



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Gestión y Control de Fugas en dos
Sectoros de la Red de Agua Potable de
la Ciudad de México**

Tesina

Que para obtener el título de

Especialista en Hidráulica Urbana

P R E S E N T A

José Moisés Reyes Medrano

Director de Tesina

M.I. Carlos Gonzalo Franco Domínguez



Ciudad Universitaria, CDMX, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice de contenidos

I. INTRODUCCIÓN	7
I.1. OBJETIVO	7
I.2. INTRODUCCIÓN A LAS FUGAS	8
I.2.1. Definición de fuga	8
I.2.2. Factores de influencia para reducir fugas	9
I.2.3. Causas y efectos de las fugas	11
I.2.4. Desarrollo de una estrategia para detección de fugas	13
I.3. CARACTERÍSTICAS Y OPERACIÓN DE LOS SECTORES POR EVALUAR	16
II. EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LAS PERDIDAS	18
II.1. EVALUACIÓN DEL SISTEMA	18
II.2. BALANCE HIDRÁULICO	19
II.3. CUANTIFICACIÓN DE PERDIDAS	20
II.3.1. Cuantificación de pérdidas en Tanques	21
II.3.2. Cuantificación de pérdidas en líneas de conducción	22
II.3.3. Cuantificación de pérdidas en redes de distribución, Caudal Mínimo Nocturno	23
II.4. MEDICIÓN DE FUGAS EN REDES CON OPERACIÓN INTERMITENTE	26
III. TÉCNICAS PARA REDUCCIÓN Y DETECCIÓN DE PÉRDIDAS	27
III. 1. GESTIÓN DE PRESIONES	27
III.2. CONTROL ACTIVO DE FUGAS	32
III.2.1. Métodos acústicos	32
III.2.2. Trazadores de gas	36
III.2.3. Video inspección en redes presurizadas	37
III.2.4. Georradar	38
III.2.5. Localización de fugas vía Satélite	39
IV. ANÁLISIS DE LOS SECTORES SELECCIONADOS PARA LA GESTIÓN DE PERDIDAS	41
IV.1. BALANCE HIDRÁULICO DE LOS SECTORES	41
IV.1.1. Componentes del balance hidráulico	41
IV.2. INDICADORES DE GESTIÓN DE LOS SECTORES	54
IV.3. CUANTIFICACIÓN DE LAS PERDIDAS	56
IV.4. GESTIÓN DE PRESIONES	59
IV.4.1. Salida Fija	59
IV.4.2. Modulación por tiempo	62
IV.4.3. Modulación por consumo	68
V. CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	81

Índice de figuras

FIGURA 1. VOLUMEN DE AGUA PERDIDO EN TUBERIA DE 1/2" CON DIFERENTES TAMAÑOS DE RUPTURA A 5 M, 15 M Y 32M DE PRESIÓN	8
FIGURA 2. ÍNDICE: EMPLEADOS DEDICADOS AL CONTROL DE FUGAS.	9
FIGURA 3. ÍNDICE: REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS.	10
FIGURA 4. ÍNDICE: REHABILITACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS	10
FIGURA 5. PREGUNTAS BÁSICAS PARA DESARROLLAR UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE PERDIDAS.	13
FIGURA 6. UBICACIÓN DE LOS SECTORES BJ-02 Y BJ-03	17
FIGURA 7. BALANCE HIDRÁULICO, IWA.	19
FIGURA 8. CAMBIO DE NIVEL EN TANQUES DEBIDO A FUGAS.	21
FIGURA 9. COMPONENTES DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO	24
FIGURA 10. RELACIÓN PRESIÓN VS CAUDAL DE FUGA.	27
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE PRESIONES EN UNA RED SIN GESTIÓN	28
FIGURA 12. TIPOS DE MODULACIÓN PARA LA GESTIÓN DE PRESIONES.	29
FIGURA 13. EJEMPLO DE PUNTO CRÍTICO, SIENDO EL PUNTO MÁS ALEJADO DE LA ENTRADA DEL SECTOR.	30
FIGURA 14. EJEMPLO DE PUNTO CRÍTICO, SIENDO EL PUNTO MÁS ALTO DEL SECTOR.	30
FIGURA 15. GEÓFONO, MICRÓFOTO DE PISO.	33
FIGURA 16. GEÓFONO, VARILLA ACÚSTICA/MICRÓFONO DE MANO.	33
FIGURA 17. OPERACIÓN E INSTALACIÓN DE LOS CORRELADORES.	35
FIGURA 18. OPERACIÓN DEL TRAZADOR DE GAS.	36
FIGURA 19. VIDEO INSPECCIÓN EN REDES PRESURIZADAS.	37
FIGURA 20. OPERACIÓN DEL GEORADAR.	38
FIGURA 21. DETECCIÓN DE HÚMEDAD EN EL SUBSUELO UTILIZANDO GEORADAR.	38
FIGURA 22. DETECCIÓN DE FUGAS MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES, OPERACIÓN.	39
FIGURA 23. IDENTIFICACIÓN DE HÚMEDAD CON IMÁGENES SATELITALES.	39
FIGURA 24. GRÁFICA, REGISTROS FALTANTES EN EL MES DE ENERO DEL SECTOR BJ-02.	44
FIGURA 25. GRÁFICA, RECONSTRUCCIÓN DE LOS DATOS FALTANTES USANDO LA MEDIA ARITMÉTICA.	45
FIGURA 26. GRÁFICA, RECONSTRUCCIÓN DE LOS DATOS FALTANTES USANDO EL PATRÓN DE SUMINISTRO.	45
FIGURA 27. SUMINISTRO COMBINADO, RED PRIMARIA Y POZO, EN EL SECTOR BJ-03.	46
FIGURA 28. CURVA DE TRABAJO DEL POZO ROSENDO ARNAIZ EN EL SECTOR BJ-03.	47
FIGURA 29. AFORO DEL POZO ROSENDO ARNAIZ EN EL SECTOR BJ-03.	47
FIGURA 30. BALANCE HIDRÁULICO DEL SECTOR BJ-02.	52
FIGURA 31. BALANCE HIDRÁULICO DEL SECTOR BJ-03.	53
FIGURA 32. RELACIÓN ENTRE EL CARL, UARL E ILI PARA LA GESTIÓN DE PERDIDAS.	55
FIGURA 33. GRÁFICA, SUMINISTRO, CONSUMO Y FUGAS EN EL SECTOR BJ-02.	56
FIGURA 34. GRÁFICA, SUMINISTRO, CONSUMO Y FUGAS EN EL SECTOR BJ-03.	56
FIGURA 35. ANÁLISIS DEL SUMINISTRO EN EL SECTOR BJ-02.	57
FIGURA 36. ANÁLISIS DEL SUMINISTRO EN EL SECTOR BJ-03.	57
FIGURA 37. GESTIÓN DE PRESIONES UTILIZANDO EL MÉTODO "SALIDA FIJA" EN EL SECTOR BJ-02. [9]	59
FIGURA 38. RELACIÓN PRESIÓN VS CAUDAL DE FUGA EN EL SECTOR BJ-02. [9]	59
FIGURA 39. CURVA DE VARIACIÓN HORARIA DEL SECTOR BJ-03.	60
FIGURA 40. RELACIÓN PRESIÓN VS CAUDAL DE FUGA EN EL SECTOR BJ-03, MODULACIÓN SALIDA FIJA.	61
FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-03 EN LOS HORARIOS DE MÍNIMA (IZQUIERDA) Y MÁXIMA DEMANDA (DERECHA).	61
FIGURA 42. GRÁFICA, RECUPERACIÓN DE CAUDALES EN EL SECTOR BJ-03 CON SALIDA FIJA A 14 [M] DE PRESIÓN.	62

FIGURA 43. CURVA DE VARIACIÓN HORARIA DEL SECTOR BJ-02.	63
FIGURA 44. RELACIÓN PRESIÓN VS CAUDAL DE FUGA EN EL SECTOR BJ-02, MODULACIÓN POR TIEMPO.	63
FIGURA 45. REGULACIÓN DE PRESIÓN DIURNA Y NOCTURNA, SECTOR BJ-02.	64
FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-02, HORARIO DE CONSUMO MÍNIMO (IZQ.) Y CONSUMO MÁXIMO (DER.)	64
FIGURA 47. RECUPERACIÓN DE CAUDAL EN EL SECTOR BJ-02 UTILIZANDO MODULACIÓN POR TIEMPO.	65
FIGURA 48. REGULACIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-03 UTILIZANDO MODULACIÓN POR TIEMPO.	66
FIGURA 49. RECUPERACIÓN DE CAUDAL EN EL SECTOR BJ-03 UTILIZANDO MODULACIÓN POR TIEMPO.	67
FIGURA 50. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-03 EN LOS HORARIOS DE MÍNIMA (IZQ.) Y MÁXIMA DEMANDA (DER).	67
FIGURA 51. MODULACIÓN POR CONSUMO UTILIZANDO EL PUNTO CRÍTICO DEL SECTOR.	68
FIGURA 52. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS DEL SECTOR BJ-02.	69
FIGURA 53. REGULACIÓN DE PRESIÓN POR CONSUMO, BJ-02	71
FIGURA 54. RECUPERACIÓN DE CAUDAL, MODULACIÓN POR CONSUMO EN EL SECTOR BJ-02	71
FIGURA 55. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-02, HORARIO DE MÍNIMA DEMANDA (IZQ.) Y DE MÁXIMA DEMANDA (DER.)	72
FIGURA 56. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS DEL SECTOR BJ-03.	73
FIGURA 57. REGULACIÓN DE PRESIONES EN EL SECTOR BJ-03 UTILIZANDO MODULACIÓN POR CONSUMO.	75
FIGURA 58. RECUPERACIÓN DE CAUDAL EN EL SECTOR BJ-03 UTILIZANDO MODULACIÓN POR CONSUMO.	75
FIGURA 59. PASOS BÁSICOS PARA IMPLEMENTAR UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE PRESIONES.	78
FIGURA 60. RELACIÓN ENTRE PERDIDAS POR VOLUMEN Y PERDIDAS FINANCIERAS DEL AGUA NO CONTABILIZADA.	80

Índice de tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES BJ-02 Y BJ-03	16
TABLA 2. BENEFICIOS DE LA GESTIÓN DE PRESIONES	31
TABLA 3. MÉTODOS Y TECNOLOGÍAS PARA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS.	40
TABLA 4. RESUMEN DE LOS REGISTROS DE CAUDAL EN EL SECTOR BJ-02.	41
TABLA 5. RESUMEN DE REGISTROS FALTANTES EN EL SECTOR BJ-02.	42
TABLA 6. VOLUMEN TOTAL SUMINISTRADO EN EL SECTOR BJ-02 EN EL PERIODO DE REGISTROS.	42
TABLA 7. VOLUMEN NO REGISTRADO EN EL SECTOR BJ-02.	43
TABLA 8. OBTENCIÓN DE LOS DATOS FALTANTES UTILIZANDO EL PATRÓN DE SUMINISTRO.	44
TABLA 9. SUMINISTRO EN EL SECTOR BJ-03.	48
TABLA 10. RESUMEN DEL SUMINISTRO EN EL SECTOR BJ-02.	48
TABLA 11. RESUMEN DEL SUMINISTRO EN EL SECTOR BJ-03.	48
TABLA 12. TIPOS DE USUARIOS EN EL SECTOR BJ-02.	49
TABLA 13. VOLUMEN POR TIPO DE USUARIOS EN EL SECTOR BJ-02.	50
TABLA 14. TIPO DE USUARIOS EN EL SECTOR BJ-03.	50
TABLA 15. VOLUMEN POR TIPO DE USUARIOS EN EL SECTOR BJ-03.	50
TABLA 16. AGUA NO CONTABILIZADA EN LOS SECTORES BJ-02 Y BJ-03.	51
TABLA 17. VOLUMEN ANUALIZADO DE PERDIDAS REALES EN LOS SECTORES BJ-02 Y BJ-03.	52
TABLA 18. INDICADORES DE GESTIÓN EN LOS SECTORES BJ-02 Y BJ-03.	54
TABLA 19. REGULACIÓN DE PRESIÓN CON DIFERENTES CONSIGNAS, SECTOR BJ-03.	66
TABLA 20. CURVA DE VARIACIÓN HORARIA Y PRESIÓN REGULADA, SECTOR BJ-02	70
TABLA 21. CURVA DE VARIACIÓN HORARIA Y REGULACIÓN DE PRESIONES, SECTOR BJ-02	74
TABLA 22. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE GESTIÓN DE PRESIONES.	77

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1. AGUA NO CONTABILIZADA	18
ECUACIÓN 2. EFICIENCIA FÍSICA	18
ECUACIÓN 3. CAUDAL DE FUGA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO/REGULACIÓN	21
ECUACIÓN 4. CAUDAL DE FUGA EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.	22
ECUACIÓN 5. MEDICIÓN DE VOLUMEN PARA DETERMINAR FUGAS EN LÍNEA DE CONDUCCIÓN.	22
ECUACIÓN 6. CAUDAL DE PERDIDAS.	24
ECUACIÓN 7. CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO DOMÉSTICO, ESTIMACIÓN.	25
ECUACIÓN 8. CONSUMO MÍNIMO NOCTURNO DE USUARIOS PEQUEÑOS NO DOMÉSTICOS, ESTIMACIÓN.	25
ECUACIÓN 9. FACTOR DÍA/NOCHE PARA EL MÉTODO DE CMN.	25
ECUACIÓN 10. CORRELACIÓN, DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA DE FUGA.	34
ECUACIÓN 11. DETERMINACIÓN DEL UARL	55

I. Introducción

Conforme a los últimos datos publicados por la Asociación Internacional del Agua (*IWA*, por sus siglas en inglés) a través de la iniciativa “Día Mundial de Perdidas de Agua (*World Water Loss Day*), en el mundo se pierden **346 mil millones** de litros por día en los Sistemas de Distribución de Agua Potable, esto equivaldría a poder suministrar agua para aproximadamente 2,600 millones de personas. Para ponerlo en contexto, México actualmente tiene, según cifras oficiales, una población de 128,932,753 habitantes, lo que llevaría a poder abastecer durante 20 días a toda la población del país.

Por otra parte, en México también se llevan a cabo programas de gestión para conocer la eficiencia física de las redes, uno de los más importantes se hace a través del Programa de Índices de Gestión de los Organismos Operadores (*PIGOO*) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (*IMTA*) en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (*CONAGUA*), en donde se dio a conocer que en 2018 (*datos más recientes*) la eficiencia física a nivel nacional se encuentre en un 57%, es decir, se pierde en las redes el 43% del agua producida.

Actualmente, en la Ciudad de México se tienen perdidas del 40%, es por esto, que resulta necesario el realizar estudios y análisis sobre el comportamiento de la red para proponer una metodología que nos permita de manera sistemática, activa y recurrente, monitorear su comportamiento para poder actuar de manera inmediata y disminuir la pérdida de agua.

A partir de los datos existentes en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México se hará un análisis para determinar el nivel de pérdidas y de afectación existente en los sectores propuestos, esto nos permitirá evaluar para diseñar la metodología y acciones para mejorar la eficiencia en las zonas de estudio, esta metodología incluirá el uso de la tecnología existentes para detección y localización de fugas de agua en la red.

I.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el diseño y la evaluación de una metodología que nos permita reducir y controlar las pérdidas físicas en la red secundaria (Sectores), utilizando como principal herramienta de análisis el monitoreo de presión y caudal en las zonas de estudio.

