, en lo que respecta a su frecuencia de aparición y al caudal que escapa por ellas.

##### a. Eliminación

Esta es una etapa fundamental para el control de las fugas, ya que en ella recae el control de la frecuencia de aparición de las mismas y está determinado por las condiciones en que concluya la fuga.

Por principio, se busca controlar el flujo que escapa por la fuga al ser hallada, de modo que es indispensable contar con un plano lo más cercano a las condiciones reales para que esta acción se realice lo más pronto posible, garantizando que no habrá afectaciones no previstas. Por esto, entre otras cosas, es necesaria la sectorización.

En Ciudad Universitaria, tras la Subsectorización se tienen áreas de afectación netamente reducidas y controladas; como se mencionó anteriormente, la red está levantada en circuitos que mediante la sectorización y Subsectorización fueron interrumpidos, sin embargo no fueron cancelados. De esta manera se puede determinar qué válvulas sería necesario abrir en caso de contingencia, sosteniendo en la medida de lo posible las condiciones hidráulicas que prevalecen en el subsector y evitando así la aparición de nuevas fugas.

Son de observancia las reparaciones típicas que se efectúan en las fugas de Ciudad Universitaria. En CU existen básicamente 4 edades en la tubería, que en su momento pudieron haber cumplido con las normas establecidas y respondieron a las tendencias técnicas y tecnológicas de su tiempo.

Las primeras tuberías hidráulicas fueron instaladas en los años 50's, durante la construcción de la Ciudad Universitaria; la segunda era de instalación a gran escala se dio hace 30 años, una más hace 20 años y la última hace 10, aunque ciertamente nunca se ha dejado de construir a menor escala. Por esta razón, existen tuberías de asbesto cemento, fierro fundido, acero al carbón, pvc, polietileno de alta densidad y acero galvanizado.

Idealmente se debe buscar la uniformidad de la tubería en las reparaciones, sin embargo, dadas las condiciones económicas y prácticas a las que han estado sujetos los trabajadores de la red, no siempre ha sido posible, de modo que han hecho uso de su ingenio y creatividad, apoyados por supuesto en su experiencia, que ofrecen soluciones poco usuales a cada evento.

Los elementos que garantizan la eliminación radical y duradera de fugas se enlistan a continuación:

- Calidad en los materiales
- Calidad en la mano de obra
- Supervisión y control de calidad
- Operación adecuada de válvulas
- Conservación de la presión en la línea

Los medios para tener control de los rubros anteriores se describen a continuación:

**b. Formato**

En el campus se les da seguimiento a las fugas detectadas o reportadas a través de un formato que describe cada fuga desde su conocimiento hasta su reparación, para posteriormente descargarse en una base de datos. Esto permite el control de todos los parámetros antes mencionados y responsabiliza a los actores en sus respectivas tareas. Además, la base de datos y el análisis de los mismos cada determinado tiempo permiten tener una mejor planeación del mantenimiento de las instalaciones y del presupuesto que ejerce la dependencia para efectos de mantenimiento preventivo y correctivo.



### c. Capacitación y retroalimentación

Los trabajadores de la red en CU tienen una amplia experiencia en su trabajo, principalmente por las vivencias a las que se han visto expuestos. Se sabe que el campus tiene numerosas áreas de investigación que no pueden ser inhabilitadas por efectos de falta de servicios, de modo que la tensión a la que están sujetos ante una eventualidad es tal que los obliga a dar solución a los problemas en tiempos extraordinarios. Sin embargo, tal circunstancia y su falta de capacitación en ciertos temas promueven algunas prácticas que dañan la tubería en su extensión, tales como el cierre y apertura abruptos de válvulas, así como el descuidar la calidad en sus reparaciones.

Por otro lado, nos encontramos con la disyuntiva de ofrecer o no capacitación, ya que los preceptos de su contrato colectivo de trabajo tienen ciertas consideraciones que dificultan el avance en este rubro. Esto aún sin tomar en cuenta la disposición de los trabajadores, que con frecuencia consideran que su conocimiento es vasto y adecuado para llevar a buen término sus tareas y algunos se muestran reacios a aceptar capacitación en lo que tiene que ver con sus actividades cotidianas y que dominan a cabalidad.

### d. Control de presiones

Ya se ha hablado acerca de la relación que existe y que se ha observado entre el gasto y la presión en las fugas. Este es, pues, el elemento principal para un efectivo control de fugas ya que sosteniendo la presión en un rango aceptable para el material de la tubería y sus conexiones, y evitando las fluctuaciones, se minimizan las posibilidades de estimular la aparición de fugas en la red.

En dos de los cinco sectores hidráulicos se determinó la necesidad de válvulas reguladoras de presión, que son elementos que permiten modificar la presión de aguas arriba hacia aguas abajo de dicho elemento y sostenerla así durante un tiempo determinado.

Tabla 19. Presiones promedio y presiones objetivo en el campus

SECTOR	Presión promedio kg/cm <sup>2</sup>	Presión máxima observada kg/cm <sup>2</sup>	Objetivo de reducción en la presión a la entrada kg/cm <sup>2</sup>	Objetivo de reducción en la presión máxima kg/cm <sup>2</sup>
1	4.0	6.9	1.5	3.0
2	3.7	4.5	-	-
3	3.7	5.6	1.5	3.0
4	2.5	3.0	-	-
5	2.1	3.5	-	-

Parte del proyecto PUMAGUA consiste en fomentar el cambio de muebles de baño obsoletos por muebles ahorradores, cuestión que ha dado excelentes resultados locales, sin embargo, traslada el problema hacia la red, ya que el agua que es ahorrada dentro de las dependencias, que no es consumida, permanece en la red y como consecuencia, sostiene presiones altas más tiempo, lo que eventualmente induce la incidencia de fugas en la red principal y/o el aumento del tamaño de las ya existentes.

#### **e. Programa de rehabilitación y sustitución de tuberías**

Continuamente se han hecho importantes hallazgos que han determinado la pronta actuación en los cambios de tubería, aunque principalmente se han encontrado serias inconsistencias en algunos tramos de tubería que sugieren cancelarlas, ya que aparentemente no tienen uso.

Mediante la detección y localización de fugas se ha notado esta situación en más de dos ocasiones y es esto precisamente lo que incentiva la cancelación de tuberías sin destino aparente, ya que ha sido la solución más viable en su momento.

Esto ha dado lugar a la búsqueda de estos problemas, a razón de erradicar fugas de fondo con la menor inversión posible.

Por otro lado, y en consecuencia de lo antes mencionado, se trabaja en la instrumentación de un plan de rehabilitación de tuberías en la Zona llamada del “Casco viejo” por la edad de las tuberías, el tipo de fugas atendidas ahí y la inaccesibilidad a las instalaciones por la construcción de nuevos edificios sobre las mismas. Así mismo se han sustituido importantes longitudes de tubería en zonas con gran incidencia de fugas, como la Zona de Investigación en Humanidades por los problemas que representó la tubería de PVC en este sitio.

En una asociación de las condiciones a las que está sujeto el campus, se puede decir lo siguiente:

La zona más antigua es la de la zona central, así como los campos deportivos, cuyas redes llevan en operación desde 1954. La mayor parte de esta tubería es de acero galvanizado rolo en frío en diámetros menores o iguales a 4”, mientras que en diámetros mayores o iguales a 6” el material es básicamente acero al carbón y en algunos tramos de fierro fundido. Sin embargo, dadas las múltiples reparaciones hechas en la zona a lo largo de los años, los materiales ya no son uniformes y la edad promedio de las instalaciones se reduce; aún con esto, las instalaciones son sumamente antiguas, y la mayor parte de las fugas atendidas son en diámetros menores. Algunas remodelaciones no han tomado en cuenta las trayectorias de la red, ya que en este sentido no existe una estricta planeación y verificación. Por esto, las tuberías con mayor potencial de fuga, más antiguas y de diámetro menor, quedan ocultas y con ello ocultan fugas.

Durante los 60's se construyeron algunos espacios deportivos, especialmente para el desarrollo de las olimpiadas de 1968 y otras instalaciones complementarias, como la Tienda UNAM, el CELE y el Instituto de Investigaciones Antropológicas.

Entre los 70's y 80's se promovió la construcción de la mayoría de los institutos de investigación en ciencias de la tierra, experimentales y la ingeniería, así como espacios culturales en el espacio escultórico. En observancia de las prácticas constructivas de entonces, la mayor parte de la tubería en la zona sigue siendo asbesto, aunque paulatinamente y con mayor prioridad que otras zonas, este material se ha ido sustituyendo, razón por la que la fugas se presentan en otras circunstancias.

No hay que dejar de lado que, tratándose de institutos de investigaciones científicas y recintos culturales, algunos procesos no permiten la falla del servicio, por lo que se construyeron cisternas para respaldar la continuidad del servicio que, cabe mencionar, ocasionalmente no cumple con las características requeridas por los equipos alojados en estos edificios.

Posteriormente, con el auge de la computación, se construyeron edificios dedicados a estas ciencias a partir de los 80`s, así como algunos posgrados. Durante los 90`s se complementaron las instalaciones de varios institutos de investigación, posgrados y museos. A raíz de la situación económica que imperaba en el país en estos años, puede haberse construido con recursos limitados, razón por la que el material utilizado en algunas instalaciones secundarias tengan tal índice de falla, como sucede en la Facultad de Ciencias Políticas.

Es importante decir que en ocasiones no se siguieron los lineamientos adecuados en cuanto a calidad de suelos de relleno y prácticas constructivas en este aspecto, por lo que algunos suelos permiten la filtración del agua de algunas fugas y otros sencillamente las provocan al sufrir asentamientos normales.