I.2. Introducción a las fugas

En este capítulo se hace un breve repaso sobre los conceptos fundamentales que se necesitan conocer para entender las fugas presentes en una red de agua potable, se define lo que es una fuga, los factores de influencia por lo que se generan y como dependen de estos el volumen de agua que se puede llegar a perder, así como las causas y las consecuencias que se pueden generar hacia la población.

I.2.1. Definición de fuga

Es importante distinguir los términos “*perdidas de agua*” y “*fugas*” ya que a menudo suelen confundirse. Las *perdidas de agua* describen y son el resultado del balance hidráulico, es decir, son la diferencia de volumen entre el agua producida y el agua consumida y tienen varios componentes; por otro lado, las *fugas* son uno de los componentes de las *perdidas de agua* en el balance hidráulico y se refieren a las pérdidas físicas de agua en las tuberías, juntas, conexiones y tanques de almacenamiento principalmente.

Este tipo de pérdidas, las fugas, pueden ser grandes e incluso indetectables por días, meses o años, el volumen de agua perdido dependerá principalmente del tamaño de la ruptura, la presión en la tubería y lo más importante, el tiempo en que se atienda el problema. Este tiempo de atención podrá ser mayor o menor conforme algunos factores importantes como el tipo de suelo, si este permite que el agua se estanque o aflore a la superficie haciendo visible la fuga, también dependerá si el Organismo Operador de Agua cuenta con una política efectiva para la detección y reparación de fugas.

El otro componente de las pérdidas totales de agua son las pérdidas **no** físicas, éstas hacen referencia a conexiones ilegales, extraviadas y sub-contaje de los medidores en las tomas de servicio.

Descarga en litros por día			
Presión	5m	15m	32m
	7 013	23 376	49 090
	2 932	9 970	20 945
	2 496	8 308	17 454
	421	1 402	2 945
	234	779	1 636

El experimento fue hecho en Liverpool, Inglaterra, por una empresa privada para determinar el caudal de fuga a través de diferentes tamaños de fisuras y con diferentes presiones de prueba.

La tubería de prueba fue con un diámetro de 0.5 [in].

Figura 1. Volumen de agua perdido en tubería de 1/2" con diferentes tamaños de ruptura a 5 m, 15 m y 32m de presión

I.2.2. Factores de influencia para reducir fugas

El volumen de agua perdido que se permita en un sistema estará directamente condicionado a las políticas de operación de cada Organismo Operador de Agua, los factores principales que se involucran se pueden agrupar en cuatro categorías principalmente:

1. Recursos: financieros, personal y disponibilidad de agua.
2. Condición de la infraestructura: materiales de las tuberías, políticas de rehabilitación, presión de trabajo.
3. Metas institucionales: estructura, regulaciones y políticas.
4. Políticas para el control de fugas.

En los lugares donde existe una gran disponibilidad de agua comparada con el consumo, muchas veces resulta ser más tolerante el perder agua a través de la red, mientras que donde hay poca disponibilidad, la tolerancia es menor; sumado a esto, también tendrá influencia la plantilla de personal que se tenga destinada para atacar este tipo de problemas y esto va relacionado con la parte financiera, pues dependerá también de la disponibilidad de recursos monetarios el implementar buenas políticas y estrategias para el control de las fugas y la disminución de la pérdida de agua.

Según los datos expuestos en el PIGOO, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México cuenta con un índice de 13.81 empleados por cada mil tomas, dedicados al control de fugas. Este indicador se define con la siguiente ecuación:

$E_{DF} = \frac{N_{EDF} * 1000}{N_{FOR}}$	
Descripción	
N_{EDF} : empleados dedicados al control de fugas	Evalúa la capacidad existente de atención de fugas.
N_{EDF} : No. De empleados dedicados al control de fugas	
N_{FOR} : No. de fugas ocurridas y reparadas	

Figura 2. Índice: Empleados dedicados al control de fugas.

Una de las principales razones por las cuales existe una gran diferencia de las pérdidas por fugas en todo el mundo son las condiciones de la infraestructura que existen en los países, pues dependerá de los materiales y la calidad de estos, así como las políticas de rehabilitación y mantenimiento en cada país y de cada uno de los Organismos Operadores de Agua, y la forma de operación de sus redes.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México cuenta con un índice de rehabilitación de tuberías del 42% (al 2017), mientras que la rehabilitación de tomas domiciliarias es escasa con tan solo el 1% (al 2017). [6].

$R_{ETUB} = \frac{LT_{UB}R_E}{LT_{ubTo}} * 100$	
Descripción	
<p>R_{ETUB}: Rehabilitación de tuberías</p> <p>LT_{UBRE}: Longitud de tubería rehabilitada [Km]</p> <p>LT_{ubTo}: Longitud total de la tubería de distribución [Km]</p>	<p>Evaluar la capacidad del Organismo Operador para mantener actualizada la red de agua potable</p>

Figura 3. Índice: Rehabilitación de tuberías.

$R_{ETOM} = \frac{T_{OM}R_E}{T_{REG}} * 100$	
Descripción	
<p>R_{ETOM}: Rehabilitación de tomas domiciliarias</p> <p>T_{OMRE}: Número de tomas rehabilitadas</p> <p>T_{REG}: Número de tomas registradas</p>	<p>Evaluar la capacidad del Organismo Operador para mantener actualizada la infraestructura de tomas domiciliarias</p>

Figura 4. Índice: Rehabilitación de tomas domiciliarias

Las metas institucionales pueden resultar un tema delicado si se centran principalmente en la parte política y depende totalmente de la imposición de ciertas acciones de los gobiernos federales, estatales y municipales hacia los Organismos Operadores de Agua, pues muchas veces es más significativo ante la percepción e la población el desarrollar nuevas fuentes de abastecimiento que crear campañas de detección de fugas, la cultura del agua juega un papel importante también para la disminución del desperdicio de agua de manera inconsciente.

Por último, contar con una política de control de fugas ayudará a determinar el nivel de actividad para detección y reparación de fugas de los Organismos Operadores de Agua, estas políticas puede variar ampliamente pues algunos decidirán solamente atacar el problema de las fugas que son visibles, mientras que aquellos que cuenten con amplios recursos podrán acceder a contar con estudios y desarrollar metodologías que incluyan el uso de tecnología de última generación, así como adentrarse al monitoreo de caudal y presiones sectorizando para poder analizar zonas de alto riesgo de ocurrencia de fugas.

I.2.3. Causas y efectos de las fugas

Las fugas y la pérdida de agua tendrán causas y efectos de ambos lados, tanto por parte del consumidor como el productor, que, para este caso, claramente nos referimos al Organismo Operador de Agua.

Como punto de partida, se mencionan algunos efectos de las fugas y las pérdidas ya que estos se encuentran muy bien documentados.

- Inconvenientes en los consumidores al reducir la presión del suministro.
- Daños en la infraestructura pues se pueden crear socavones provocando inestabilidad en el subsuelo.
- Costos excesivos, estos no solo se verán reflejados por el dinero invertido para reparar los daños, también se verán afectados los costos de producción y de energía pues se elevarán de manera proporcional al porcentaje de pérdida.
- Incremento de caudal en las redes de drenaje, esto debido a las infiltraciones causando la necesidad de diseñar para una sobre capacidad de la red.
- Admisión de aire en la red, muchas veces para evitar que se pierda tanta agua, los Organismos suelen recurrir a una operación donde el suministro es intermitente que se conoce en México como “tandeo”, esto provocará daños en la infraestructura y en los medidores domiciliarios llevando a una sobre medición del valor real de consumo y se permeará hasta la facturación haciendo que no solo se tenga daño físico si no también monetario para el consumidor.
- Riesgos de salud, en redes donde la operación es intermitente y existe baja presión, se puede dar pie a que el aire que se admite pueda estar contaminado, por lo cual los consumidores quedarán vulnerables ante esta situación.

De lo anterior, podemos exponer cuatro categorías para los efectos que tienen las fugas:

- Daños a la infraestructura
- Problemas en los consumidores
- Pérdidas financieras
- Riesgos de salud

Por otro lado, las causas más comunes por las que aparecen las fugas de agua se describen a continuación.

1) *Presión en la red:*

- El volumen de agua perdido por fugas varía y este puede incrementar conforme aumente la presión en la tubería.
- Especialmente en redes con mayor edad de operación, un incremento en la presión puede conducir a la aparición de más daños haciéndolos más recurrentes en un periodo de tiempo pequeño, esto es común observarlo cuando se rehabilita la red pues al no tener ya algún punto de escape el agua, la presión incrementará y puede hacer que otros tramos se revienten.
- Localización de las fugas, si existe una presión alta en la red, esto permitirá que el agua escape más rápido haciendo que la fugas sea visible en un menor tiempo y también provocará que el ruido hecho por la fuga tenga nivel considerable auditivo por lo que permitirá de una manera sencilla, detectar estos daños. Por otro lado, si el ruido de fuga cuenta con un nivel auditivo bajo, esto provocará que se más difícil la detección.
- Aumento súbito de la presión o contar con un patrón cíclico de operación donde se este cambiando de un nivel bajo y alto en la presión, lo cual provocará fatiga en la tubería, especialmente en las de PVC, haciendo que la vida útil reduzca drásticamente.

2) *Movimientos del subsuelo*, los cuales provocarán que las tuberías se rompan y las juntas se muevan.

- Cambio en la humedad, principalmente en suelos arcillosos provocando hundimientos y fallas transversales en las tuberías.
- Cambio de temperatura.
- Fuertes heladas.
- Hundimientos provocados por terremotos, actividad minera, etc.

3) *Estado de la tubería*, el problema principal resulta en la corrosión interna y externa en las tuberías metálicas y en concreto debido a altos niveles de sulfatos ya sea en el agua o en el subsuelo, lo cual provocará que los espesores de las paredes de las tuberías se reduzcan.

4) *Baja calidad de los materiales e instalaciones*, las causas son diversas pues pueden ser desde que los empaques en las juntas de cada tramo de tubería o en las conexiones sean de mala calidad o que incluso el trabajo de instalación se haga mal.

5) *Carga en el subsuelo debida al tráfico*, este puede ser también causa de fractura de las redes pues si no existe una buena instalación y todo lo que conlleva la estabilización del subsuelo, las vibraciones debidas al tráfico pueden afectar severamente y contribuir a las rupturas de las tuberías.

6) *Métodos para el control de fugas*, dependiendo del tipo de metodología usada, ya sea activa o pasiva, este causará que el volumen perdido por fugas sea mayor o menor pues dependerá del tiempo de atención.

I.2.4. Desarrollo de una estrategia para detección de fugas

La eficacia de una estrategia para enfrentar cualquier tipo de adversidad dependerá del buen desarrollo de esta, pues influirán todas y cada una de las acciones y decisiones que se tomen para dar solución a la problemática.

Para este caso, resulta necesario el establecer los pasos del proceso analítico para examinar las causas y efectos que influyen en las pérdidas por fugas, así como la ocurrencia y la gestión de estas, lo que dará como resultado un mejoramiento en la evaluación (monitoreo), gestión y control de la red.

El éxito en el desarrollo de la estrategia para detección de fugas en las redes dependerá de plantearnos algunas preguntas, las cuales se muestran en la tabla, estas preguntas van enfocadas a conocer la red y su operación, de esta manera podremos seleccionar las herramientas correctas para encontrar la solución.

Pregunta	Herramienta
<i>¿CUÁNTO se pierde?</i>	Balance Hidráulico Identificación del tipo de pérdidas Revisión de los procedimientos de operación
<i>¿DÓNDE se pierde?</i>	Estudios Piloto Cuantificación de las pérdidas totales ¿Cuántas son pérdidas físicas (fugas)? - Red Primaria - Red Secundaria - Tanques ¿Cuántas son pérdidas no físicas?
<i>¿POR QUÉ se pierde?</i>	Revisión de la infraestructura Datos históricos Mala operación Materiales de baja calidad Factores culturales/políticos/sociales/financieros
<i>¿CÓMO MEJORAR el rendimiento?</i>	Plan de acciones / Desarrollo de estrategias Actualización del catastro de redes y padrón de usuarios / uso de tecnología como GIS Implementación de la sectorización Monitoreo de las pérdidas de agua Priorizar áreas con mayor afectación Determinación de las pérdidas no físicas Detección y localización de fugas Políticas de reparación y rehabilitación
<i>¿CÓMO MANTENER la estrategia?</i>	Capacitación y campañas de concientización Mejorar la sensibilidad hacia estos problemas Incrementar la motivación del personal Incrementar habilidades del personal Uso de tecnología y entrenamiento para mejorar las prácticas Monitoreo y seguimiento de los planes de acción Involucrar a la población Considerar políticas de gestión de demanda Programas de conservación del agua

Figura 5. Preguntas básicas para desarrollar una estrategia de gestión de pérdidas.

La reducción de las pérdidas de agua debería ser el objetivo principal de cada Organismo Operador de Agua en el mundo debido a que esto lleva indudablemente a la mejora económica y del servicio entregado a los clientes sin dejar de lado el beneficio ecológico. Existen al menos diez razones que pueden justificar el gasto para disminuir las pérdidas utilizando una estrategia para la gestión de estas y se presentan a continuación.

1. **Eficiencia de los costos de operación:** una red de distribución con un mantenimiento recurrente requerirá menos reparaciones y habrá un decremento en los costos de producción.
2. **Eficiencia del capital:** la falta de mantenimiento y la operación intermitente incrementarán el desgaste en las tuberías y los diferentes accesorios. Al mejorar el suministro se extiende la vida útil de la red y los costos de mantenimiento y reparación serán bajos a largo plazo.
3. **Mejoramiento en la medición y facturación:** menos fugas y mejoramiento en el suministro pueden producir efectos positivos en las pérdidas aparentes.
4. **Reducción de riesgos de salud:** el drenaje y otras fuentes contaminantes se pueden infiltrar en la red de agua potable debido a las fugas ocasionando enfermedades en la población.
5. **Seguridad en el suministro:** una red con un mantenimiento adecuado tendrá fugas mínimas y esto asegurará el suministro a la población.
6. **Menores daños a la infraestructura:** las fugas pueden crear socavones provocando que los caminos y las estructuras colapsen.
7. **Reducción de la carga en el drenaje:** infiltraciones en el drenaje debido a las fugas genera una carga extra en los colectores y en las plantas de tratamiento.
8. **Incremento de la satisfacción del consumidor:** además de la baja calidad de agua, cantidad inadecuada y riesgos de salud, las fugas también bajan la presión entregada a los consumidores. Mejorando el suministro se incrementará la satisfacción del usuario.
9. **Publicidad y disposición para el pago de los servicios:** pocas fugas, mejor suministro y condiciones adecuadas en la entrega de agua mejorará la perspectiva de la población hacia los servicios y esto puede generar un efecto positivo para el pago de los servicios.
10. **Reducción del estrés ecológico:** el desarrollo de una estrategia para la gestión de pérdidas disminuye el estrés en las fuentes de abastecimientos pues dejarán de ser sobre explotadas.

Las estrategias para la gestión de pérdidas pueden ser clasificadas en tres grupos principales: 1) Control pasivo; 2) Control Activo; y 3) Gestión de presiones y caudales.