En estos días se construye en menor escala dentro del campus, y es gracias a la sobrada capacidad instalada, es posible continuar creciendo las instalaciones dotándolas del servicio sin necesidad de ampliar la red.

De esta manera, la edad máxima de las instalaciones en el campus es de 57 años; la edad mínima es de 10 años y la edad promedio es de 32 años. Por lo anterior, sustituir poco a poco las tuberías más antiguas definitivamente ahorraría grandes caudales a futuro y aumentaría la capacidad de la red, haciendo más eficiente su uso.

De aquí que el caudal de fuga más grande se midió en los sectores y subsectores que tienen mayor antigüedad, mayor concentración de cisternas y materiales rígidos de diferente calidad desplantados en suelos inestables y rocosos, suelos que permiten la intrusión del agua de las fugas en la red de drenaje.

Los programas de sustitución y rehabilitación de tuberías deben contemplar la eliminación de las tuberías rígidas en suelos inestables y rocosos, el re-direccionamiento de tuberías que hayan quedado bajo edificaciones y el mantenimiento general a las cisternas.

#### **f. Lectura estática de manómetros**

Se ha reunido el inventario de manómetros existentes con el objetivo de tener puntos específicos de control continuo en la red. Es complicado pensar en la automatización de este rubro para esta etapa del proyecto, de manera que se da lectura continua de algunos puntos de control y periódica en otros.

En principio se busca montar un mapa de presiones en la red a diferentes horas y equiparlo con la modelación a efectos de, por un lado, calibrarla y, por otro lado, buscar las causas de cualquier variación importante entre las condiciones virtuales y las reales.

#### 4.3.13. La presión dominante en la red

Esta acción ha contribuido al manejo e identificación de las condiciones a las que está sujeta la red constantemente. La diferencia de cotas en el terreno de Ciudad Universitaria es sumamente variada, y esto genera cargas excesivas de presión en algunas zonas y pérdidas de carga muy importantes en otras.

Hasta el momento las presiones en la red no han sido controladas a través de las válvulas de regulación, sin embargo se ha tenido un efecto positivo en cuanto al control de las fluctuaciones. En general las presiones que imperan en la red superan los 3 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que los edificios más altos no llegan a los 40 m.

De acuerdo a la diferencia de cotas, la mayoría de las presiones leídas durante el periodo están en el rango normal, sin embargo, existen algunas lecturas de presión que escapan a la lógica y se muestran diferentes a lo esperado. Es el caso de la DGSCA (ahora DGTIC), donde sobre la línea principal de 8" se lee una presión de 2.5 kg/cm<sup>2</sup> en promedio; la pérdida de carga desde la Facultad de Contaduría debería ser de aproximadamente 1.6 kg/cm<sup>2</sup> y de hecho está cercana a este número. Pero por el contrario, de la DGSCA al manómetro cercano al Posgrado de Contaduría deberían ganarse 0.18 kg/cm<sup>2</sup> y sin embargo se ganan 1.2 kg/cm<sup>2</sup>, de manera que esto resulta sumamente extraño. Esto podría indicar anomalías no detectadas aún en la red y acaso la posible conexión entre los sectores 3 y 5, hecho que afectaría el comportamiento esperado de la red una vez que estén operando las VRP.

En el caso del manómetro situado cerca del Posgrado de Odontología, la presión promedio es de 2.8, e incluso se ha llegado a presiones por la mañana menores a los 2. Esto afecta notablemente a la dependencia, toda vez que sus actividades dependen de manera importante de continuidad, buena calidad y adecuada presión del recurso. Para poder mantener un servicio adecuado en las dependencias alrededor de esta y no sobrepasar la presión mínima requerida en la zona, sería necesario que esta dependencia procurara una solución individual, como la colocación de un equipo de bombeo que le dé la presión que sus equipos requieren.

Las presiones para este ejercicio se leyeron en horas de alto consumo, principalmente para verificar que durante este tiempo la presión en la red fuese suficiente para abastecer apropiadamente a las dependencias. Por lo tanto, se puede observar que el abastecimiento se garantiza en las horas de mayor demanda y, por ende, en las de menor demanda. Lo cierto es que si durante las horas de mayor consumo las presiones se muestran altas, cuando el consumo es menor, la presión en algunos puntos de la red está muy por encima de la recomendada y esto, por supuesto, continúa generando fugas y de esa manera pérdidas.

Por la razón expuesta, las fugas detectadas y reparadas no tendrán un efecto significativo en el nivel de pérdidas, ya que la causa de fondo no está siendo atacada y esto es la instalación de elementos de control que permitan reducir la presión y así la aparición de fugas en la red y del caudal perdido en ellas de manera continua.

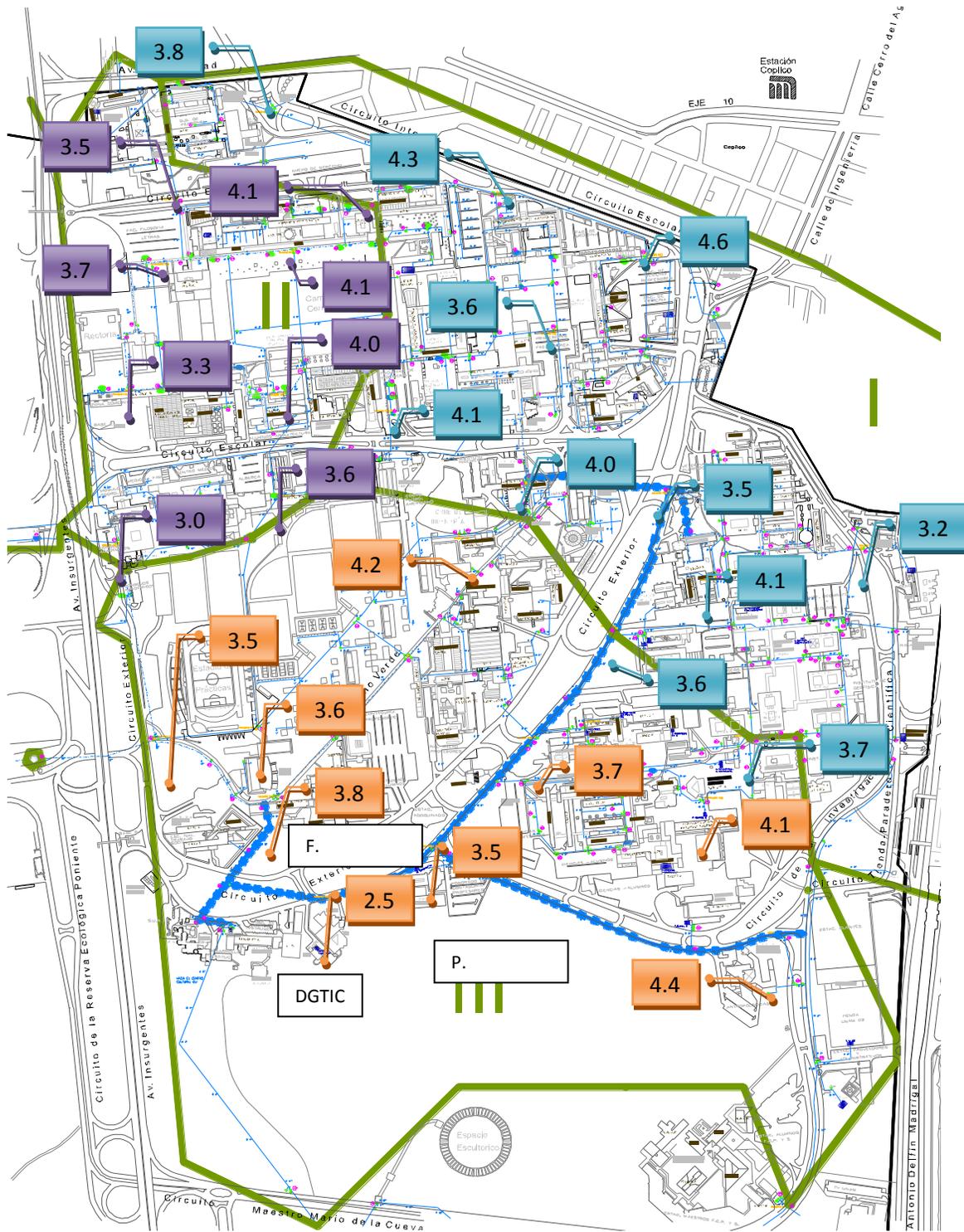


Figura 38. Promedio de presión matutina (10 a 12 h) sectores 1, 2 y 3

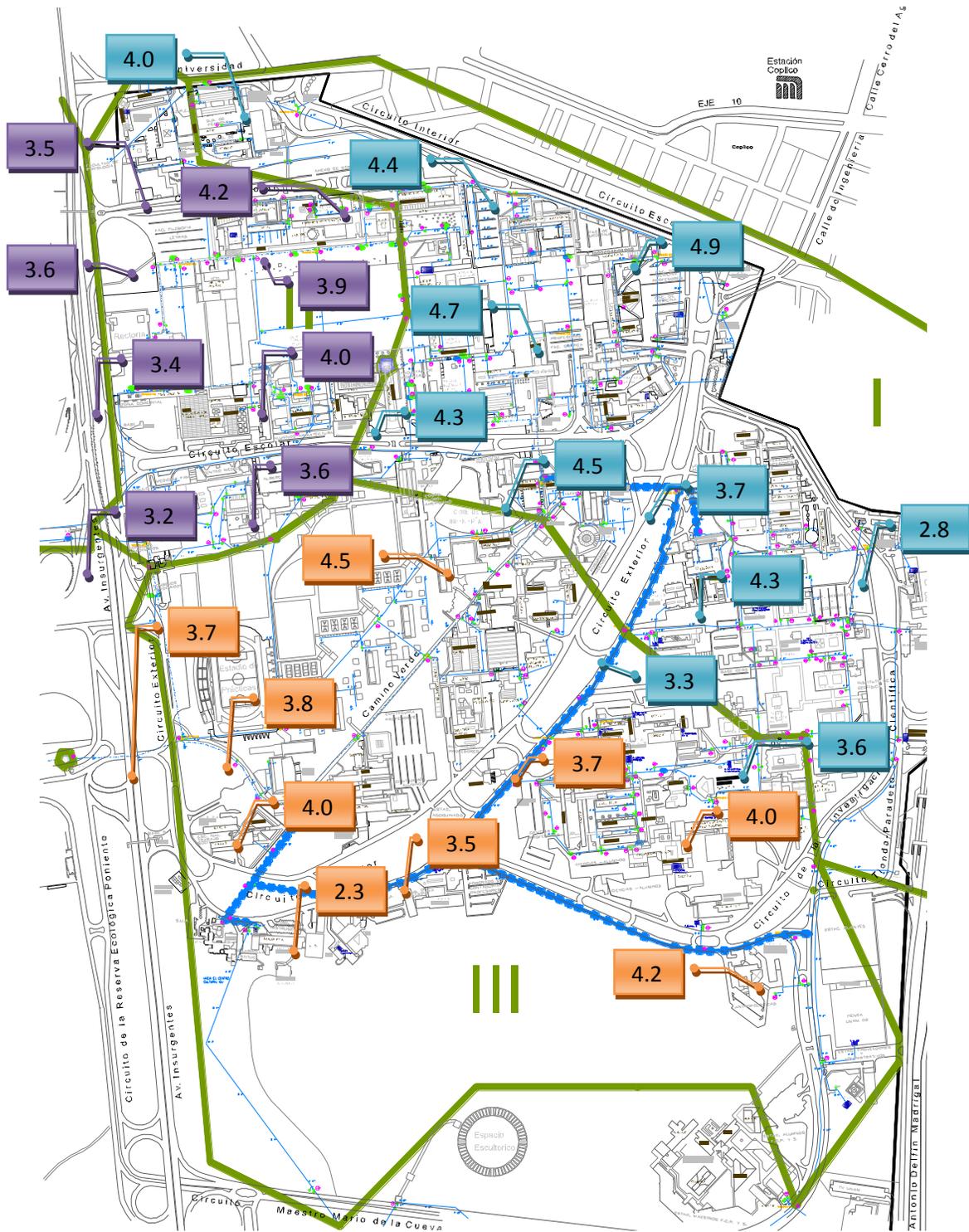


Figura 39. Promedio de presión vespertina (17 a 19 h) sectores 1, 2 y 3

Durante un ejercicio para la detección de una fuga de 0.66 lps (medido con micro medidor) al interior de una dependencia, se notó que la recuperación de presión al controlar la fuga fue de 0.3 kg/cm<sup>2</sup>, cuando la presión media se encontraba en los 2.9 kg/cm<sup>2</sup>, restableciéndose a 3.2 kg/cm<sup>2</sup>. Esto comprueba que al eliminar una fuga, la presión en la línea aumenta, lo cual puede generar la aparición o crecimiento de algunas fugas. Por supuesto esto depende de la presión promedio, de modo que entre mayor sea esta, mayor será la recuperación de caudal al eliminar las fugas, pero igualmente la recuperación de presión será mayor y por ende el riesgo de falla en la línea aguas abajo aumenta.

En las figuras 18 y 19 se nota que la mayor parte de las presiones en horas de alto consumo se encuentra entre 3 y 4 kg/cm<sup>2</sup>. Lo anterior sugiere que el eliminar las fugas detectadas podría tener un efecto negativo a largo plazo, ya que alteraría el comportamiento de la red, pudiendo aumentar el número o el caudal de fugas existentes, siempre que no sea controlada la presión.

#### **4.4. Resultados de la Subsectorización (con la integración de las estrategias)**

Como se describió anteriormente, la Subsectorización consiste en separar áreas más pequeñas de las que se pueden conocer sus características hidráulicas y limitar el área donde se pueden encontrar las fugas. Haciendo uso de los 4 puntos anteriores, se realizaron campañas de detección totalmente direccionadas, encontrando así un número de fugas reducido pero de caudales importantes.

Tras el estudio de los tres primeros subsectores piloto que se separaron (A, B y C) (ver figura 17), se encontró lo siguiente:

##### **Subsector A**

- Caudal de fuga medido de 0.24 lps
- Promedio de 13 fugas al año principalmente por tubo dañado, de las cuales 10 se dan en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, donde personal de la DGOC lleva a cabo continuas campañas de detección, localización y eliminación de fugas a solicitud de la misma dependencia, a raíz de la instalación de medidores; los 3 restantes se dan en alrededores del Centro de Ciencias del Mar y Limnología.
- Campaña de detección no realizada por PUMAGUA

##### **Subsector B**

- Caudal de fuga medido inicialmente de 11.3lps, medido posteriormente en 3.35lps
- Promedio de 24 fugas al año, especialmente de daño en tubo y falla en accesorios, de las cuales la mayor parte corresponden al Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Instituto de Fisiología Celular y el Posgrado de Odontología.
- Observación de varias inconsistencias en el flujo registrado en las mediciones de confirmación.
- Campaña de detección realizada con dos fugas detectadas.
- Eliminación de fugas no realizada por problemas administrativos.

## Subsector C

- Caudal de fuga medido de 3.42 lps, medido posteriormente en 1.88lps, sujeto a confirmación.
- Promedio de 13 fugas por año, en su mayoría por tubo dañado, concentradas en el Instituto de Astronomía, Instituto de Materiales, Instituto de Física y Facultad de Ciencias.
- Campaña de detección no realizada en etapa piloto.

Aprobada la etapa piloto, se realizó la Subsectorización del campus, llegando a 22 subsectores.

El criterio de selección sería en los sectores que tuvieran mayores pérdidas y, de éstos, seleccionar los subsectores que se pudieran medir y tuvieran mayor nivel de pérdidas en el sector y que se contara con información suficiente.

De los 5 sectores hidráulicos, los que presentan mayor pérdida según las mediciones realizadas son el 1, 3 y 5. El sector hidráulico 3 se pudo subdividir completamente, conteniendo 5 subsectores, identificados como C, G, H, I y J. El primero es de investigación y académico, el segundo es académico, el tercero es deportivo, el cuarto es administrativo y el último es administrativo y académico.

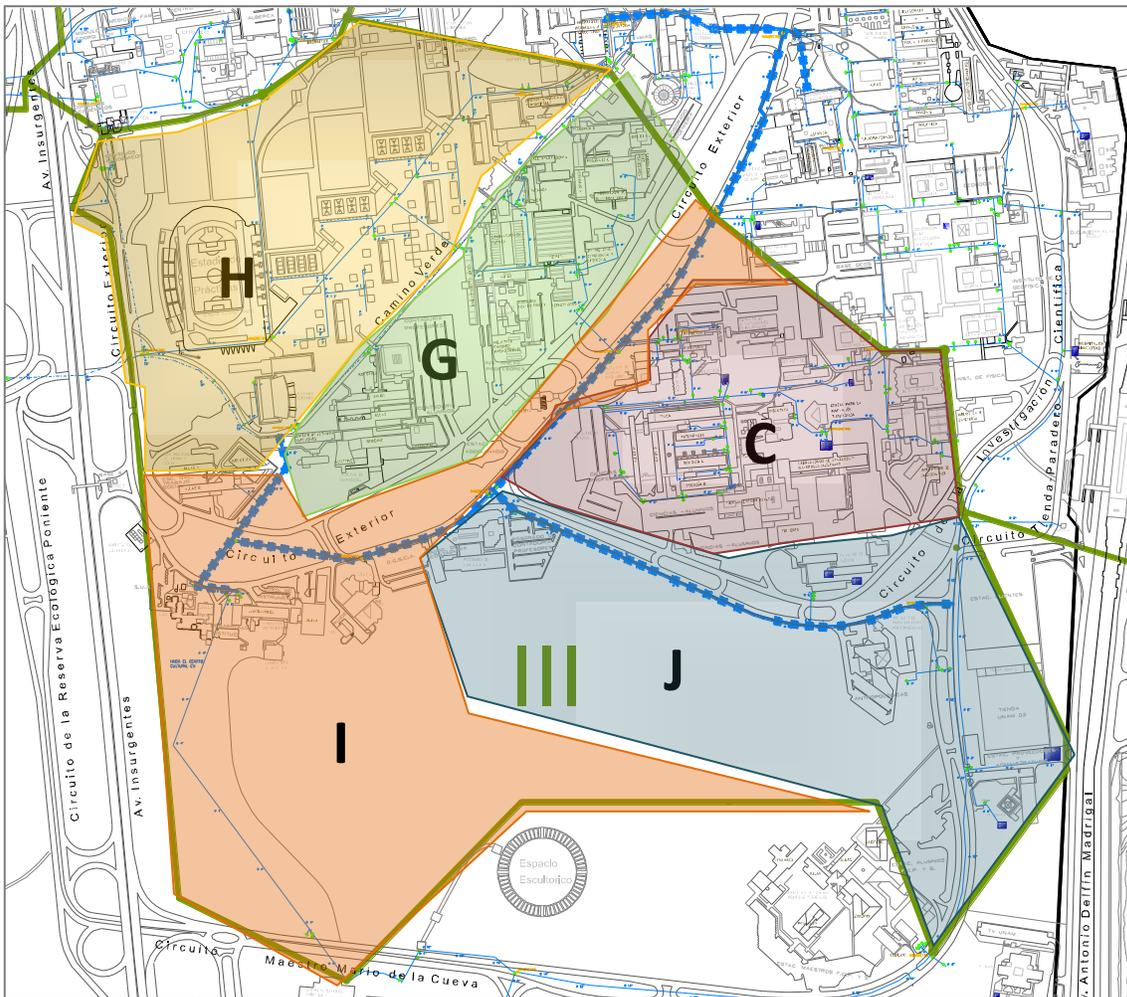


Figura 40. Subsectorización del sector hidráulico 3

Se identificarían las zonas con mayor problemática en el tema de las fugas y se dirigirían campañas de detección de fugas mucho más efectivas, conociendo de antemano lo que se espera encontrar. De esta manera se midieron y localizaron algunas fugas que con seguridad tenían largo tiempo activas.