Control pasivo: este se refiere a la gestión que se hace para las fugas visibles debidas al estallamiento de la tubería, generalmente son los mismos usuarios quienes las reportan o el mismo personal de operación las detecta en sus recorridos normales y por lo tanto este es el primer paso en la gestión de pérdidas asegurando que todas las fugas visibles que aparezcan se reparen.

Control Activo: es un método de intervención para reducir las fugas en la red en donde se debe desplegar todo un plan de trabajo con personal capacitado y equipo especializado para detectar y localizar las fugas que no son visibles, el propósito principal es reducir el tiempo en que la fuga se encuentra activa para poder reducir el volumen perdido.

Gestión de presiones y caudales: como ya vimos anteriormente, este método nos sirve para cuantificar y priorizar las fugas que se presentan en la red. Se convirtió en los últimos años la estrategia con mejor relación costo-beneficio para gestión de pérdidas.

En el capítulo tres se detallará algunas de las tecnologías más usadas para el control activo de fugas, así como la gestión de presiones utilizando los diferentes métodos existentes hasta ahora.

I.3. Características y Operación de los Sectores por evaluar

Para este trabajo se analizan dos sectores dentro de la Ciudad de México, ambos son parte de la Alcaldía Benito Juárez y son adyacentes, se tomo la decisión de escoger estos ya que se tiene la certeza que están totalmente aislados, los identificadores de estos son: BJ-02 y BJ-03.

El sector BJ-02 forma parte de la Colonia San Pedro de Los Pinos, su delimitación es la siguiente: al norte con Calle 4, al sur con Av. San Antonio, al oriente con Av. Revolución y al poniente con Blvd. Adolfo López Mateos (Periférico Norte). Este sector, como lo mencioné anteriormente, está totalmente aislado e instrumentado con equipos de medición de caudal y presión, la entrada al sector se ubica en la esquina del límite sur y la calle Av. Los Pinos, en este punto existe una caja de medición donde se encuentra instalado un medidor electromagnético de 8 pulgadas seguido de una válvula Reductora de Presión (VRP) de 6 pulgadas, la cual se encarga de regular la presión de entrada para que se mantenga promedio 2 [Kg/cm²]. Además de lo mencionado, dentro del sector se tienen tres puntos de medición y monitoreo de presión.

Por otro lado, el sector BJ-03, se encuentra dentro de la Colonia Nonoalco y se delimita por las siguientes calles: al norte con Av. San Antonio, al sur con calle Rembrandt, al oriente con Av. Revolución y al poniente con Blvd. Adolfo López Mateos (Periférico Norte). Este sector cuenta con una instrumentación a la entrada, con un medidor de 6 pulgadas y una válvula reductora de presión de 8 pulgadas, esta fue diseñada para una presión de regulación a la entrada también de 2 [Kg/cm²] y dentro del sector existen 3 puntos de medición y monitoreo de presión. A diferencia del sector BJ-02, esta cuenta, además, con un pozo que tiene un caudal de extracción promedio de 40 [l/s] y una presión promedio de descarga de 3.44 [Kg/cm²].

A continuación, se presentan en la tabla, los datos más importantes de los sectores que nos ayudarán a encontrar los índices de eficiencia de estos, el desarrollo para determinarlos se presenta en el siguiente capítulo.

DATO	SECTOR BJ-02	SECTOR BJ-03
ÁREA [KM ²]	0.23	0.19
PERIMETRO [KM]	2.1	1.7
POBLACIÓN [HAB]	3,339	2,535
NO. DE CUENTAS	496	251

Tabla 1. Características de los Sectores BJ-02 y BJ-03

II. Evaluación y cuantificación de las pérdidas

Para evaluar el nivel de pérdidas en los sistemas de distribución resulta necesario recurrir a una auditoría de agua la cual tiene dos objetivos principales: 1) Evaluación del Sistema; 2) El balance hidráulico.

A través de esta auditoría de agua se identificarán todos los componentes que forman parte de las pérdidas totales, las cuales, a su vez, están compuestas por dos conjuntos conocidos y mencionados anteriormente, *pérdidas físicas (pérdidas reales)* y *pérdidas no físicas (pérdidas aparentes)*. El resultado de esta auditoría arrojará el total de pérdidas en el sistema y se obtiene de restar el volumen de agua consumido del volumen de agua suministrado, este indicador se conoce como **Agua No Contabilizada**. Esta pérdida suele expresarse en [m³/año] o como un porcentaje obtenido de la relación entre el volumen de agua consumida y el volumen de agua suministrada, a esta relación se le conoce como **Eficiencia Física**.

$$\text{Agua No Contabilizada} = (\text{Agua Suministrada} - \text{Agua Consumida}) \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Ecuación 1. Agua No Contabilizada

$$\text{Eficiencia Física} = \left(\frac{\text{Agua Consumida}}{\text{Agua Suministrada}} * 100 \right) [\%]$$

Ecuación 2. Eficiencia Física

II.1. Evaluación del Sistema

El propósito de esta evaluación es comprender la operación del sistema basándonos en los datos de la zona de estudio como pueden ser demografía, población, prácticas que se lleven a cabo dentro del Organismo Operador de Agua y la capacidad técnica de los operadores. Esta evaluación debe incluir las siguientes actividades como principales:

- Pláticas con el personal directivo del Organismo Operador de Agua
- Pláticas con el personal de operación del Organismo Operador
- Visitas a campo
- Selección de las zonas donde se llevarán a cabo los estudios

Las actividades anteriores nos permitirán evaluar la posibilidad de llevar a cabo los trabajos para gestión de los sectores de manera adecuada tratando de que la afectación del suministro sea lo menor posible hacia la población.

II.2. Balance hidráulico

El balance hidráulico tiene como objetivo identificar todos los tipos de pérdidas que pudieran tenerse en el sistema. La fiabilidad de los resultados dependerá en mayor parte de los sistemas de medición que utilice cada Organismo Operador de Agua, así como las buenas practicas de los protocolos de medición y verificación de consumo. Además, resulta con igual de importancia contar con un padrón de usuarios actualizado para poder llevar a cabo el análisis de los consumos.

La Asociación Internacional del Agua, **IWA** por sus siglas en ingles (International Water Association), definió los componentes que se deben tomar en cuenta para obtener un balance hidráulico y estos se presentan en la siguiente figura.



Figura 7. Balance hidráulico, IWA.

Del balance hidráulico se desprenden dos conceptos básicos que dan lugar al Agua No Contabilizada, estos son las pérdidas reales (pérdidas físicas) y las pérdidas aparentes (pérdidas no físicas). Las primeras como lo mencionamos anteriormente se refieren a la pérdida del líquido a través de los componentes de la red mientras que las segundas están referidas principalmente a toda el agua que se entrega pero que no se mide y que además no se cobra, debido a esto, existen diferentes métodos para cuantificar estos dos componentes y estos se explican en los siguientes capítulos.

II.3. Cuantificación de pérdidas

En este capítulo se exploran los métodos tradicionales y que han servido a lo largo del tiempo, para cuantificar y detectar las pérdidas reales de agua potable en las redes de abastecimiento.

Las fugas aparecerán de diferentes maneras y en diferentes partes de la red de abastecimiento, sin embargo, podemos agruparlas en tres zonas de la red principalmente y estas son:

- 1) Tanques de almacenamiento/regulación
- 2) Líneas de conducción
- 3) Red de distribución

Las pérdidas reales se generan mayormente en la red de distribución, por lo que, el procedimiento que se use para cuantificación y detección de fugas dependerá de varios factores conforme a la operación que se tenga, entre los factores a tomar en cuenta para determinar el procedimiento de cuantificación y detección de fugas adecuado están los siguientes.

- Tipo de abastecimiento: continuo (24 horas) o intermitente (tandeo)
- Considerar si se pueden hacer cambios temporales a la operación de la red
- Conocer si la zona analizada está sectorizada totalmente, parcialmente o no hay límites fácilmente detectables.

Si la red cuenta con abastecimiento continuo o se pueden hacer los arreglos necesarios para que la zona cuente con abastecimiento las 24 horas, las fugas pueden ser medidas utilizando el método de **Caudal Mínimo Nocturno**. Si no se puede tener un abastecimiento continuo, se deberán recurrir a otros métodos basados en estimación.

Dependerá del diseño de la red de abastecimiento y distribución para poder medir en los diferentes componentes, como ejemplo se puede decir que, en una red donde se tengan varios tanques, la medición en estos se dificultará y se tendrá que tomar una muestra representativa para determinar el nivel de pérdidas, por el otro lado, si una red solo cuenta con uno o dos tanques, es muy seguro que no se podrá interrumpir el suministro para realizar las pruebas. Por esta razón resulta necesario planear las actividades a realizar.

II.3.1. Cuantificación de pérdidas en Tanques

El método utilizado para cuantificar las pérdidas en los tanques es conocido como “**drop test**”. El objetivo es monitorear el nivel en el tanque teniendo en cuenta una cierta duración de la prueba. Si se puede cortar temporalmente la operación del tanque en estudio, se deberán cerrar todas las entradas y salidas que tenga el tanque, asegurando que el nivel en el tanque sea el máximo al iniciar la prueba. Por otro lado, si no se puede cortar temporalmente el suministro, la prueba se deberá hacer por las noches, cuando la demanda es mínima.

La duración de la prueba dependerá de la operación del tanque, al menos 4 horas deberá durar la prueba, pero, se recomiendan 12 horas o más para tener resultados más confiables.

Para la medición y monitoreo del nivel en tanque se pueden utilizar diferentes herramientas y tecnologías, algunas de ellas son:

- Regleta graduada
- Sonda de medición
- Transductor de presión para medición de nivel con registrador de datos
- Sensor ultrasónico para medición de nivel con registrador de datos

El caudal de fuga se determinará con la siguiente ecuación:

$$Q_f = \frac{(d_1 - d_2) * A}{T} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Ecuación 3. Caudal de fuga en tanques de almacenamiento/regulación

Donde:

d_1 : nivel inicial [m]

d_2 : nivel final [m]

A: área de la superficie del tanque [m²]

T: tiempo de la prueba [h]

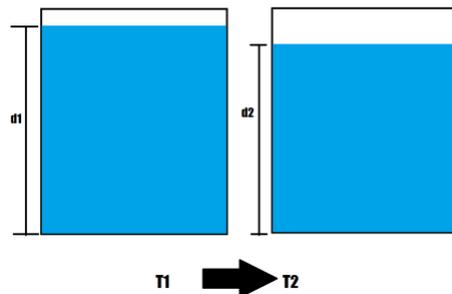


Figura 8. Cambio de nivel en tanques debido a fugas.

II.3.2. Cuantificación de pérdidas en líneas de conducción

Debido a que las conducciones suelen estar instaladas en lugares de difícil acceso, puede resultar difícil interrumpir su operación. Dependiendo de la localización del tramo donde se requiere realizar la medición y las facilidades para manipular la infraestructura, seleccionaremos la longitud del tramo, se recomienda que esta sea entre 1 [Km] y 5 [Km].

Se deberán tener las siguientes consideraciones para que la prueba resulte satisfactoria.

- Si es posible, cortar el servicio para tener aislada la zona de estudio
- Existencia de válvulas de compuerta en el tramo a medir
- El tramo para medir deberá estar libre de conexiones, o en su defecto, poder cerrarlas
- Contar con dos medidores de caudal, estos pueden ser electromagnéticos de tipo inserción o ultrasónicos
- Cada medidor debe contar con registrador de datos
- Si se utilizan medidores electromagnéticos tipo inserción, estar seguros de que se cuentan con las válvulas necesarias para instalar estos medidores, de lo contrario, se deberán instalar también las válvulas.

El procedimiento y el objetivo de la instalación de estos medidores es, uno aguas arriba de la zona de estudio y el otro, aguas abajo, con esto buscaremos conocer el volumen que pasa por cada uno de los puntos donde se encuentran instalados los medidores y así determinar el caudal de fuga.

$$Q_f = \frac{V_1 - V_2}{T} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Ecuación 4. Caudal de fuga en líneas de conducción.

Donde:

V1: Volumen medido aguas arriba [m³]

V2: Volumen medido aguas abajo [m³]

T: tiempo de la prueba [h]



Ecuación 5. Medición de volumen para determinar fugas en línea de conducción.

II.3.3. Cuantificación de pérdidas en redes de distribución, Caudal Mínimo Nocturno

Debido a la complejidad y al tamaño de la red de distribución, no siempre será posible cuantificar las fugas directamente, de aquí la importancia de la **Sectorización**. Gracias a esta implementación, resultará más sencillo la cuantificación de fugas pues al contar con una zona totalmente aislada podemos tener un mejor control del caudal suministrado y el consumido.

El método para cuantificar las pérdidas reales que se utiliza es el conocido como “**Caudal Mínimo Nocturno**”. Este método es ampliamente utilizado en las redes de distribución con servicio continuo, parte de la suposición que el consumo doméstico desciende durante la noche hasta llegar casi a cero, a pesar de que esta suposición es totalmente lógica pues la mayor parte de la población duerme de noche y no consume agua, da una solución a un problema complejo como lo es la pérdida de agua.

La información básica necesaria para realizar el análisis con este método es:

- Volumen suministrado
- Volumen consumido
- Cantidad y tipo de usuarios
- Presión nocturna promedio
- Factor día/noche (FDN)
- Longitud de la tubería principal
- Número de conexiones

Si la zona de estudio ya se encuentra sectorizada e instrumentada, los resultados que obtendremos serán más exactos pues contaremos con históricos de mediciones para poder hacer la comparación, sin embargo, si no existen sectores o no hay instrumentación, deberemos optar por instalar medidores de caudal y presión temporales, se recomienda que el periodo de análisis sea de al menos dos semanas. El procedimiento de trabajo es:

Preparación de las mediciones.

- Seleccionar la zona de estudio
- Identificar el punto de entrada del caudal (suministro) y de existir, las posibles salidas (transición) del sector
- Registrar los caudales de entrada (Q_{in}), salida (Q_{trans}) y de masa (Q_{masa}), este último se refiere a los usuarios no domésticos y a los grandes usuarios como aeropuertos, hoteles, industrias, etc.
- Selección de la duración de la prueba, mínimo 2 semanas

Ejecución de las mediciones.

- Cierre de válvulas si fuera necesario
- Inicio e implementación de la medición: registrar todos los volúmenes en los medidores y caudales relevantes, llevando en bitácora las horas a las que se realizan las mediciones

Fin de la medición.

- Medición y registro de volúmenes finales
- Restablecimiento de las condiciones originales de operación del sistema si es que fueron cambiadas

Los componentes del Caudal Mínimo Nocturno son:

Componentes del caudal nocturno	Componentes del caudal nocturno	Abreviatura	Unidad	Fuente
Uso normal legítimo	Usuarios domésticos	Q_{dom}	[l/h]	Estimación
	Pequeños usuarios no domésticos	$Q_{masa,peq}$	[l/h]	Estimación
	Grandes usuarios no domésticos (> 500 l/h)	$Q_{masa,grande}$	[l/h]	Medido
Transferencia	Transferencia de agua a zonas cercanas	Q_{trans}	[l/h]	Medido
Pérdidas Q_p	Pérdidas de fondo	$Q_{p,fond}$	[l/h]	Estimación
	Tuberías rotas	$Q_{p,rot}$	[l/h]	Calculado

Figura 9. Componentes del Caudal Mínimo Nocturno

$$Q_p = Q_{in} - Q_{trans} - Q_{dom} - Q_{masa,peq} - Q_{masa,grande}$$

Ecuación 6. Caudal de pérdidas.