La medición en el sector 3 arrojó un número alarmante de 19.5 lps de pérdida, cuando anteriormente se tenía un máximo registrado de 10 lps como máximo. Bajo esta suposición se enfocó la atención a los subsectores de este sector, comenzando por el subsector C, que había sido un subsector piloto en la etapa de prueba.

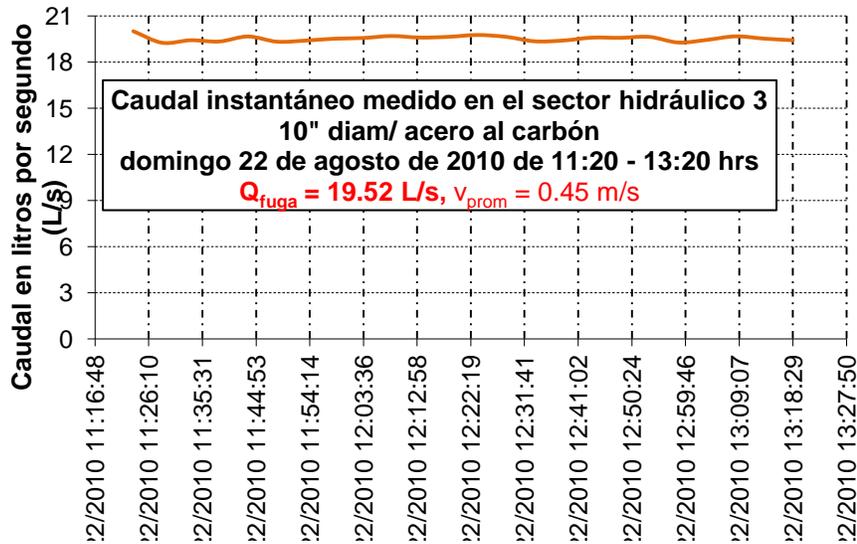


Figura 41. Gráfico del caudal de fuga medido en el sector hidráulico 3

Tabla 20. Datos básicos de los subsectores del sector 3

Subsector	Datos generales			Longitud tuberías principales km
	Área km <sup>2</sup>	Número de dependencias	Dependencias con medidor	
C	0.14	6	2	2.46
G	0.15	3	2	1.49
H	0.20	3	2	2.22
I	0.27	4	1	1.86
J	0.24	5	2	2.17
<b>Totales</b>	<b>1.00</b>	<b>21</b>	<b>9</b>	<b>10.20</b>

Tabla 21. Fugas en los subsectores del sector hidráulico 3

Subsector	Caudal fuga Sector Hidráulico 3					19.52 lps
	Distribución de fugas					
	Q <sub>f</sub> subsector	Q <sub>f</sub> dependencias	Q <sub>f</sub> red	Q <sub>f</sub> /km de tubería	Q <sub>f</sub> Fugas del total del sector	
	lps	lps	lps	lps/km	%	
C	1.88	0.01	1.87	0.76	10%	
G	2.75	2.51	0.24	1.85	14%	
H	3.99	0.03	3.96	1.80	20%	
I	9.81	0	9.81	5.27	50%	
J	1.09	0.36	0.73	0.50	6%	
<b>Totales</b>	<b>19.52</b>	<b>2.91</b>	<b>16.61</b>	<b>1.91</b>	<b>100%</b>	

El caudal registrado en el sector 3, así como en el subsector I resultaba sumamente incoherente con respecto a mediciones anteriores, sin embargo se comenzó la campaña de detección y localización de fugas y además se realizó la revisión a los límites del sector y subsector mencionados. Como resultado de la campaña de detección se encontró que únicamente las válvulas de alimentación a una cisterna estaban en mal estado, y de acuerdo a los resultados de los equipos utilizados y las inspecciones realizadas también se descartó la existencia de otras posibles fugas. Con respecto a la revisión de los límites del sector y subsector, se expuso la posibilidad de que los sectores 3 y 5 pudieran estar unidos a través de alguna conexión desconocida y no registrada en planos. Adicionalmente a esto se llevó a cabo la lectura estática de presión de los manómetros en el sector 3, y como resultado se observó que las presiones no variaban de manera importante, pero además se notaron mediciones anómalas en cuanto a la presión en un punto del subsector I, lo cual nuevamente resulta inconsistente con lo esperado. El caso se dejó pendiente de momento, para continuar con los trabajos de detección y localización de fugas en los otros subsectores, pero no se le restó atención.

Se continuó con el subsector J, principalmente por la facilidad de realizar la operación en días hábiles y también por su caudal de fuga superior a 1 lps. En este se detectó una sola fuga cercana a la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales y a TV UNAM, sin embargo, dadas las condiciones inesperadas de ruido en el punto no pudo ser localizada con precisión. Dicha fuga se manifestó en la superficie del Circuito Mario de la Cueva dos semanas después y fue reportada a la DGOC.

En tanto, se detectó una fuga de 2.5 lps al interior del Anexo de la Facultad de Ingeniería, que también se localizó de manera independiente y quedó eliminada. Al descartar este caudal del medido en el subsector G, del cual forma parte esta dependencia, el caudal restante es mínimo y sumamente difícil de localizar, de modo que se descartó el trabajo por el momento.

Las mediciones más consistentes realizadas en subsectores, corresponden al subsector C, ya que de alguna manera está más controlado y se cuenta con mejor accesibilidad y más información. Las mediciones en tiempo académico marcaron fugas de 3 a 4 lps, y una medición en tiempo de asueto administrativo marcó un caudal de casi 1.2 lps. Cuenta con 8 cisternas, de las cuales por lo menos dos se encuentran en no muy buenas condiciones. Realizada la detección y localización de fugas, se encontraron 6 fugas, de las cuales una representaba más de 1lps y las otras cinco, en conjunto, podrían haber representado 0.5lps.

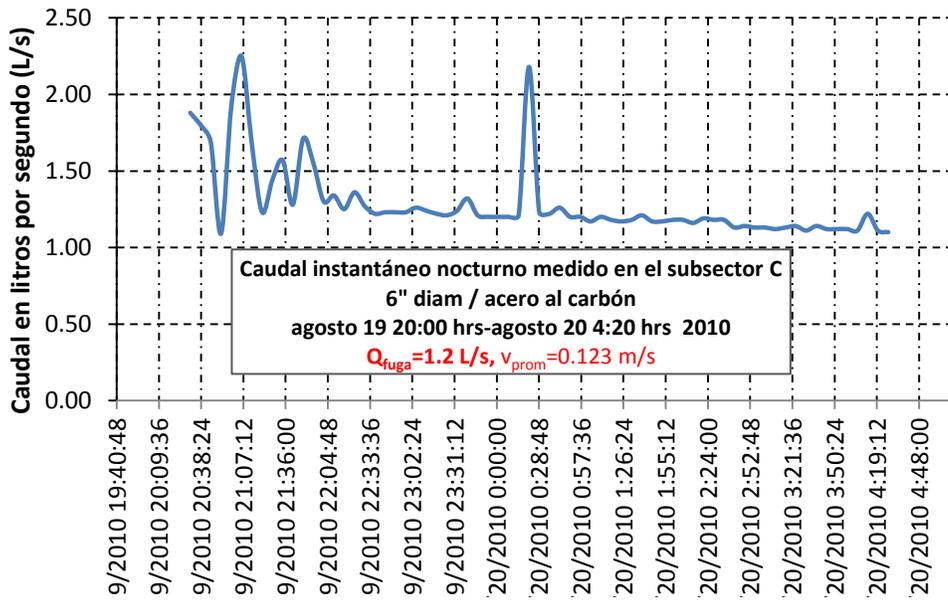


Figura 42. Medición de caudal nocturno en principio de semestre en el subsector C

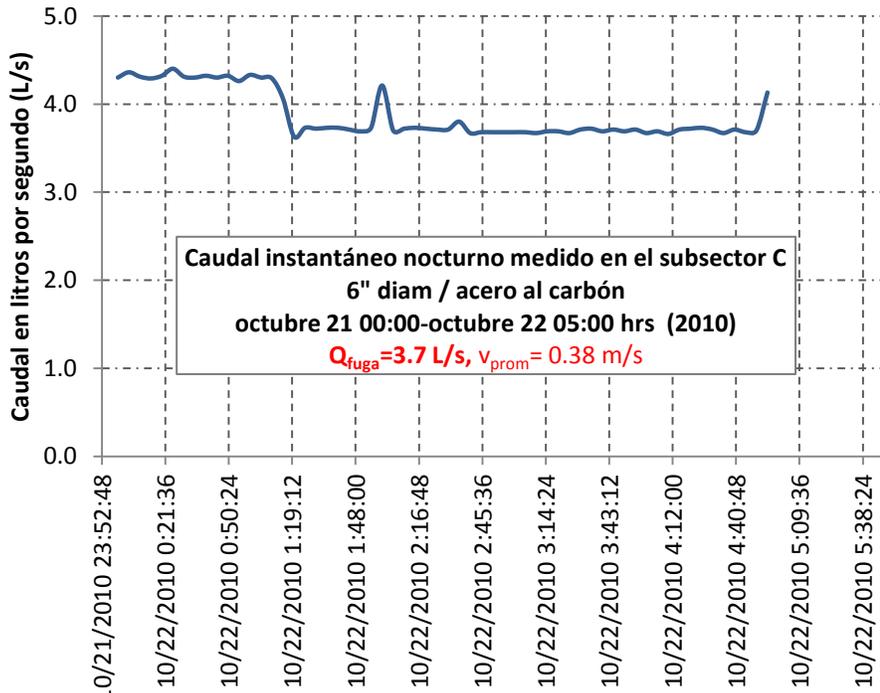


Figura 43. Medición de caudal nocturno en mitad de semestre del subsector C

La detección de fugas se realizó de acuerdo al método descrito en el apartado 4.3.12.3. El sondeo arrojó resultados muy valiosos, aunque la correlación de tramos dio entera claridad de lo que se buscaba. Es necesario cuidar y observar todos los detalles relacionados con la tubería y el equipo, especialmente si pueden afectar la operación, tal como puede ser el uso de las instalaciones, el ruido de maquinaria cerca del lugar, el tránsito vehicular, entre otros.