Dónde Q_{in} es el caudal suministrado al sector, los demás caudales se definen en la Figura 9 arriba mostrada.

Algunas consideraciones para tomar en cuenta al estimar los componentes de los consumos se mencionan a continuación.

- La experiencia señala que el 6% de la población total se encuentra activa durante la noche, así se podría estimar el caudal doméstico Q_{dom} , utilizando la siguiente fórmula.

$$Q_{dom} = 0.06 * N_{habitantes} * Q_{med}$$

Ecuación 7. Caudal mínimo nocturno doméstico, estimación.

- El consumo de usuarios pequeños no domésticos $Q_{masa,peq}$ resulta un poco práctico y además difícil de estimar pues juegan varios factores entre ellos: el tipo de usuarios, tiendas, estaciones de servicios, baños públicos, restaurantes, bares, hoteles, fabricas, etc; cantidad de empleados en cada establecimiento, aforo, entre otros. Con esto se debe categorizar por consumo similar y así obtener un uso nocturno típico por cada grupo, se emplea la siguiente ecuación para estimar este caudal.

$$Q_{masa,peq} = \frac{Q_d * f_{h,min}}{24}$$

Ecuación 8. Consumo mínimo nocturno de usuarios pequeños NO domésticos, estimación.

Donde:

$Q_{masa,peq}$: Consumo mínimo nocturno por hora
 Q_d : Consumo promedio diario
 $f_{h,min}$: factor horario mínimo

El factor horario mínimo puede variar entre 0.06 para un pueblo pequeño hasta 0.38 para una ciudad grande.

- Las pérdidas de fondo se pueden estimar utilizando el método de “Estimación de Fondo y Reventamiento” (BABE, por sus siglas en inglés)

Los resultados de las mediciones nocturnas deben ser convertidos a volúmenes diarios de las pérdidas reales. Generalmente la presión nocturna es mayor que la presión promedio del sistema y la extrapolación de las fugas puede ser alta y por consiguiente resulta necesario realizar el ajuste a través del factor día/noche (FDN) el cual se calcula de la siguiente manera.

$$FDN = 24 * \frac{P_{promedio}}{P_{prueba}}$$

Ecuación 9. Factor Día/Noche para el método de CMN.

II.4. Medición de fugas en redes con operación intermitente

Las redes de agua potable con operación intermitente agravan el problema de las fugas pues no solo esta intermitencia es potencialmente generadora de más fugas al estar en constante estrés la red, si no también la posibilidad de contar con datos que nos ayuden en el análisis, así como el uso de tecnologías, es menor.

Este problema no solo trae consecuencias en las fugas si no también se generan costos adicionales a la población pues al tener un suministro intermitente, la población deberá gastar en construir e instalar cisternas y tinacos para poder captar tanta agua potable como puedan durante el tiempo de entrega.

El método más usado en todo el mundo para cuantificar fugas en redes con operación intermitente se conoce como “**Stop Tap**”, el cual consiste en aislar la zona de estudio para después inyectar agua, una vez que la red esta presurizada, se podrán medir los caudales e incluso detectar y localizar fugas. Los pasos por seguir para su ejecución, de manera general son:

1. Aislar la zona de estudio cerrando todas las válvulas necesarias.
2. Cerrar todas las conexiones de los usuarios.
3. Se deberán crear arreglos especiales dentro de la zona de estudio a manera de que funcione como entrada y salida, esto resulta más fácil cuando la zona ya se encuentra sectorizada, pues contará con la instrumentación necesaria.
4. Las mediciones que se obtengan nos darán como resultado directo el volumen de agua perdido.
5. Finalmente, se usan equipos para detección y localización de fugas.

Las desventajas principales que tiene este método son varias, y se enuncian abajo.

- Si la zona no está sectorizada, los arreglos que se deben hacer son varios y esto provoca una inversión de obra pequeña
- Un considerable volumen de agua puede ser perdido durante la duración de la prueba
- Se pueden afectar zonas adyacentes
- Disgusto por parte de los clientes ya que se les interrumpe el suministro, será necesario comunicarlo de manera efectiva
- Es muy probable que no todas las fugas puedan ser encontradas en la primera prueba y por tanto se tendrán que llevar a cabo más

La ventaja principal de este método es que se puede cuantificar y al mismo tiempo, localizar fugas, sin embargo, hay que planear con exactitud los trabajos para que el agua que se pierda sea la menor posible.

III. Técnicas para reducción y detección de pérdidas

Considerando el diseño y la implementación de la sectorización como la principal herramienta para el control y gestión de fugas por todos los beneficios que ofrece, en este capítulo se plantean las acciones, métodos y tecnologías consecuentes que se deben emplear para que el beneficio de la sectorización sea aprovechado de la mejor manera posible reduciendo el volumen de agua que se pierde a lo largo de la red.

III. 1. Gestión de Presiones

A lo largo de los años se comprobó que el caudal de fuga en una red depende de dos parámetros principales, el área del orificio por el que sale el agua y la presión en la red, esta relación es exponencial, mientras el orificio o la presión sea mayor, el caudal de fuga incrementará y por consecuencia el volumen de agua que se puede perder en un corto tiempo será considerable.

En el entendimiento de que no podemos controlar el tamaño de la fisura, utilizamos entonces el recurso de gestionar la presión para entonces así poder controlar el caudal de las fugas, en la gráfica siguiente se puede observar la relación **presión-caudal de fuga** para un mejor entendimiento.

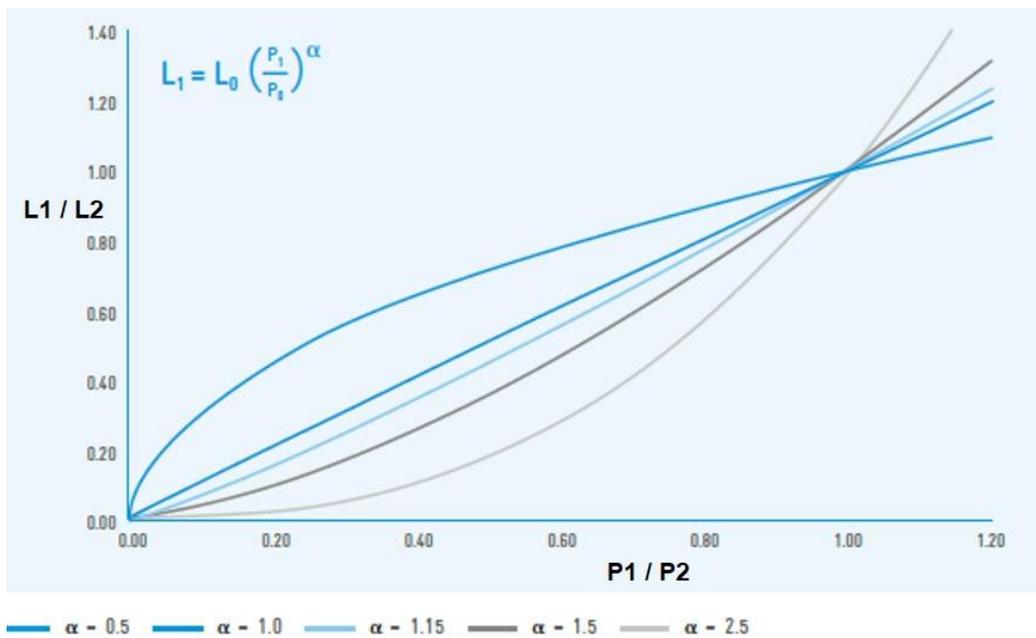


Figura 10. Relación Presión vs Caudal de Fuga.

Donde L_1 / L_2 es la relación entre caudal inicial de fuga y el esperado conforme aumenta la presión y, la relación P_1 / P_2 , son las presiones iniciales y la que se tenga en un tiempo específico.

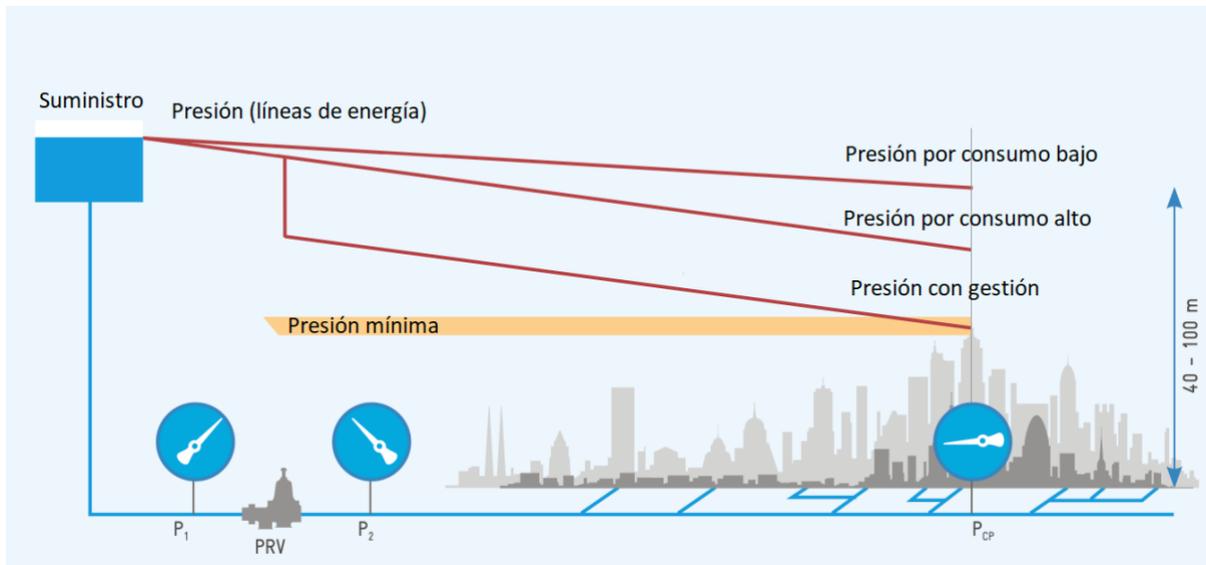


Figura 11. Comportamiento típico de presiones en una red sin gestión

La gestión de presiones nos permite manejar la presión de operación en la red de tal manera que podremos entregar el servicio de agua en su nivel mínimo óptimo asegurando que este sea suficiente y eficiente para el uso legítimo de los usuarios. Los efectos positivos de contar con una gestión de presiones adecuada se reflejan en la reducción de las pérdidas reales eliminando los excesos de presión que se presentan en la red.

Existen cuatro formas básicas de operar una válvula reguladora de presión para modular el comportamiento de la red, éstas pueden utilizar como parámetro de modulación un punto local (entrada al sector) o un punto crítico en el sector, estas cuatro formas se mencionan a continuación.

Salida fija: este tipo de gestión de presiones es la más básica pues se deberá fijar una presión de operación a la salida de la VRP que se mantendrá todo el tiempo.

Modulación por tiempo: la salida de presión en la VRP se modula o configura conforme al consumo estableciendo diferentes niveles, se usa usualmente para reducir la presión por la noche donde los consumos son bajos.

Modulación por consumo: en este método, diferentes presiones de salida pueden ser configuradas de acuerdo con el consumo que se tiene en el sector, asegurando en todo momento la presión óptima de suministro.

Modulación continua: este tipo de modulación es la más avanzada, la salida de presión en la VRP se ajustará continuamente vía telemetría y telecontrol, para ésta se requiere tener al menos un punto crítico monitoreado, estos serán los encargados de indicar las presiones existentes para poder tomar decisiones y modular la salida en el punto de entrada del sector.

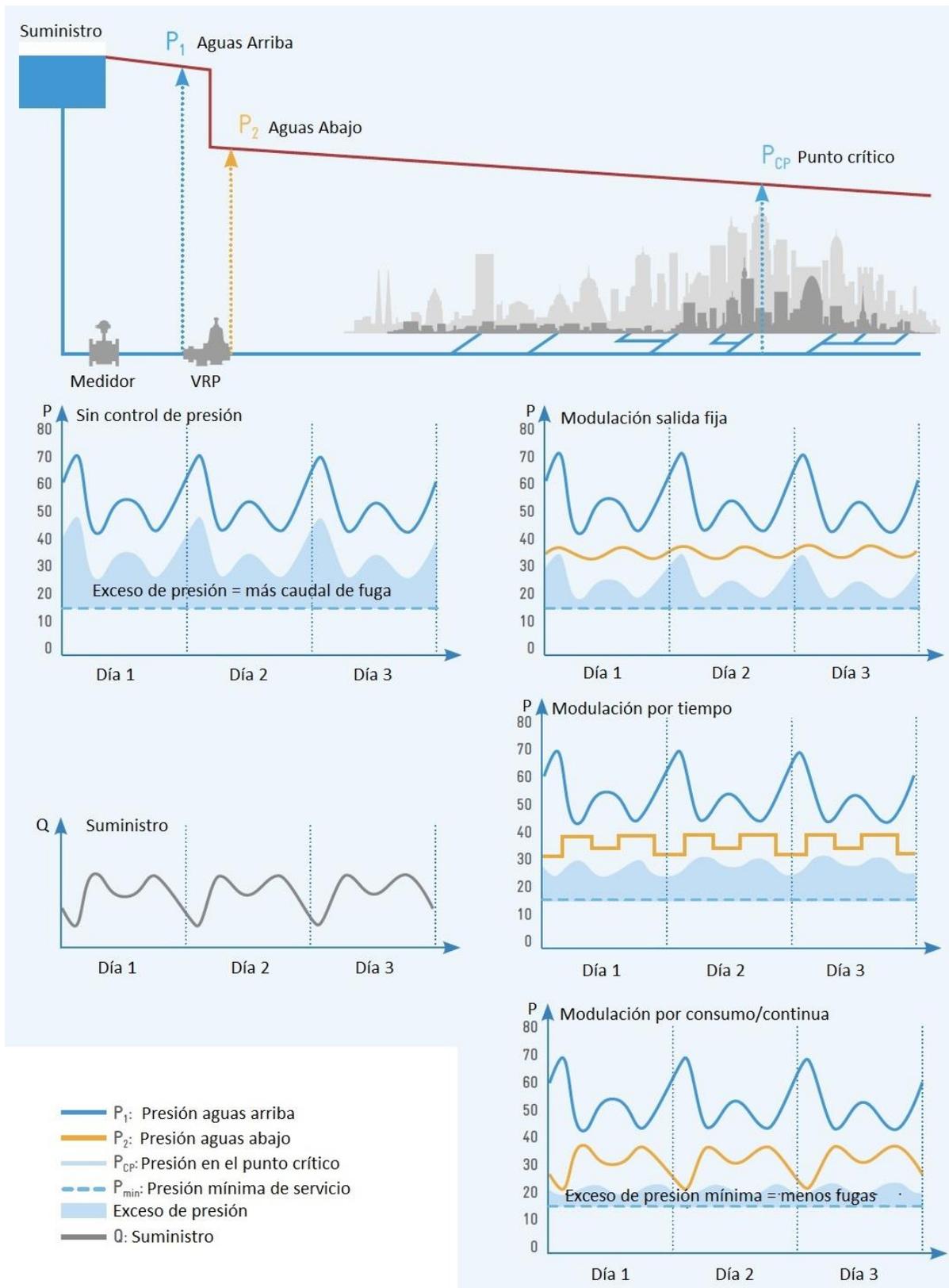


Figura 12. Tipos de modulación para la gestión de presiones.