Tabla 22. Resultados de los sondeos realizados en el subsector C

SONDEO												
Registro	Ref 60 DB a 100 m										Dictamen	
	mic	Nivel de ruido										Observaciones
sábado												octubre 09, 2010
131	T	50	40	51	39	42	24 <sub>r</sub>	22 <sub>r</sub>	46			no fuga
139	T	59	62	53	54	56	51	59	54	flujo abundante en dirección oeste (fuente)		no fuga
143	T	36	35	50	39	47	47	40	40			no fuga
145	T	44	46	53	45	45	46	56	44	fuga en válvula de seccionamiento		no fuga
150	T	75	77	77	75	77	73	73	78	válvula de seccionamiento de sector abierta (pumagua cerró 2pm)		fuga
sábado												octubre 16, 2010
134	T	50	58	51	57	78	57	21	50	flujo continuo fuerte (ocupación 30%)		posible fuga
135-B	T	72	75	63	67	70	69	66	58	fuga en junta Gibault (filtros de 660-380 Hz)		fuga
	T <sub>r</sub>	38	33	38	38	33	45	47	38			fuga
sábado												octubre 23, 2010
135-B	T	69	62	41	63	46	59	60	66	fuga en junta Gibault aún no reparada		fuga
135-A	T	51	41	68	55	70	53	47	54	fuga posiblemente hacia materiales (correlación)		posible fuga
	T	39	56	56	55	60	63	53	48			posible fuga
189	T	61	63	60	69	63	51	58	62	Posible fuga en dirección al Instituto de Astronomía		posible fuga
187	T	44	49	53	52	53	47	53	54	Fugas en tubería de riego (cobre)		no fuga
sábado												noviembre 20, 2010
181	T	42	48	39	37	39	40	38	44			no fuga
182	T	49	47	47	50	40	44	48	47			no fuga
183	T	44	63	49	51	49	48	43	42			no fuga
sábado												noviembre 20, 2010
135-C	T	56	55	52	47	50	51	62	50	las fugas que se escuchan en estos puntos pueden corresponder a las		fuga
tubería	T	56	59	55	55	59	55	58	56	fugas existentes en cada registro		fuga
<b>Notas y comentarios</b>												
En las fechas 9 y 16 de octubre no se pudo trabajar adecuadamente en el estacionamiento del Instituto de Investigaciones Nucleares, ya que maquinaria de construcción se encontraba operando. Por esto, y bajo la sospecha de una fuerte fuga, se trabajó la correlación en una línea sin tomas en su longitud. El sondeo indicó la evidente presencia de una fuga cercana al R150; se determinó la correlación. Se confirmaron fugas en tubería aledaña a Instituto de Astronomía, encontrando que no la había, aún habiéndola determinado anteriormente. Se tiene la impresión de que se trataba de las fugas en riego ahora controladas.												

Observados los resultados del sondeo, las correlaciones efectuadas en función de los resultados confirmaron la existencia de las fugas y lo más importante es que mostraron la ubicación exacta de las mismas.

Tabla 23. Resultados de la correlaciones realizadas en el subsector C

CORRELACIÓN					
DATOS PRELIMINARES					
Tramo	identificación		fecha/hora	Longitud (m)	material/diámetro (mm)
1	SS-C01	Cafetería Ciencias-Ed. Matemáticas	09/10/2010 11:14	66.1	acero galvanizado/125
	SS-C02		09/10/2010 11:16		
2	SS-C03	Materiales B (R150)-Materiales C (R cisterna)	09/10/2010 13:05	90.0	acero galvanizado/100
	SS-C04		09/10/2010 13:11		
	SS-C05		09/10/2010 13:14		
3	SS-C06	Materiales B (R150)-Cto Exterior (R102)	09/10/2010 13:38	68.0	acero galvanizado/100
4	SS-C07	Amoxicalli (R135-B)- Camino de la Ciencia (R135-A)	16/10/2010 10:44	97.3	acero galvanizado/125
	SS-C08		16/10/2010 10:48		
	SS-C09		16/10/2010 10:54		
	SS-C10		16/10/2010 11:01		
	SS-C10a	Amoxicalli (R135-B)- Camino de la Ciencia (R135-A)	16/10/2010 11:01	145.1	acero galvanizado/80
	SS-C11	Amoxicalli (R135-B)- Camino de la Ciencia (R135-A)	23/10/2010 11:16	101.9	acero/125
	SS-C12	Amoxicalli (R135-B)- Camino de la Ciencia (R135-A)	23/10/2010 11:28	101.9	acero/125
	SS-C13		23/10/2010 11:13	101.9	acero/125
	SS-C14	Amoxicalli (R135-B)- Camino de la Ciencia (R135-A)	23/10/2010 11:42	91.9	acero/125
	SS-C15		23/10/2010 11:45	91.9	acero/125
5	SS-C16	Jardín anexo DGB (R186)-Taller Astronomía (R187)	23/10/2010 14:49	57.6	acero galvanizado-asbesto cemento/125-100
	SS-C17		23/10/2010 14:50	57.6	
	SS-C18		23/10/2010 14:51	57.6	
6	SS-C19	Medidor nucleares-R150	26/10/2010 15:55	41.5	acero galvanizado/100
7	SS-C20	R150-R149 (reja Materiales)	26/10/2010 16:14	32.1	acero galvanizado/100
	SS-C21		26/10/2010 16:16		
	SS-C22		26/10/2010 16:30		
8	SS-C23	PUMA (R135-C)-Amoxicalli (R135-B)	26/11/2010 14:04	64.8 m	acero/125
	SS-C24		26/11/2010 14:09		
	SS-C25		26/11/2010 14:24		

Tabla 24. Resultados de la correlaciones realizadas en el subsector C (continuación)

CORRELACIÓN							
DATOS PRELIMINARES		RESULTADOS				Observaciones	Dictamen
Tramo	identificación	referencia	Dist sA	Dist sB	Calidad		
1	SS-C01	R136	3.9 m	62.2 m	92%	toma de una fuente	posible fuga
	SS-C02		3.8 m	62.3 m	92%		posible fuga
2	SS-C03	R150	-0.8 m	90.8 m	85%		no fuga
	SS-C04		4.4 m	85.6 m	76%		no fuga
	SS-C05		24.9 m	65.1 m	75%		no fuga
3	SS-C06	R150	15.6 m	52.4 m	69%		no fuga
4	SS-C07	R135-A	49.8 m	47.5 m	79%	distancia diferente con respecto al plano en ACAD	posible fuga
	SS-C08	R135-A	58.6 m	38.7 m	77%		posible fuga
	SS-C09	R135-A	84.9 m	12.4 m	77%		posible fuga
	SS-C10	R135-A	46.6 m	50.7 m	73%		posible fuga
	SS-C10a	R135-A	145.3 m	-0.2 m	81%	corrección de error en datos anteriores	-
	SS-C11	R135-B	105.9 m	-4.0 m	91%	equipos de podar operando sobre tubería	posible fuga
	SS-C12	R135-B	105.1 m	-3.2 m	92%	equipos de podar operando sobre tubería	posible fuga
	SS-C13		105.9 m	-4.0 m	93%		posible fuga
	SS-C14	R135-B	29.4 m	62.5 m	81%	equipos de podar operando sobre tubería	posible fuga
	SS-C15		95.5 m	-3.6 m	79%		posible fuga
5	SS-C16	R186	5.7 m	51.9 m	85%		posible fuga
	SS-C17		5.8 m	51.8 m	83%		posible fuga
	SS-C18		5.7 m	51.9 m	79%		posible fuga
6	SS-C19	R150	-1.5 m	43.0 m	90%	negativo: dirección contraria a radio A	fuga
7	SS-C20	R150	23.8 m	8.3 m	89%	pruebas físicas realizadas inmediatas	fuga
	SS-C21		23.9 m	8.2 m	87%		
	SS-C22		23.9 m	8.2 m	88%		
8	SS-C23		60.1 m	4.7 m	86%	existe fuga en elementos de ambos registros	no fuga
	SS-C24		67.6 m	-2.8 m	92%		no fuga
	SS-C25		66.4 m	-1.6 m	93%		no fuga

**Notas y comentarios**  
 Dados los múltiples trabajos de construcción y mantenimiento que se han estado llevando a cabo en la zona, se tuvieron ciertos errores en las correlaciones y así mismo en la determinación de algunas posibles fugas, sin embargo, las principales han sido indicadas.