El punto crítico dentro de los sectores estará determinado por las características de operación de cada zona donde se implemente la gestión de presiones, en este punto crítico se deberá asegurar que la presión de suministro sea la adecuada para cumplir con la demanda, algunos aspectos clave para analizar y determinar este punto crítico son:

- Topografía, puntos altos principalmente
- Punto/zona más alejado de la entrada del sector
- Punto/zona donde se presenta la presión mínima durante el día

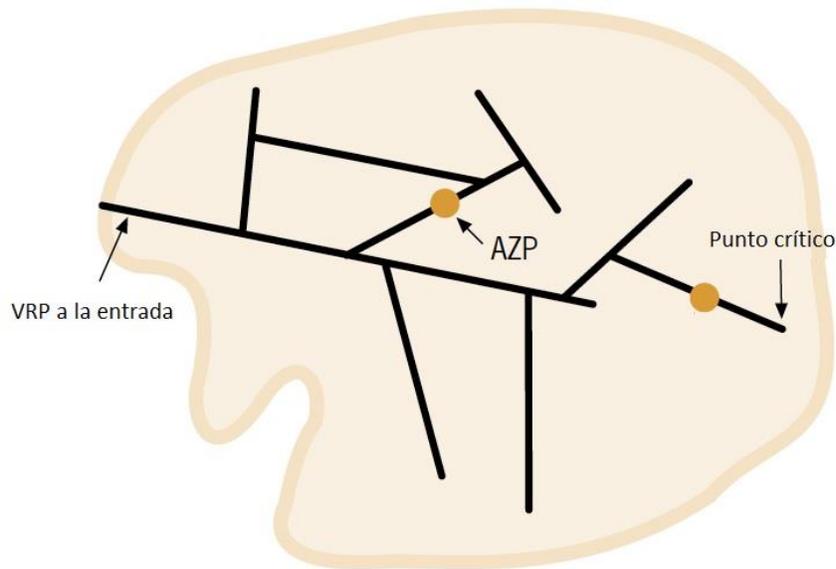


Figura 13. Ejemplo de punto crítico, siendo el punto más alejado de la entrada del sector.

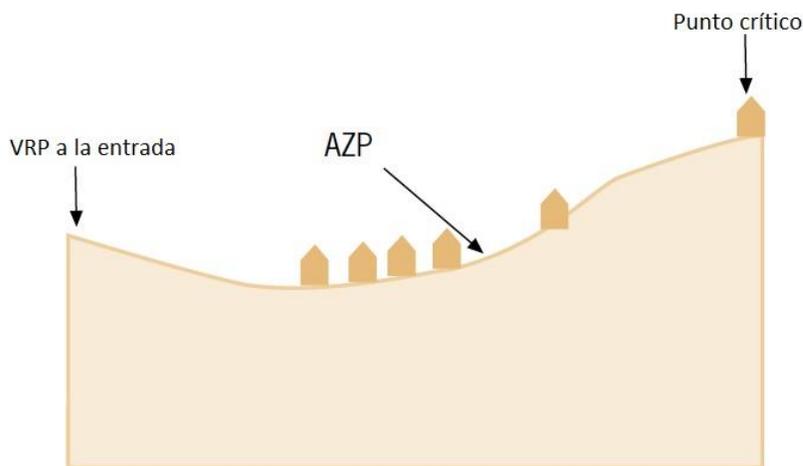


Figura 14. ejemplo de punto crítico, siendo el punto más alto del sector.

La Zona de Presión Promedio (**AZP** por sus siglas en inglés), debe ser tomada en cuenta para llevar a cabo la modulación de presiones.

Algunos de los caminos más usados para llevar a cabo la modulación en la VRP a la entrada del sector son:

- Diferencia entre la presión mínima en el punto crítico y la presión de diseño a la entrada del sector, esta diferencia se recomienda sea de 15 metros, sin embargo, se puede adaptar a las regulaciones de cada país.
- Determinar y analizar la razón entre el gasto máximo y el mínimo dentro del sector. Si esta razón es mayor a 10, se puede considerar que las pérdidas son bajas.
- La VRP utilizada deberá estar en el rango de operación para evitar la cavitación.

Finalmente, los beneficios de contar con un control y gestión de presiones pueden reflejarse de manera inmediata siendo este una solución con relación de costo-beneficio alto permitiendo no solo reducir las pérdidas reales si no también contar con beneficios alternos como se muestra en la siguiente tabla.

Gestión de presiones						
Beneficios de conservación		Beneficios en la red			Beneficios en los consumidores	
Reducción de caudales		Reducción de la frecuencia en las fugas				
Reducción en el consumo	Reducción del caudal de fugas	Reducción en los costos de reparación	Extensión de la vida útil de la red	Reducción de costos en el control activo de fugas	Menores quejas de los usuarios por un mal servicio	Menores problemas en instalaciones de los usuarios

Tabla 2. Beneficios de la Gestión de Presiones

III.2. Control activo de fugas

Desde hace ya muchos años, existen diferentes tecnologías para detección y localización de fugas, cada una cuenta con diferentes ventajas y desventajas en la utilización. La efectividad de cada una depende de muchos factores, entre los más importantes están el tipo de operación que se tenga en la zona donde se requiere localizar fugas, algunos de ellos son:

- Tipo de suministro, continuo o intermitente
- Presión de operación, se recomienda contar con al menos 1 [Kg/cm²] para facilitar la detección
- Posibilidad de hacer cambios temporales en la operación, generalmente corte de suministro si se utilizan cámaras CCTV
- Conocimiento exacto de la localización, los materiales y diámetros de las tuberías

Debido a esto, existirán casos donde será necesario la utilización de más de una tecnología para lograr encontrar el punto exacto de la fuga.

III.2.1. Métodos acústicos

Las tecnologías acústicas basan su principio de operación en tres fenómenos físicos que se generan cuando existe una fuga, estos son: sonido, vibraciones y ondas de presión. El sonido viajará a la superficie y se podrá captar a través de los llamados “Geófonos”, existen dos variantes, el micrófono de piso y el micrófono de mano o varilla de contacto. Las vibraciones se propagan por el material de la tubería y podrán ser captadas por los equipos de correlación utilizando sensores acelerómetros; por último, las ondas de presión que se generan y que viajan en el agua, serán captadas también por equipos de correlación, pero, utilizando sensores hidrófonos, los cuales irán en contacto directo con el agua, siendo este un método invasivo.

Geófonos.

Como se menciona, la operación del geófono se basa en encontrar las fugas a través del sonido que estas generan y que se transmite a la superficie. Si optamos por utilizar el geófono de piso, se debe hacer un recorrido a lo largo de la tubería, tratando de acotar la zona de estudio, de esta manera, al estar haciendo el recorrido, se notarán cambios en la intensidad del ruido y donde este sea más grande, será el punto donde se encuentra la fuga, podemos ver el ejemplo en la figura número 8 abajo mostrada.

Por otro lado, si utilizamos la varilla de escucha, esta solo nos permitirá conocer que tan cerca se encuentra la fuga del punto donde estamos escuchando, la varilla deberá tener contacto directo con algún accesorio o tramo de tubería, su operación la podemos ver en la figura número 9.

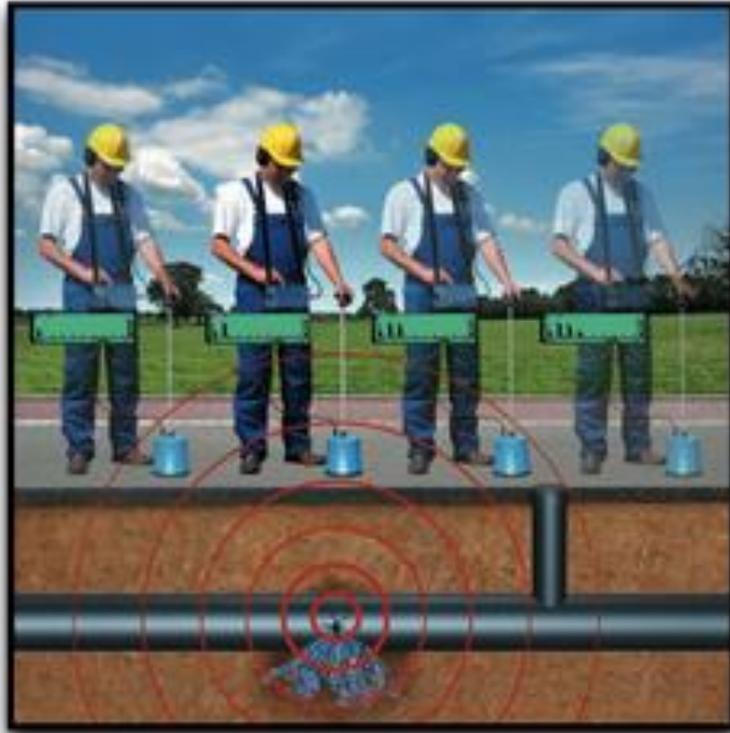


Figura 15. Geófono, microfóto de piso.



Figura 16. Geófono, varilla acústica/micrófonod e mano.

Correladores.

La tecnología de correlación es más sofisticada, pues involucra procesamiento de señales y la utilización de algoritmos para diferenciar entre los diferentes ruidos que pueden captar los sensores y de esta manera determinar si existe una fuga o no. Esta tecnología se puede utilizar con sensores acelerómetros o con sensores hidrófonos.

Acelerómetros vs Hidrófonos

- Los acelerómetros deben ser instalados en contacto directo con la tubería o algún accesorio especial, eso los hace ser una tecnología no invasiva, por otro lado, los sensores hidrófonos deben de ir en contacto directo con el agua por lo que se deberá hacer la adecuación necesaria, y esto los hace ser una tecnología invasiva.
- Debido al principio de operación de cada sensor, los acelerómetros son capaces de poder captar todo el ruido que se genera en el ambiente como puede ser el tránsito vehicular, peatonal y/o cualquier ruido existente, haciéndolo más difícil la detección. Los sensores hidrófonos, no captarán este ruido externo, solo captarán las ondas de presión que se generen dentro de la tubería, esto los hace ser más efectivos.
- Conforme al punto mencionado anterior, para asegurar una buena detección utilizando sensores acelerómetros, deberemos contar con presiones de operación arriba de 1 [Kg/cm²] preferentemente, la separación dependerá del material de la tubería y por experiencia, estos no pueden estar separados más de 150 [m], en cambio, los hidrófonos son ideales para inspeccionar tuberías de diámetros grandes y se pueden utilizar en longitudes mayores a los 500 [m].

Una vez que se hayan seleccionado los sensores a utilizar conforme a las características de la red, el sistema procesará todos los datos captados, se introducen los datos de la tubería como son: el material, el diámetro y la distancia entre los sensores para que así se pueda calcular de manera automática la distancia a la que se encuentra la fuga. La imagen 10 muestra más claro el principio de operación.

La ecuación que permite encontrar la distancia a la que se encuentra la fuga es la siguiente:

$$L = \frac{D - (V * t)}{2}$$

Ecuación 10. Correlación, determinación de la distancia de fuga.

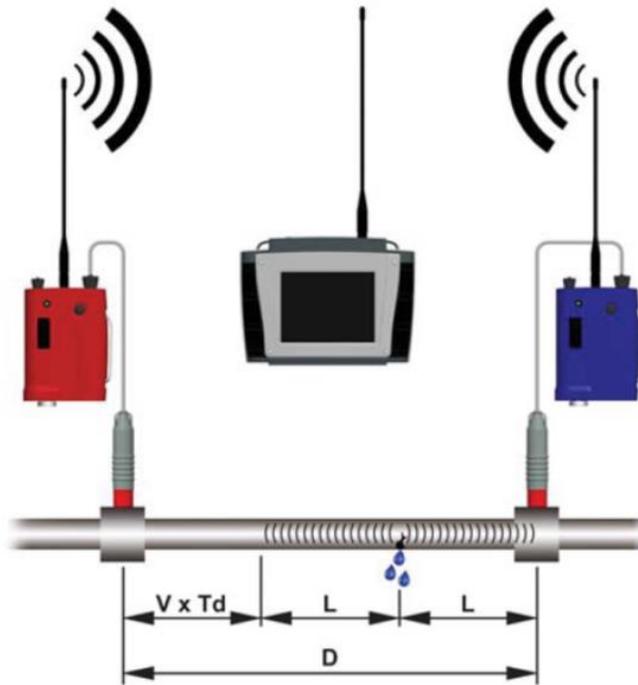


Figura 17. Operación e instalación de los correladores.

Dónde:

L: distancia entre el punto de la fuga y el sensor más cercano

D: distancia de separación entre los dos sensores

V: velocidad del sonido, depende del material de la tubería y el diámetro

T: diferencia de tiempo que tarda en llegar el sonido entre los sensores

III.2.2. Trazadores de gas

La operación de este método es a través de la inyección de gas en la tubería el cual viajará a lo largo de la red y, donde exista algún tipo de fisura, este gas saldrá a la superficie y podrá ser detectado por un equipo detector de gas.

Los gases más usados son helio y la mezcla de hidrógeno con nitrógeno, la mezcla debe ir en proporción 95%-5% respectivamente. Este método puede ser utilizado en cualquier material de tubería y en cualquier diámetro, lo único a tomar en cuenta es la concentración de los gases y la velocidad de inyección, pues se deberá hacer de tal forma que no se contamine el agua, la gran ventaja de este método es que no se debe interrumpir el suministro. A continuación, se muestra una imagen para ilustrar el uso de esta tecnología.

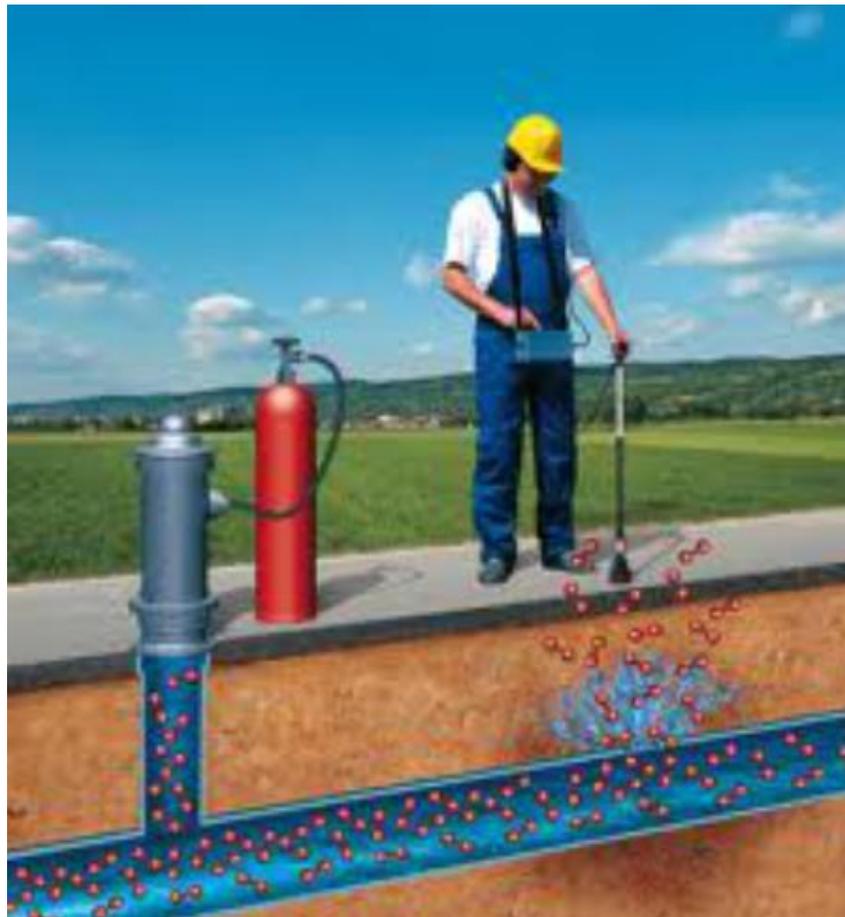


Figura 18. Operación del trazador de gas.