La correlación más clara, importante y con menor posibilidad de error es la SS-C20. La correlación SS-C19 mostró una distancia negativa con respecto al radio A, que se encontraba en el registro de agua potable número 150 (R150), cuando el radio B estaba en el registro número 102 (R102) (aguas arriba); esto quiere decir que la fuga que el equipo estaba detectando se encontraba fuera del rango de distancia entre los radios y más específicamente se encontraba en dirección aguas abajo del registro 150, o sea, en dirección el registro contiguo que es el 149. Al cambiar el radio B de lugar, trasladándolo al registro 149 y efectuar la correlación, se observa un resultado sumamente consistente en varias repeticiones, así mismo la calidad de todas las operaciones supera el 80% de confianza, por lo que queda claro que el sonido que los radio-sensores detectaron es efectivamente una fuga. La línea de agua entre los registros 149 y 150 no tiene tomas identificadas y este trabajo en específico se realizó entre las 15 y 17 horas, que es el tiempo de comida de académicos y administrativos, de este modo, se minimizó el efecto del uso del agua durante la operación.

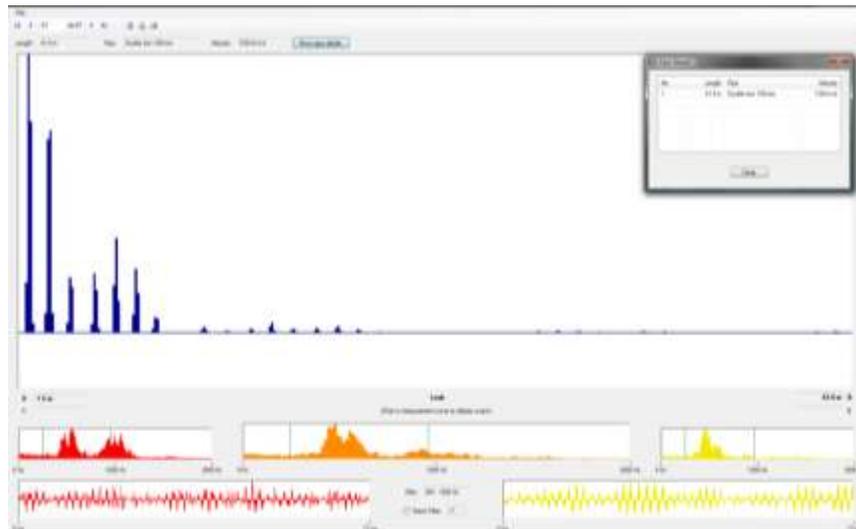


Figura 44. Imagen de la correlación SS-C19, marcando una fuga fuera de rango (números negativos)

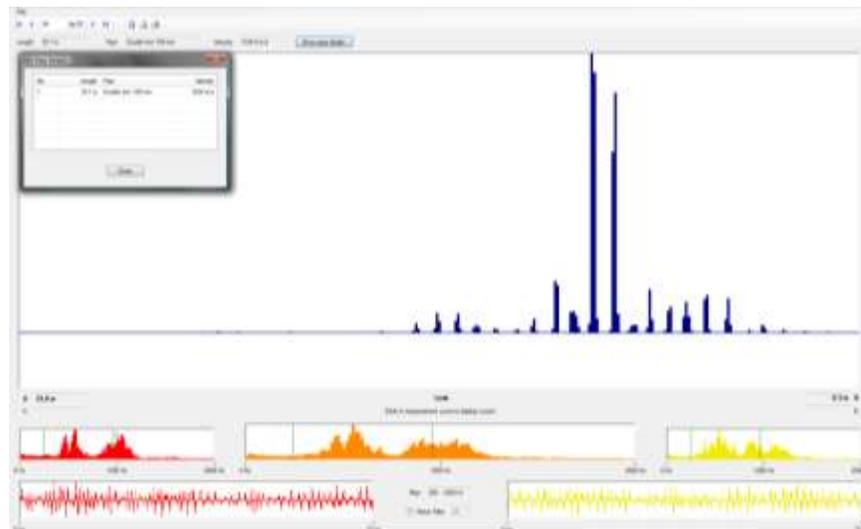


Figura 45. Imagen de la correlación SS-C20, coincidente con las correlaciones SS-C21 y SS-C22, marcando una fuga a 8.3m del radio B, ubicado en el registro 149

Las fugas fueron confirmadas según las características del sitio, de las cuales depende la selección del micrófono a utilizar; así pues, efectivamente se corroboró la existencia de algunas fugas que lo requirieron para así dar pronto aviso a la DGOC para que se consumara la reparación de la misma.

Tabla 25. Confirmación de las fugas localizadas en el subsector C

CONFIRMACIÓN											
correlación referencia	Ref mic	40 DB a 2m profundidad								Observaciones	DICTAMEN FINAL
		Nivel de ruido									
SS-C01	terraceria	41	46	45	50	52	44	50	42		fuga
	piso	40	38	40	42	21	31	46	44		
SS-C14	piso	64	67	66	68	66	58	69	66	en base de hidrante en exterior de biblioteca Amoxicalli	fuga
	terraceria	44	41	39	48	49	53	48	52		
	toque	60	62	61	60	59	65	60	61		
SS-C20	piso	54	48	52	53	55	54	57	56	bajo vegetacion junto a rampa posterior a Instituto de Materiales	fuga
<b>Notas y comentarios</b>											
Se determinó la existencia de 6 fugas y se espera que sean confirmadas por la DGOC mediante las pruebas físicas pertinentes											

Cabe resaltar que una de las fugas, identificada en la correlación SS-C20 parecía manifestarse en el drenaje aledaño, dato que se confirmó durante la reparación de la fuga, cuando se observó que el flujo en el drenaje era mínimo comparado con el observado mientras la fuga se encontraba activa, con lo que se ratifica la efectividad de la integración de los métodos para los programas de detección de fugas adecuadamente direccionados.



Figura 46. Sondeo en el registro 150 y observación del flujo en el drenaje



Figura 47. Verificación de flujo claro en el drenaje y audición de la posible caída en fuente cercana al pozo de visita



Figura 48. Correlación del tramo entre el R150 y R149 y confirmación de la fuga



**Figura 49. Descubrimiento y reparación de la fuga**

Las fugas halladas (2.5 lps aproximadamente) no escapan a los tipos de fuga encontrados con generalidad en el subsector.

- Cisterna Principal de la Facultad de Ciencias (0.2 lps). Caída continua de agua por el rebosadero de la cisterna y serio intemperismo de los muros con posible filtración.
- Junta gibault de acero al carbón en registro de agua posterior a Biblioteca Amoxicalli (0.02 lps). Empaque gastado y roto que provoca el escape del agua por la junta.
- Hidrante junto a entrada cancelada de Biblioteca Amoxicalli (nd). Falla de la junta mecánica entre un codo y un tubo de acero galvanizado por corrosión del tubo a causa de la antigüedad del mismo.
- Jardín entre Instituto de Astronomía y Anexo de la DGB. Sección de tubo de cobre de 1/2" extraído y en conexión de niple y tee de acero galvanizado para válvula de acoplamiento rápido por impacto accidental.
- Posterior a edificio B de Instituto de Materiales (aprox. 2 lps). Tubo fisurado transversalmente de asbesto cemento abrazado por la raíz de un árbol; zona de presión superior a los 4 kg/cm<sup>2</sup>.
- Registro de agua potable de Programas Universitarios. Falla en junta térmica entre PVC y PEAD.

103

Tras la reparación de las fugas, especialmente de la más importante en cuanto a su caudal, se realizó una medición nocturna. Esta no fue tan exitosa como se esperaba, a pesar de haber recuperado casi 1 lps de pérdida.

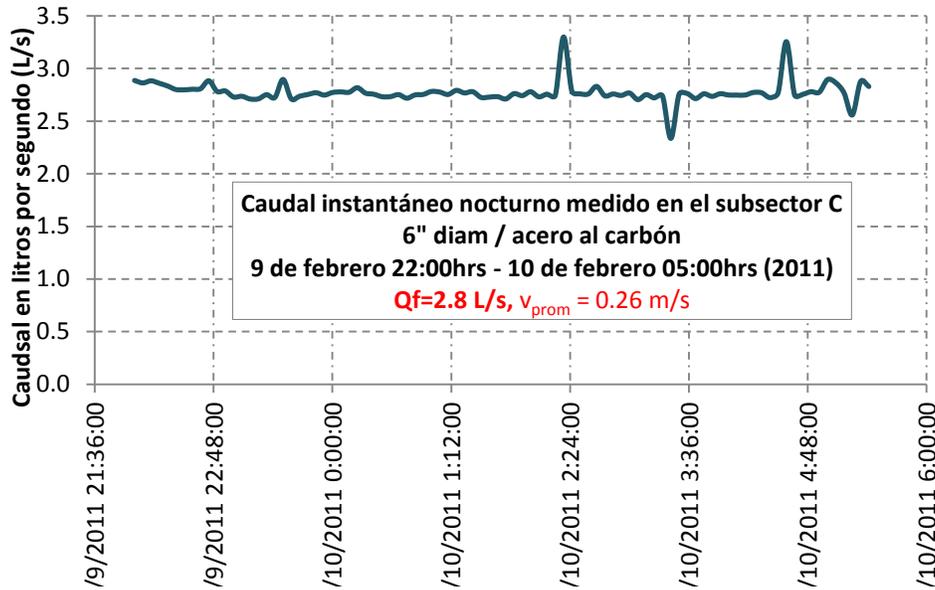


Figura 50. Medición de caudal nocturno de confirmación en principio de semestre del subsector C

Por lo anterior, se hizo un sondeo de verificación, encontrando con esto que a pesar de haber eliminado la fuga en el Instituto de Materiales, el tubo continuaba dañado más adelante de la reparación. Por esto, se propusieron dos soluciones al problema: sustituir el área hidráulica del tubo con un tubo plástico rígido (in-liner) o inhabilitar la sección de tubo, aprovechando que no es la única tubería que abastece a la dependencia.