III.2.3. Video inspección en redes presurizadas

Para la video inspección en redes presurizada se utiliza una cámara CCTV como las usadas para redes de drenaje, sin embargo, estas deben estar diseñadas para soportar altas presiones. La cámara va en la punta y el cable es rígido, generalmente recubierto con kevlar, cuentan con un contador para saber la longitud de inspección. Esta tecnología resulta ser 100% efectiva pues al estar viendo a través de la cámara, no hay error en la detección. Algunos equipos pueden contar, además de con la cámara, con un hidrófono que hará que la inspección también sea auditiva haciendo este método 100% confiable.

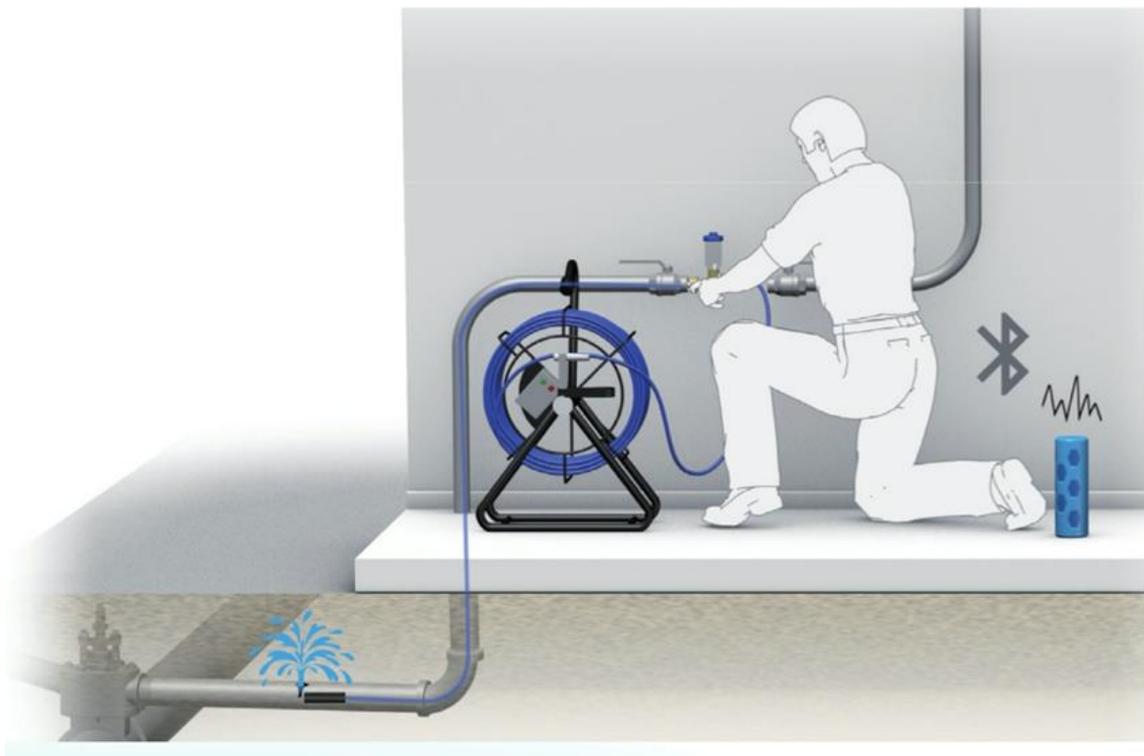


Figura 19. Video inspección en redes presurizadas.

III.2.4. Georradar

La tecnología GPR es capaz de generar imágenes de lo que hay debajo del suelo, es decir, puede localizar tuberías, determinar los diferentes estratos y detectar cualquier cambio en el subsuelo. Esto se hace enviando una señal electromagnética al subsuelo, la cual se reflejará de vuelta a la superficie con diferentes amplitudes y tardará cierto tiempo, con estas dos características se puede determinar algún cambio en el subsuelo y la profundidad a la que se encuentra.

El uso de esta tecnología puede resultar poco eficiente, pues que tan buenos sean los resultados que se obtengan dependerá del tipo de material existente en el subsuelo y de la capacidad del operador para interpretar los resultados, debido a esto, el costo-beneficio de usar esta tecnología para detección de fugas, es bajo.

A continuación, se muestran algunas imágenes de la operación y del tipo de imágenes resultantes después de la recolección de datos.

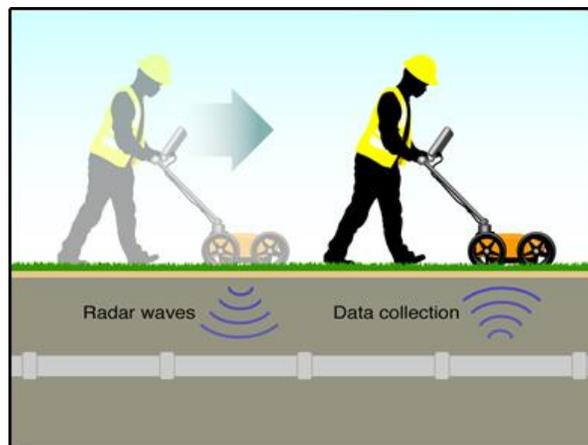


Figura 20. Operación del Georradar.

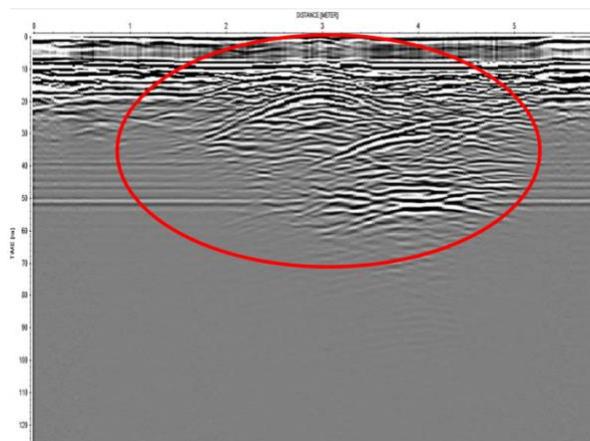


Figura 21. Detección de humedad en el subsuelo utilizando Georradar.

III.2.5. Localización de fugas vía Satélite

Este método utiliza las imágenes satelitales captadas con diferentes sensores para poder llevar a cabo, después de un procesamiento, la detección de fugas en la red a través de la humedad detectada en el subsuelo. La operación consta de cuatro pasos principales como se muestran en la siguiente ilustración.



Figura 22. Detección de Fugas mediante Imágenes Satelitales, Operación.

De esta manera, se obtendrán las zonas en la red donde exista posibilidad de fugas, una vez que se tengan los resultados, se deberán enviar a sitio, cuadrillas de personal con geófonos para puntualizar las fugas y poder hacer la reparación de estas.

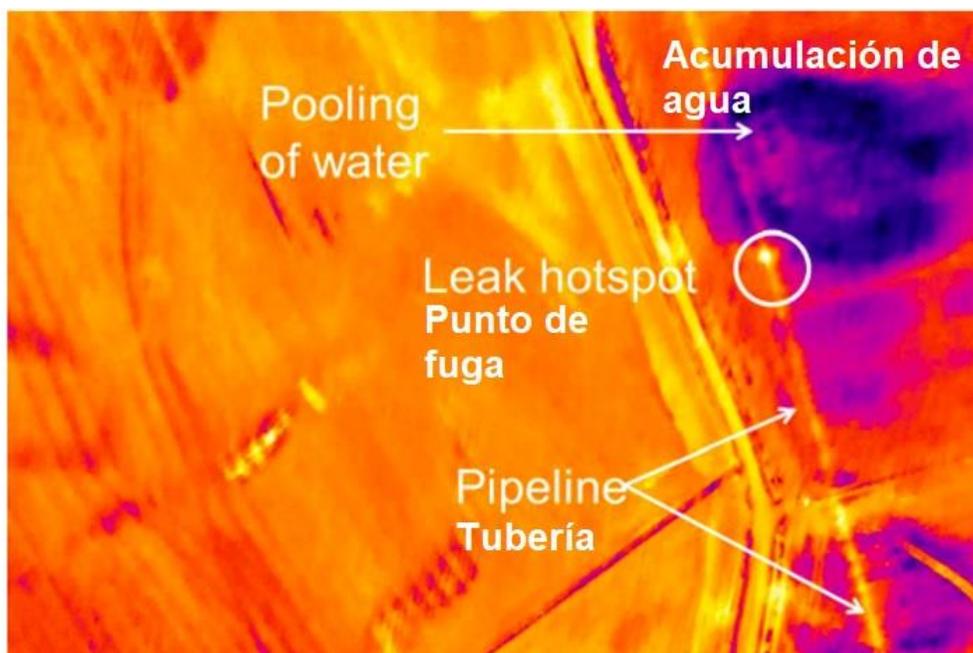


Figura 23. Identificación de humedad con imágenes satelitales.

Como se observó en este capítulo, existen una amplia variedad de métodos para detección y localización de fugas, identificar y seleccionar el adecuado, dependerán de diferentes factores entre los cuales se encuentran: diámetros, materiales, tipo de operación de la red, presión en la red, acceso a la infraestructura, posibilidad de hacer modificaciones, condiciones del subsuelo, entre otras. Debido a esto, la exactitud que tengamos en la detección y localización de fugas dependerá del empleo correcto de las diferentes técnicas y la combinación en el uso de dos o más métodos. A continuación, se presenta un cuadro resumen sobre las diferentes metodologías y tecnologías para detectar y puntualizar fugas de agua en redes de abastecimiento y distribución.

Detección	Detección y puntualización
Step test	Tecnología acústica
Imagen satelital	Correladores
Monitoreo de caudal	Gas trazador
Monitoreo de presión	Cámaras CCTV
Caudal Mínimo Nocturno	Georadar
Participación ciudadana	Conductividad

Tabla 3. Métodos y tecnologías para detección y localización de fugas.

IV. Análisis de los sectores seleccionados para la gestión de pérdidas

IV.1. Balance hidráulico de los sectores

A continuación, se presenta el balance hidráulico de los sectores seleccionados, BJ-02 y BJ-03 para este trabajo, en estos se identifican cada componente de este balance conforme a los datos existentes en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. El periodo de medición comprende del 1 de enero del 2020 al 12 de junio de este mismo año, por lo que se tienen bastantes mediciones para tener un resultado confiable.

IV.1.1. Componentes del balance hidráulico

Volumen de entrada al sistema (Agua Suministrada)

Para calcular el volumen de agua suministrado se utilizaron los registros existentes en el periodo mencionado anteriormente, sin embargo, los datos históricos presentan una falta de registros del 50%. Dicho lo anterior, se recurrió a utilizar tres métodos para la reconstrucción de las mediciones faltantes, estos métodos fueron usados para ambos sectores y se explican a continuación.

Método 1. Reconstrucción de datos faltantes con regla de tres simple.

Se realiza un prorrateo utilizando una regla de tres simple con los datos del volumen de agua suministrado. Sabiendo el número total de registros que se deben tener por cada mes y conociendo el número de registros existentes, se puede determinar el volumen faltante de los registros para cada mes.

Primero, se obtiene el volumen total registrado por mes del periodo utilizado como se muestra a continuación.

Resumen del suministro por mes							
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Q [l/s]	Máximo	78	35	19	20	22	20
	Mínimo	0	0	0	0	0	0
	Promedio	10	8	0	5	11	8
Total [m ³]		25,830	21,115	647	13,297	29,015	8,293

Tabla 4. Resumen de los registros de Caudal en el Sector BJ-02.

Como segundo paso se calculan los registros faltantes como se muestra en la siguiente tabla, cabe mencionar que los registros se hacen con una frecuencia de 15 minutos, por lo que al día se tendrán 96 registros de caudal y volumen. Para junio se están tomando solo 11.5 días pues es el día que se decidió cortar el periodo.

Mes	# Días / mes	# Registros Totales	# Registros Existentes	# Registros Faltantes	% Registros Faltantes	% Registros Existentes
Enero	31	2.976	1.974	1.002	34%	66%
Febrero	29	2.784	1.577	1.207	43%	57%
Marzo	31	2.976	43	2.933	99%	1%
Abril	30	2.880	1.128	1.752	61%	39%
Mayo	31	2.976	2.443	533	18%	82%
Junio	11.5	1.107	743	364	33%	67%
Total	163.5	15,699	7,908	7,791	49.6%	50.4%

Tabla 5. Resumen de registros faltantes en el sector BJ-02.

Con los porcentajes de los registros existentes y los registros faltantes mostrados en la tabla 5 y, el volumen mostrado en la tabla 4, se hace la regla de tres simple para calcular el volumen de agua NO registrado en cada mes como se muestra en la siguiente tabla 6 y de esta manera se tendrá un estimado del volumen total suministrado en el periodo seleccionado.

Mes	Volumen Total registrado [m ³]	Volumen Total NO registrado [m ³]	Volumen Total [m ³]
Enero	25,830	13,111	38,941
Febrero	21,115	16,161	37,276
Marzo	647	44,139	44,787
Abril	13,297	20,652	33,949
Mayo	29,015	6,330	35,345
Junio	8,293	4,063	12,355
Total	98,197	104,456	202,653

Tabla 6. Volumen total suministrado en el Sector BJ-02 en el periodo de registros.

Método 2. Reconstrucción de datos faltantes utilizando la media aritmética.

Para este segundo método se utiliza la media aritmética, los valores que se tomaron en cuenta para obtener el promedio son exclusivamente los datos registrados, es decir, todos los registros que no existen se excluyeron. En la siguiente tabla se muestran los promedios por mes de suministro.

La primera columna muestra el caudal promedio por mes obtenido; la segunda columna es el volumen de agua suministrado durante el periodo de cada registro que es de 15 minutos, es decir 14.54 [l/s] nos da un volumen de agua de 13.09 [m³]; la tercera columna muestra el volumen total NO registrado conforme al número de registros faltantes antes mencionado multiplicado por el volumen promedio.

Suministro NO registrado (media aritmética)			
	Promedio		Volumen NO registrado
Mes	[l/s]	[m³]	[m³]
Enero	14.54	13.09	13,112
Febrero	14.88	13.39	16,161
Marzo	16.72	15.05	44,139
Abril	13.14	11.83	20,726
Mayo	13.20	11.88	6,330
Junio	12.40	11.16	4,063

Tabla 7. Volumen NO registrado en el Sector BJ-02.

Método 3. Reconstrucción de datos faltantes utilizando el patrón de suministro.

De la gráfica que se muestra abajo, podemos observar que existe un patrón de comportamiento en el suministro, esto se debe a que al paso de los años, se ha demostrado que la población sigue un comportamiento muy similar en el consumo de agua conforme a sus actividades cotidianas, por lo tanto, teóricamente será casi idéntico el gasto de agua en un tiempo específico y en los mismos días, es decir, se puede suponer que debido al comportamiento en el suministro y en el consumo, todos los lunes a las 10:00 horas existirá un valor similar de gasto de agua.

Utilizando la premisa mencionada, es que podemos reconstruir los valores/datos faltantes. Para esto fue necesario revisar día a día en cada uno de los periodos de registro los valores y aquellos que no existían, se tomo la media aritmética como valor, a continuación, se explica el desarrollo.

Se filtran los valores conforme al mismo día calendario, todos los lunes, todos los martes, etc; después se filtran por hora de registro, en el ejemplo mostrado se ocupa la hora 0:00:00, para la cual se observa que hace falta una medición el día 22 de enero del 2020, el valor que se colocará será la media aritmética de los valores existentes.

Fecha [dd/mm/aa]	Hora [hh:mm:ss]	Q [l/s]	Q [l/s]
01/01/20	0:00:00	15.51	15.51
08/01/20	0:00:00	12.25	12.25
15/01/20	0:00:00	15.83	15.83
22/01/20	0:00:00	0.00	14.16
29/01/20	0:00:00	13.06	13.06

Tabla 8. obtención de los datos faltantes utilizando el patrón de suministro.

De esta manera, seguimos con todos y cada uno de los días y las horas de los registros faltantes, en las graficas de abajo se muestra, para el mes de enero, la falta de datos y después la reconstrucción.

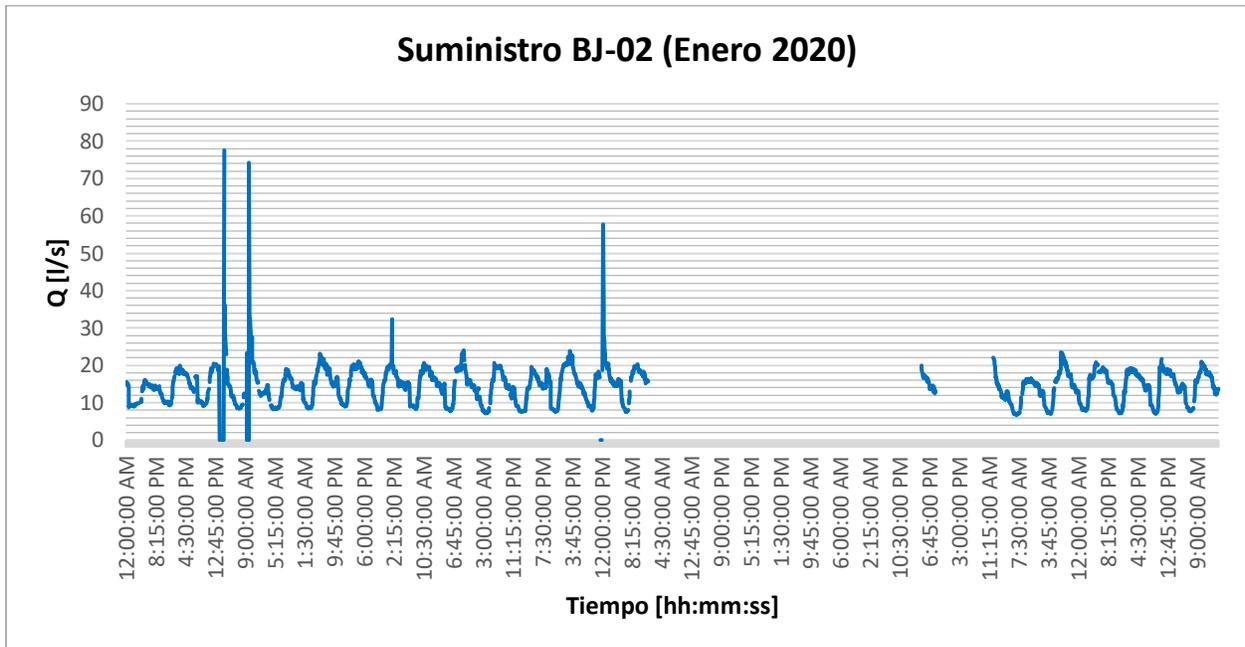


Figura 24. Gráfica, registros faltantes en el mes de Enero del Sector BJ-02.

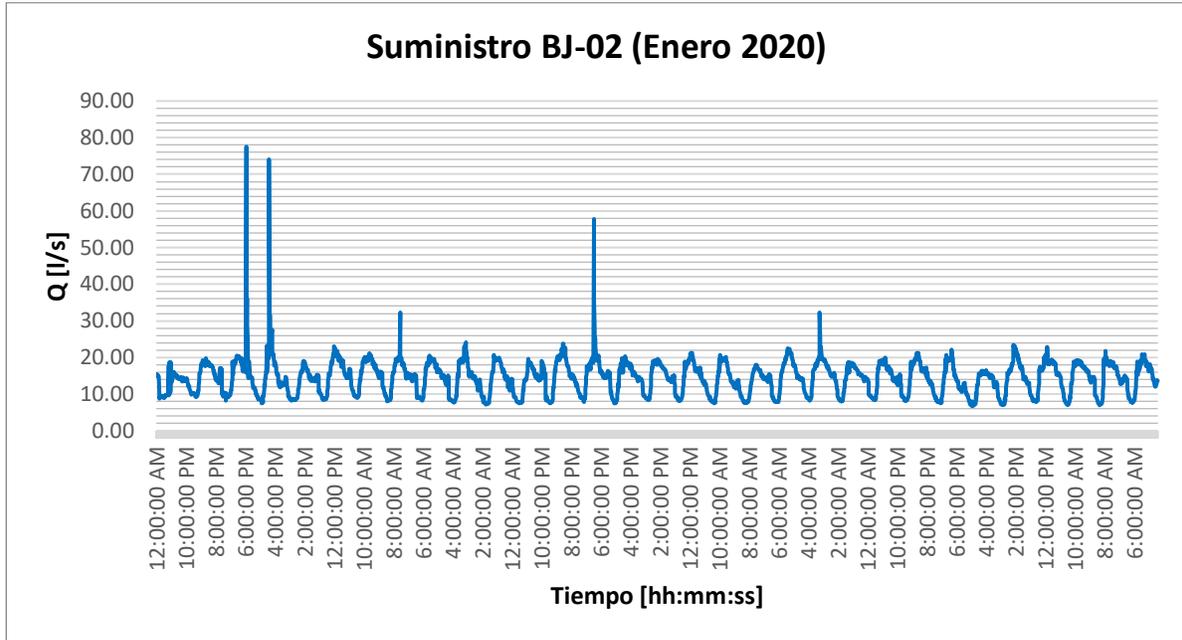


Figura 25. Gráfica, reconstrucción de los datos faltantes usando la media aritmética.

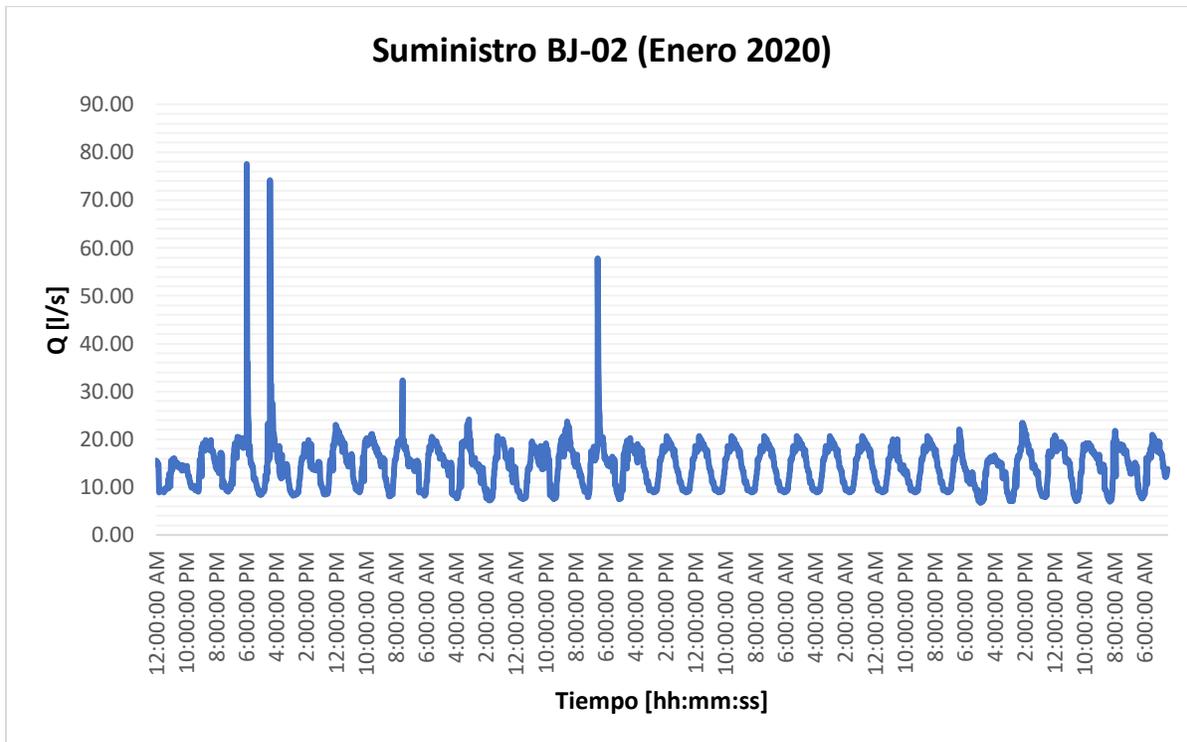


Figura 26. Gráfica, reconstrucción de los datos faltantes usando el patrón de suministro.

Una vez que se tienen los datos faltantes, se obtiene el volumen de agua que no se registro, el cuál es de un total de 13,019 [m³] solo para el mes de enero, al comparar con los otros dos métodos utilizados, notamos que la diferencia entre uno y otro es muy pequeña, de tan solo 0.24% y por esta razón, debido a que es un proceso muy laborioso este último método, se decide utilizar el método 2 para la reconstrucción de los registros faltantes.

Cabe recordar que para este análisis se están utilizando dos sectores ya implementados, es decir, se encuentran aislados al 100% e instrumentados y por esto resulta un trabajo más sencillo el cuantificar el agua que ingresa al sistema. En caso de que se quisiera hacer en una zona donde no se encuentre sectorizado o incluso de la red total de agua potable del Organismo Operador, en aquellas zonas donde no se cuente con medición, se podrán utilizar medidores temporales y estos pueden ser de tipo bridado, inserción y/o ultrasónicos, midiendo los puntos clave de la zona de estudio.

Estos mismos métodos se aplican para el sector BJ-03, sin embargo, este sector cuenta con un pozo el cual abastece también al sector y parte de el agua extraída regresa a la red primaria por lo que en el medidor de entrada se registra también un flujo negativo, el pozo cuenta con un caudal de extracción de 40 [l/s]

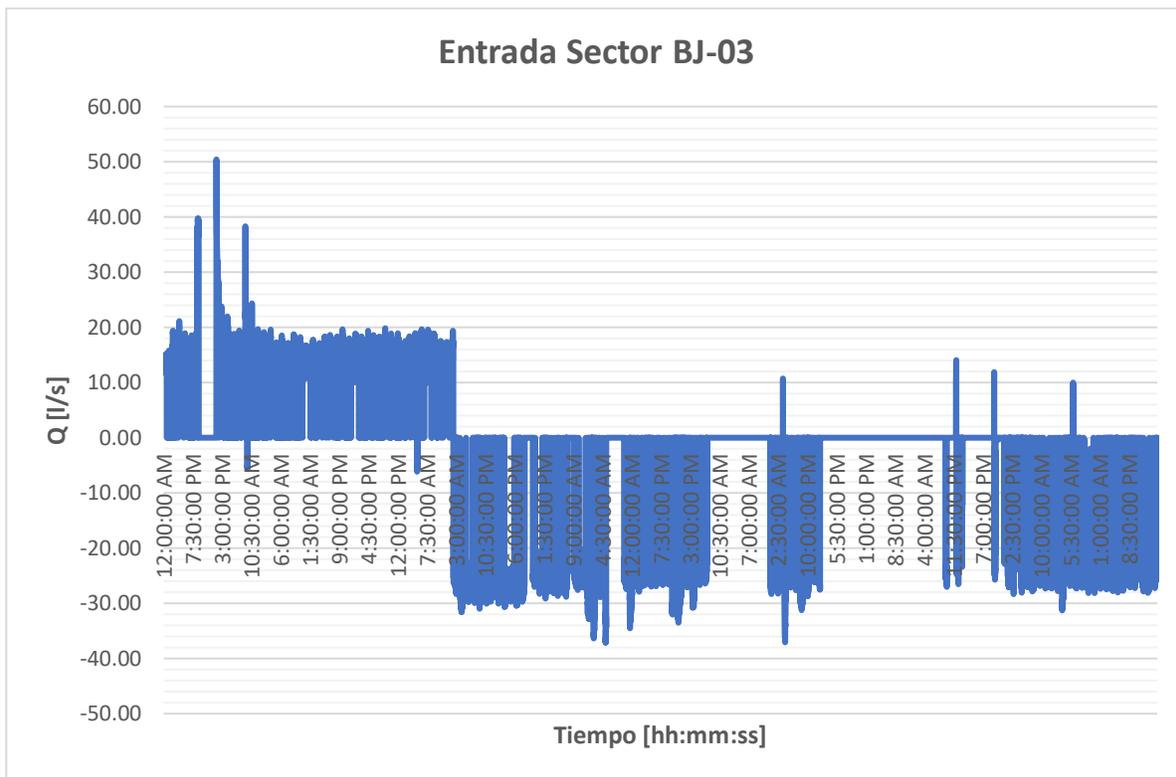


Figura 27. Suministro combinado, Red Primaria y Pozo, en el Sector BJ-03.

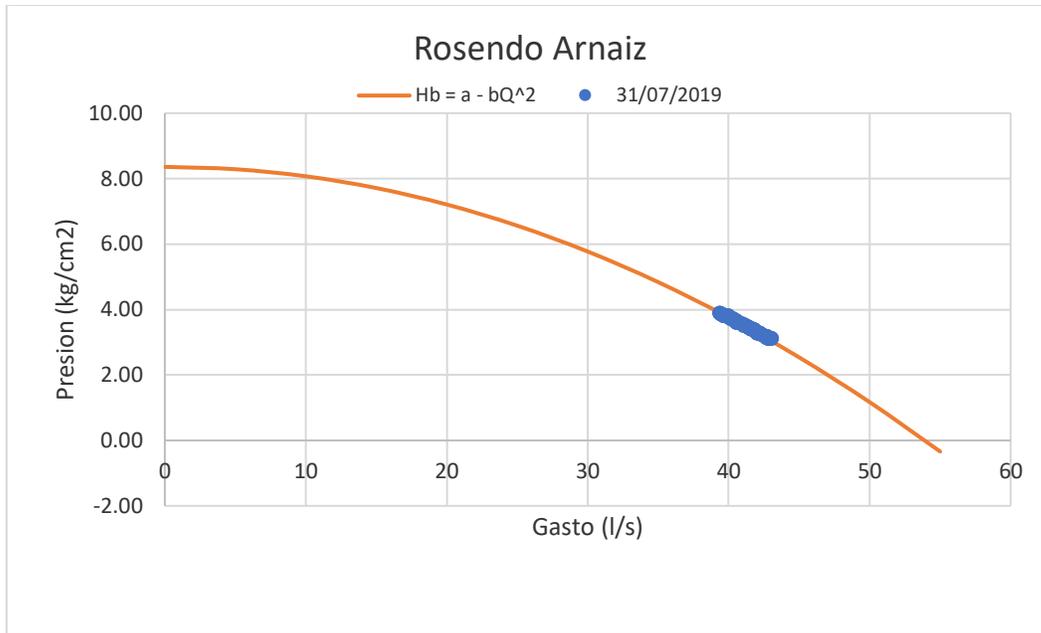


Figura 28. Curva de trabajo del Pozo Rosendo Arnaiz en el Sector BJ-03.