104

En lo que respecta a la fuga de la biblioteca Amoxicalli, la reparación tuvo un costo elevado en comparación con el beneficio obtenido, ya que se requirieron tres personas para realizarla, hubo un gran desperdicio de agua durante el proceso a causa de que no se permitió la inhabilitación de la línea para dicha reparación, la cual, además, duró más de 5 h.

En resumen se tuvo una recuperación de casi 2.5 lps de agua; esto equivale a 216 m<sup>3</sup>/día tan sólo en el subsector C, con un área de 0.14 km<sup>2</sup>.

Este fue el procedimiento a seguir en algunos de los subsectores, ya que en otros no fue posible la medición nocturna previo a los trabajos de detección y localización de fugas. El caso más ideal y sin errores fue precisamente el del subsector C, en el cual se pudo medir constantemente y verificar no sólo el caudal de pérdida, sino también la recuperación lograda con la eliminación de fugas.

Desde la medición de fugas hasta la eliminación de la fuga más importante, el método engloba todas las técnicas y elementos experimentados anteriormente, integrándolos al método para lograr un diagnóstico adecuado para la pronta y precisa localización y eliminación de fugas.

Bajo el procedimiento, se localizaron 26 fugas en los subsectores que se analizaron. El caudal estimado, principalmente de acuerdo a la experiencia adquirida y también con algunos aforos en donde fue posible, es de 6.55 lps detectados, de los cuales aproximadamente sólo la mitad han sido recuperados.

Tabla 26. Fugas detectadas en los subsectores trabajados durante la campaña de detección de fugas

Fugas detectadas en subsectores			
SH	SS	Fuga detectada/observada	Q <sub>f</sub> estimado (lps)
1	A	detección no realizada por caudal mínimo medido (0.24lps)	-
	B	estacionamiento geología-geografía	0.2
		cercano R153-A (neurociencias)	0.05
		R154 geografía("cancelada")	0.4
	D	DG Personal-riego	0.02
	O	Camellón riego F. Odontología	0.02
	P	ninguna	-
	Q	válvula dañada R124-F. Medicina	0.03
	R	F. Química-jardín de las ardillas	0.01
		F. Química-acceso ed. B	0.03
		F. Química- toma cisterna a.s. biomédicas	0.2
	U	Junta R106-IIMAS	0.1
		Riego IIMAS-Invernadero	0.1
		Riego IIMAS (jardín atrás)	0.1
	W	F. Química ed A-extractores	0.5
		F. Economía-tras muro acceso	0.3
Jardín CELE-nilple de var degollado		0.05	
2	S	F. Economía-Auditorio CEDEM	0.4
3	C	I. Materiales-estacionamiento lateral (rampa)	3
		Cisterna Principal de la Facultad de Ciencias	0.2
		Registro de agua posterior a Biblioteca Amoxicalli	0.02
		Hidrante junto a entrada cancelada de Biblioteca Amoxicalli	0.01
		Jardín entre Instituto de Astronomía y Anexo de la DGB (riego)	0.1
		R135-C PUMA	0.1
	G	F. Ingeniería (Anexo)-medidor termofluidos	0.4
	H	ninguna	-
	I	válvulas cisterna ccadet	0.01
	J	Tubería 12" TV UNAM-FCPS	0.2
<b>TOTAL (estimado)</b>			<b>6.55</b>

## 4.5. Perspectivas de los programas implementados

En lo futuro PUMAGUA espera contar con un sistema de información geográfica ligado a un sistema SCADA que permita operar los elementos más importantes para el control de la red de manera remota y, por otro lado, obtener información de los elementos ya instalados también de manera remota y en tiempo real. Estos mecanismos permitirían detectar cualquier anomalía en la red y facilitarían su atención inmediata, logrando con esto que la red esté en óptimo funcionamiento.

En algún momento, contando con esta tecnología, se podría agregar el uso de pre-indicadores de fugas, sensores de presión, velocidad y gasto con data logger y protocolos de comunicación remota, especialmente en puntos de control establecidos para la medición en subsectores.

Por el momento se apuesta por el monitoreo de las acciones realizadas y la continuidad del programa, considerando todas sus virtudes y necesidades. Lo primordial para esta etapa es lograr la instalación de las válvulas reguladoras de presión, que permitirán, según los cálculos<sup>19</sup>, reducir el caudal de pérdidas hasta en un 50% y por supuesto, el riesgo de aparición de futuras fugas. Además, será posible sostener la presión en la red tras la reparación de fugas, lo que reducirá el impacto en el resto de la red.

Por otro lado, parte de lo que motivó el atraso en el avance de la implementación de las técnicas y los métodos más exitosos y que por ende generó dudas acerca de su efectividad, fue que no se visualizaron las claves para la sostenibilidad de las estrategias implementadas. Por esto, se tratará de lograr la comprensión de las técnicas, lograr un compromiso sobre el desarrollo de las actividades y sobre todo llegar a formar un sistema de organización e información que dé soporte y así sostenibilidad al método.

De esta manera, integrando todos los elementos necesarios para sostener el programa, se lograrán efectos a largo plazo, que se traducirán en ahorros significativos de agua.

---

<sup>19</sup> Ing. José Daniel Rocha Guzmán. Tesis: Sectorización de la red de agua potable de Ciudad Universitaria, 2010

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

#### 5.1.1. Logros alcanzados con el programa

En esta etapa del programa, los trabajos de campo de la sectorización de la red de CU están al 100%, la eliminación de fugas llegó a sumar hasta 21 lps de agua, aunque teniendo como consecuencia el ligero aumento en la presión de la red dentro de cada sector y, por lo tanto, la transferencia de esos flujos a otra parte de la red. Las válvulas reguladoras de presión están en proceso de instalación, con lo que se logrará ahorrar hasta el 50% del agua que aún se pierde en fugas. La micro medición ha avanzado notablemente, llegando a representar aproximadamente el 60% de los usuarios; al llegar al 100% de la medición esperado, se contará con elementos suficientes para la realización de un balance con resultados concretos y, como consecuencia de la operación de las VRP, la reducción en el suministro será evidente.

Por otro lado, es importante mencionar que en paralelo a estas tareas, se han llevado a cabo campañas de concientización en cuanto al consumo responsable y cuidado del recurso, con lo que han mejorado los hábitos de consumo de la población y la reacción ante las eventualidades, como fugas visibles e incluso probables flujos de agua de fugas en el drenaje, con lo que la capacidad de los operadores para dar respuesta y pronta atención a las fugas se ha incrementado favorablemente.

Uno de los logros fundamentales del programa ha sido incentivar la participación de los operadores de la red, a pesar de las diversas dificultades que se han presentado a lo largo del desarrollo de las actividades, sin embargo, con el tiempo se han ido integrando al programa, sin dejar de lado sus actividades normales. Se les ha dado a entender que al reducir su actividad en cuanto a atención a fugas, dispondrán de más tiempo para dar mantenimiento preventivo a la red.

107

#### 5.1.2. Causas que retrasaron el desarrollo de programas exitosos

Un programa tan ambicioso, incluyente y multidisciplinario como este, implica muchos cambios en los hábitos de la comunidad universitaria en todos sus estratos, y todo cambio radical genera desconcierto entre los involucrados.

Por lo anterior, es necesario que para el éxito de un programa, se incluya a todos los actores, tanto para la generación de soluciones, como para la implementación de las acciones. En este sentido, se requiere de una amplia comunicación, principalmente, de los objetivos y metas a alcanzar, de manera clara y consistente. Cada uno de los personajes debe concebir responsabilidad y compromiso sobre el papel que desempeña y la importancia de su participación activa dentro del programa.

A partir de esto, se desprenden las causas que motivaron el atraso en una o varias de las acciones llevadas a cabo.

**a. Conflictos de entendimiento entre tomadores de decisiones**

El desentendimiento entre los desarrolladores del proyecto y los administradores del recurso, provocó el desinterés de los últimos para llevar a cabo en tiempo y forma las acciones necesarias para el desempeño adecuado del programa y el consecuente ahorro del recurso. Posteriormente, estos desacuerdos derivaron en periodos de no negociación en los que fue difícil trabajar de lleno sobre el plan.

**b. Conflictos con poderes fácticos**

Uno de los grupos con mayor poder de decisión dentro de la comunidad universitaria es precisamente el sindicato de trabajadores de la UNAM (STUNAM), y más específicamente, el personal de obras y conservación, que se dedican a suministrar y mantener en orden los servicios en la UNAM. Su contrato colectivo de trabajo les otorga derechos que fueron ignorados de inicio, sin contar con que ellos reaccionarían de forma negativa, deteniendo por completo algunos trabajos y procurando la negociación de sus beneficios. Esto, pues, tuvo impactos económicos y atrasos de tiempo que se intentaron recuperar durante el desarrollo del programa, una vez aclarado el conflicto.

**c. Desconocimiento de la comunidad universitaria**

En general, la población en las ciudades tiene un desconocimiento severo o total de las causas y la importancia de las fugas, por lo que con frecuencia pasan por alto e incluso no notan desperdicios que ven en la calle o que tienen en sus casas, a menos de que esto tenga un impacto en su economía. Este comportamiento lo reproducen en su vida cotidiana y por lo mismo, generalmente no se dan cuenta o no les preocupan los desperdicios. Generar la conciencia necesaria para hacer participe a la comunidad en general, es una ardua tarea que no fue atendida con prontitud. En una etapa ya avanzada del programa, gran parte de la comunidad, incluyendo personal de mantenimiento en las dependencias, no consideraba que las fugas representaban un mayor desperdicio que las fallas o la antigüedad de los muebles sanitarios, por lo que destinaban recursos y tiempo a resolver estos aspectos y no el tema de las fugas.

Por otro lado, la mayor parte de las personas piensa que todas las fugas se manifiestan en la superficie, por lo que al verlas eventualmente las denuncian. Sin embargo, se ha visto a lo largo de este trabajo que gran parte del agua de las fugas generalmente no sale a la superficie y que bajo nuestros pies se puede estar perdiendo cada segundo una cantidad invaluable de agua, y algunas veces no es difícil de detectar, sólo es cuestión de poner un poco de atención al entorno.

**d. Promoción de soluciones simples para el ahorro del recurso**

Con objetivos claros de dar a conocer el programa e introducir a las dependencias al mismo, se promovieron acciones inmediatas de corto plazo, pero que no representan verdaderos ahorros. Muchas dependencias realizaron significativas inversiones económicas para el ahorro de agua, pero las acciones de mayor impacto en ahorro del recurso y menor inversión económica no fueron llevadas a cabo y así, se postergó la oportunidad de recuperar importantes cantidades de agua.

**e. Avance no estratégico en implementación de acciones estratégicas**

Con el afán de dar avance inmediato en las actividades más importantes, se buscó implementarlas en donde fuese posible, y no necesariamente donde fuera necesario para que tuviera relevancia. Así entonces, se observaron resultados aislados, creando ambigüedad en los mismos y generando incredulidad y desapego con respecto a las soluciones promovidas como consecuencia.

**f. Falla en entrega y aplicación de recursos**

Siendo un programa tan ambicioso, es natural que exista cierta desconfianza con respecto a su éxito y utilidad, por esto, los recursos eventualmente no fueron entregados en tiempo y forma.

## **5.2. Recomendaciones**

### **5.1.3. Recomendaciones sobre la red y la administración de la misma**

La administración de la red obedece a un esquema ya establecido tiempo atrás, de modo tal que lo más recomendable para lograr una total implementación y la asimilación del programa, es buscar las áreas de oportunidad y adaptar el programa al esquema establecido.

- (a) Formar un grupo de trabajo totalmente integrado. Asignar tareas y responsabilidades específicas, de manera que cada equipo trabaje de manera independiente, pero integrados a un solo objetivo y nunca dejando de lado la interrelación entre los grupos y el intercambio de información.
- (b) Participación del personal de operación. En este sentido, la recomendación sería generar interés en ellos sobre el programa y los beneficios obtenidos a corto y largo plazo; proporcionar la información y capacitación necesarias para el adecuado desarrollo de las actividades que requiere el programa para lograr la continuidad del proyecto.
- (c) Control de las fugas, particularmente, la instalación y correcta operación de las válvulas reguladoras de presión, amén de lograr ahorros inmediatos y significativos de agua.
- (d) Campaña de detección y eliminación de fugas, incluyendo la eventual sustitución de tramos de tubería, será fundamental para lograr recuperar importantes caudales de agua en el largo plazo.
- (e) Programa preventivo, lo cual significará la reducción de las pérdidas y del riesgo de aparición de fugas.
  - Mantenimiento preventivo de tubería y elementos
  - Modificación de las políticas de operación
  - Automatización de los elementos clave para la operación eficiente de la red
  - Control activo de fugas
- (f) Oportunidades de desarrollo de los programas implementados

Oportunidades inmediatas que podrían dar resultados a futuro y llegar ser parte de la operación normal en el tema del agua.

- Incentivos económicos y en especie (reconocimientos públicos, días libres, etc.) para el personal de operación
- Programas de modernización de infraestructura

- Generación de conciencia y conocimiento del tema de las fugas en la comunidad universitaria
- Interrelación con otros programas de orden ecológico y de modernización aplicables en la Universidad
- Generación de un grupo de trabajo específico de atención y seguimiento al programa
- Invitación a diversas empresas para la capacitación de trabajadores y profesionistas del área



Figura 51. Requerimientos para la sostenibilidad de un sistema

Por supuesto no hay que dejar de lado la regulación administrativa, que es precisamente uno de los puntos álgidos del sistema de gestión y que tiene como consecuencia frecuente la falla técnica de la red. Esto quiere decir que en las obras nuevas es necesario regular las conexiones en cuanto a su número y características; de manera ideal deberían ser solicitadas a la Dirección de Obras, a quien se consultaría sobre las condiciones a las que debe estar sujeta dicha conexión, incluyendo su debido registro en el plano, y supervisando la calidad del montaje y de los materiales para garantizar así la correcta instalación. De este modo se minimizarían ambigüedades en el plano de la red, así como anomalías de construcción no previstas que posteriormente fallan, provocando fugas (en promedio 2 años después).

# FUENTES

## Generales

1. Comentario emitido por el Ing. Gabriel Quadri en noticiero radiofónico Enfoque del 24 de febrero y 23 de junio de 2010.
2. Comentario emitido por el Ing. Gabriel Quadri en noticiero radiofónico Enfoque del 9 de marzo y 13 y 20 de julio de 2011.
3. Requisitos fundamentales y lineamientos generales para el estudio, proyecto, construcción y puesta en marcha de una red de agua potable en forma sectorizada y con control de presiones. EFE Asesores S. A. de C. V. para la Comisión de Aguas del Estado de México CAEM, 2011.
4. Jacobo Villa, Marco Antonio. Saborío Fernández, Elsa. La Gestión del agua en México. Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.
5. Rocha Guzmán, José Daniel. Sectorización de la Red de Agua Potable de Ciudad Universitaria. Tesis que presenta para obtener el título de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
6. Artículo publicado para la revista de la Asociación Autónoma del Personal Académico de la UNAM (AAPA UNAM). Año 2 no. 4, Octubre-Diciembre 2010
7. Anuario electrónico de la Población de la UNAM. Subdirección de Sistemas de Información y Estadística, 2010.
8. Órdenes de Trabajo 2007-2010 del Taller de la Red de Agua de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM.
9. Contrato Colectivo de Trabajo del Sindicato de Trabajadores de la UNAM STUNAM. Ciudad Universitaria, 2011.
10. Revista OBRAS. Grupo Editorial Expansión. Números 453 (septiembre de 2010) y 457 (enero de 2011)

111

## Institucionales

11. Cuarto Informe de Gobierno de la Presidencia de la República. México, 2010.
12. Estadísticas Nacionales sobre cobertura de servicios, crecimiento poblacional y crecimiento económico del año 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI.
13. Estadísticas del Agua en México 2011. Comisión Nacional de Agua CONAGUA
14. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario 1994

## Internacionales

15. Estudios de disponibilidad de agua per cápita. UNESCO, 2010.
16. Inversión en infraestructura hidráulica en el mundo. World Bank. 5th World Water Forum
17. Conference Proceedengs Water Loss Congress2007. Bucharest, Romania. International Water Association. Vol. 1. Sessions A2, A4, B1, B2, B3, C1, C3
18. Conference Proceedengs Water Loss Congress2007. Bucharest, Romania. International Water Association. Vol. 2. Sessions B7, C5

19. Conference Proceedings Water Loss Congress 2007. Bucharest, Romania. International Water Association. Vol. 3. Sessions A8, B8
20. Sistema Modular de Capacitación para la EPSA Boliviana. Asociación Nacional de Empresas de Agua Potable y Alcantarillado. La Paz Bolivia, 2004. Módulos 4, 20, 28, 31
21. Mackenzie, Ronnie. Component Based Analysis for Management of Leakage in Potable Water Supply Systems.
22. Lambert, A. O., Timothy G. Brown, M. Takizawa, D. Weimer. A review of performance for real losses from water supply systems. IWA/AQUA, 2000.
23. Lambert Allan. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems?. IWA, 2003.
24. Velásquez H., Carlos Fernando. Toro B., Mauricio. Calibración de un modelo en computadora para simular el golpe de ariete en redes cerradas. Revista Avances en Recursos Hidráulicos, número 13, Medellín, Colombia, 2006.
25. Bartram, Jamie. Thyssen, Niels. Gowers, Alison. Pond, Kathy. Lack, Tim. Water and Health in Europe. European Environment Agency and World Health Organization Regional Office for Europe.
26. Quality tolos. Management and Consulting, South Africa (.www.kwaliteg.co.za)
27. Córdoba Hernández, Rafael. Documentación gráfica sobre sostenibilidad-Agua: distribución y consumo. Madrid, España, 2004.

### Comerciales

28. Documento explicativo sobre aracterísticas y beneficios de la "smart ball". Pure Technologies Ltd. [www.puretechnologiesltd.com/html/smartball\\_water.php](http://www.puretechnologiesltd.com/html/smartball_water.php)
29. Manual de Operación del Geofono modelo AS3, marca Gutermann. Gutermann México. 2010
30. Manual de Operación del Correlador modelo AQ610 y software, marca Gutermann. Gutermann México, 2010.
31. Manual de Operación y Mantenimiento de válvulas reguladoras de presión serie 900, marca Bermad. Bermad México, 2011.
32. Manual de operación de medidores de flujo volumétricos marca Badger Meter. Badger Meter Inc. Mexico, 2010.
33. Visitas demostrativas de equipo para detección de fugas por TEASA. Tecnología Aplicada S. A. de C. V.