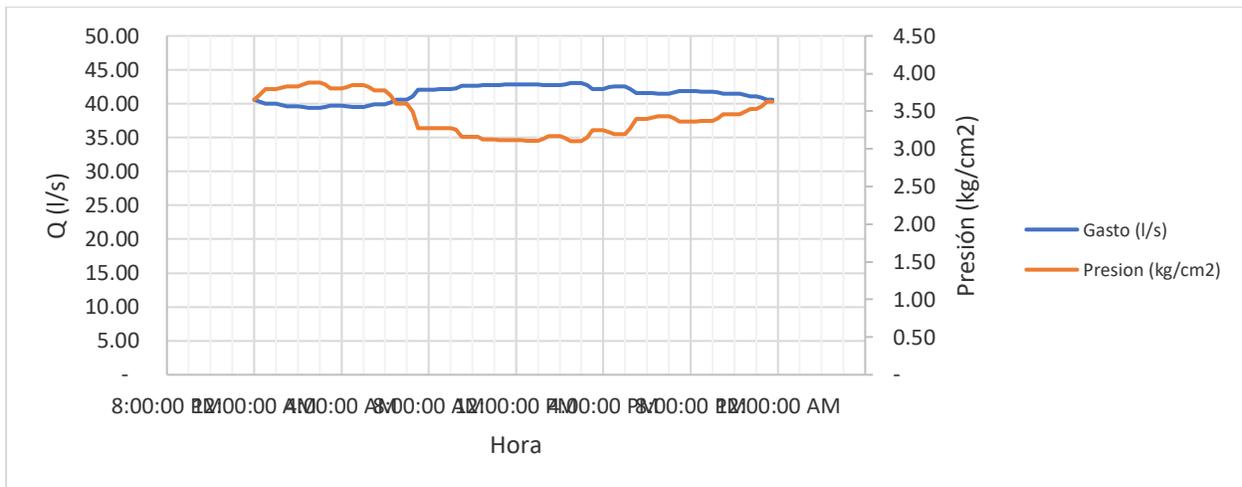


Figura 29. Aforo del Pozo Rosendo Arnaiz en el Sector BJ-03.

Debido a lo anterior, para hacer el balance de suministro se deben tomar en cuenta tres componentes de entrada de agua: 1) El suministro de la red primaria, el cual se dió, según los informes, en el mes de enero y mitad del mes de febrero; 2) El volumen de agua extraído del pozo y que se entrega directamente a la red del sector; 3) el volumen de agua que sale del sector y que se puede observar también en la figura 5. El resumen de estos tres componentes lo podemos ver en la siguiente tabla.

Suministro	Volumen [m ³]
Pozo	400,464
Entrada Red Primaria	60,487
Salida	242,023
Total	218,928

Tabla 9. Suministro en el Sector BJ-03.

A continuación, se muestra una tabla resumen para cada sector, del suministro de agua anualizado.

Resumen BJ-02		
Suministro total registrado	98,197	[m ³]
Suministro total NO registrado	104,457	[m ³]
Suministro TOTAL	202,653	[m ³]
Suministro anualizado	452,320	[m ³ /año]
	1,239	[m ³ /día]
	52	[m ³ /h]
	14	[l/s]

Tabla 10. Resumen del Suministro en el Sector BJ-02.

Resumen BJ-03		
Suministro total entrada	460,951	[m ³]
Suministro total salida	242,023	[m ³]
Suministro TOTAL	218,928	[m ³]
Suministro anualizado	488,738	[m ³ /año]
	1,339	[m ³ /día]
	56	[m ³ /h]
	16	[l/s]

Tabla 11. Resumen del Suministro en el Sector BJ-03.

Consumos Autorizados

Los consumos autorizados se refieren a todas aquellas cuentas o usuarios que se tienen registrados en el Sistema Comercial del Organismo Operador de Agua, en este caso el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Dentro de estos consumos autorizados encontramos que existen 2 categorías principales, los facturados y los **no** facturados, a continuación, se hace una breve descripción de estos.

De manera general dentro de los Organismos Operadores de Agua los tipos de usuario se definen como:

- *Domésticos*
- *No domésticos*
- *Mixtos.*

Consumos facturados. Son todos aquellos usuarios que cuentan con un contrato con el Organismo Operador de Agua de la entidad a la que pertenezcan, estos pueden estar medidos o no, pero siempre se facturaran. Para los consumos medidos, la medición se hace con micromedidores y conforme al volumen de agua que se registra se hace el cobro; por otro lado, para los consumos no medidos, generalmente se establece una cuota fija donde sin importar cuanta agua consume el usuario, se le hará el mismo cobro por el servicio a lo largo del año.

Consumos NO facturados. Este tipo de consumos, son todos aquellos usuarios que están autorizados por parte del Organismo Operador de Agua a tener una cuenta pero que no se les cobra, es decir, el servicio de agua para estas cuentas se encuentra subsidiado al 100%. Este tipo de usuarios suelen ser las entidades gubernamentales, así como los servicios de educación, salud y parques. Al igual que en los facturados, en algunos casos se cuenta con medición de estos consumos y en otros no.

En las tablas abajo mostradas podemos observar el resumen de los consumos obtenidos después de analizar los registros existentes del Sistema de Aguas de la Ciudad de México para los sectores BJ-02 y BJ-03.

Número de cuentas BJ-02			
Tipo de consumo	Medidos	No medidos	Totales
Domésticos	327	31	358
No doméstico	68	10	78
Mixto	59	1	60
Totales	454	42	496

Tabla 12. Tipos de usuarios en el Sector BJ-02.

Volumen consumido BJ-02 [m³/bimestre]			
Tipo de consumo	Medidos	No medidos	Totales
Domésticos	28,133	2,667	30,800
No doméstico	7,322	1,077	8,399
Mixto	7,543	128	7,671
Totales	42,998	3,872	46,870

Tabla 13. Volumen por tipo de usuarios en el Sector BJ-02.

En la tabla 13 se puede ver que el volumen total No medido en el Sector BJ-02 es de 3,872 [m³] por bimestre aproximadamente, este se obtuvo ponderadamente conforme al volumen registrado por cada tipo de cuenta y representa aproximadamente el 9% del volumen total.

Número de cuentas BJ-03			
Tipo de consumo	Medidos	No medidos	Totales
Domésticos	128	15	143
No doméstico	54	7	61
Mixto	45	2	47
Totales	227	24	251

Tabla 14. Tipo de usuarios en el Sector BJ-03.

Volumen consumido BJ-03 [m³/bimestre]			
Tipo de consumo	Medidos	No medidos	Totales
Domésticos	18,712	2,193	20,904
No doméstico	8,453	1,096	9,549
Mixto	3,739	166	3,905
Totales	30,904	3,455	34,359

Tabla 15. Volumen por tipo de usuarios en el Sector BJ-03.

Al igual que en la tabla 13, en la tabla 15 se hizo una ponderación para obtener el volumen consumido para los usuarios no medidos, para este sector resulta ser del 10%, muy similar al del sector BJ-02.

Perdidas de Agua

Este componente del balance hidráulico se puede subdividir en dos grupos; las pérdidas aparentes y las pérdidas reales, ambas serán para cada caso una pérdida de agua en el sistema. Las primeras se deben a errores principalmente de medición y a las tomas ilegales o extraviadas, mientras que las segundas, son producto de daños estructurales en la red, ya sea en las tuberías o en cualquier otra estructura existente.

El total de las pérdidas se obtiene de restar el volumen de agua consumido del volumen de agua suministrado al sistema, siendo este para los sectores, el siguiente.

Sector	Volumen suministrado [m ³ /año]	Volumen consumido [m ³ /año]	Agua No Contabilizada [m ³ /año]
BJ-02	452,320	257,988	194,332
BJ-03	488,738	185,424	303,314

Tabla 16. Agua No Contabilizada en los Sectores BJ-02 y BJ-03.

Perdidas aparentes. Tal como se mencionó son errores en la medición, estos errores pueden ser consumos no autorizados o ilegales, además, los errores de inexactitud en los micromedidores ya sea por sub-contaje, sobre contaje o equipos dañados, por último, también juega un papel importante el manejo de los datos pues si no se cuenta con una gestión para la toma de lecturas y verificación de estas, los datos pueden manipularse consiente o inconscientemente y derivar en errores. Generalmente las pérdidas aparentes suelen ser pequeñas comparadas con el suministro, entre el 6% y el 20% del total de las pérdidas totales.

Para la obtención del nivel de pérdidas aparentes se debe realizar un análisis de consumos de los usuarios, para determinar si el tipo de usuario corresponde al consumo generado, este estudio nos dará la pauta para saber si puede existir algún tipo de clandestinaje, así como errores de medición de consumos por lo que será necesario que este análisis no solo se haga en gabinete si no también en campo para cotejar que el uso de suelo de los predios coincida con el tipo de usuario registrado en la cuenta, además se podrán inspeccionar físicamente los micro medidores para un posterior análisis estadístico del buen funcionamiento de estos.

Perdidas reales. Este tipo de pérdidas son las más importantes ya que se está perdiendo físicamente el agua que se produce, esta agua perdida se filtrará en el subsuelo o se irá directamente al sistema de drenaje, como podemos entender, cualquiera que sea el camino que siga, el agua se pierde. Esta pérdida física de agua tiene distintas repercusiones como la inestabilidad del subsuelo debido a la retención del agua provocando socavones; otro efecto es que, se debe ajustar el suministro incrementando la dotación, lo que provoca que se deba producir más agua y esto se traduce en aumento de dinero pues se necesitará más equipo y energía eléctrica, así como todos los suministros necesarios para potabilizar, es decir, el perder agua se traduce en perder dinero.

Debido a que en los sectores analizados se tiene una cobertura de micromedición arriba del 90% y siendo que la mayor parte del total de cuentas existentes son del tipo doméstico, podemos asumir que las pérdidas mayores son reales, siendo el volumen perdido para cada sector, los mostrados en la siguiente tabla.

Sector	Perdidas reales [m ³ /año]
BJ-02	171,100
BJ-03	282,584

Tabla 17. Volumen anualizado de pérdidas reales en los Sectores BJ-02 y BJ-03.

Después de obtener los componentes del balance hidráulico para cada sector, se presenta un resumen en las siguientes figuras.



Figura 30. Balance hidráulico del Sector BJ-02.

Volumen de entrada al sistema 488,738 [m³/año]	Consumos autorizados 206,154 [m³/año]	Consumos facturados 185,424 [m ³ /año]	Consumos medidos 185,424 [m ³ /año]	Agua Contabilizada 185,424 [m³/año]
			Consumos no medidos	
	Perdidas de agua 282,584 [m³/año]	Consumos no facturados 20,730 [m ³ /año]	Consumos medidos	Agua No Contabilizada 303,314 [m³/año]
			Consumos no medidos	
		Perdidas aparentes (no físicas)	Consumos no autorizados	
			Inexactitud de medidores y errores en el manejo de datos	
Perdidas reales (físicas)		Fugas en red de distribución		
		Fugas en tanques		
	Fugas en conexiones domiciliarias			

Figura 31. Balance hidráulico del Sector BJ-03.

IV.2. Indicadores de gestión de los sectores

Los indicadores de gestión dentro de los Organismos Operadores de Agua han sido utilizados ampliamente desde hace ya muchos años, estos tienen la finalidad de mostrar de manera resumida, objetiva y confiable la evaluación de las empresas de agua para poder identificar las áreas de mejora y llevar a cabo las buenas prácticas para incrementar la eficiencia de los Organismos.

Estos indicadores presentan los siguientes atributos ya que como se mencionó se evalúa el desempeño, siendo estos los indicadores clave.

- **Específico.** Debe ser claro lo que el indicador mide para que los diferentes usuarios lo interpreten de la misma forma, de esta manera se obtendrán conclusiones consistentes con las que puedan implementar acciones.
- **Medible.** Debe ser medible al definir un estándar, presupuesto o norma, de esta manera el valor será real y comparable.
- **Alcanzable.** Cada indicador clave de desempeño se tiene que certificar hacia el interior del Organismo como una meta alcanzable.
- **Relevante.** Debe proveer certeza del desempeño del Organismo y de como se comporta la estrategia seguida. Si no se mide alguna parte de la estrategia, se considera irrelevante.
- **Oportuno.** Es necesario expresar el resultado a tiempo. Solo tiene sentido su valor si se conoce el periodo de tiempo en el cual se mide.

Dicho lo anterior, a continuación, se presentan los indicadores claves para este estudio de los sectores BJ-02 y BJ-03 analizados.

Indicador	BJ-02	BJ-03	
Costo de producción	13.31	13.31	[\$/m ³]
Micromedición	92	90	[%]
Dotación	371	528	[l/hab/día]
Consumo	234	226	[l/hab/día]
Eficiencia Física	63	43	[%]
Agua No Contabilizada	194,332	303,314	[m ³ /año]
CARL	945	3,084	[l/conexión/día]
UARL	18	26	[l/conexión/día]
ILI	52	118	

Tabla 18. Indicadores de gestión en los Sectores BJ-02 y BJ-03.

Los últimos tres indicadores de la tabla 18 se utilizan frecuentemente para evaluar el nivel de pérdidas ya que permiten una mejor interpretación de la situación actual de la red.

El primero es el llamado Perdidas Reales Anuales Actuales (**CARL**, por su nombre en inglés), este indicador es la relación que existe entre el volumen total de perdidas y el número de conexiones existentes.

El segundo, Perdidas Reales Anuales Inevitables (**UARL**, por su nombre en inglés). Este indicador nos muestra que siempre habrá una cantidad de perdidas de agua que resulta casi imposible de eliminar y se calcula tomando en cuenta varios parámetros derivados de los reportes históricos de las fugas que se presentan en las redes de distribución, en las conexiones de servicios y las fugas intradomiciliarias. Después de varios años de estudios, el IWA determinó una ecuación que ofrece un resultado confiable sobre este indicador, la ecuación usada es la siguiente.

$$UARL = (18xLm + 0.80xNc + 25xLp)xP$$

Ecuación 11. Determinación del UARL

Donde Lm es la longitud en Km total de red en la zona de estudio, Nc el número de conexiones totales, Lp es la longitud total también en Km de las conexiones y P, la presión promedio de operación en m.c.a.

Finalmente, el Índice de Fugas en la Infraestructura (**ILI**, por su nombre en inglés) resulta de la razón de dividir el CARL entre el UARL, este evalúa que tan bien se está gestionando la red actual. Mientras más grande sea el valor, más grande será la necesidad de implementar estrategias de gestión para el control de perdidas.

En la siguiente imagen se puede comprender de mejor manera estos indicadores y como se constituyen los componentes básicos de la gestión de fugas.

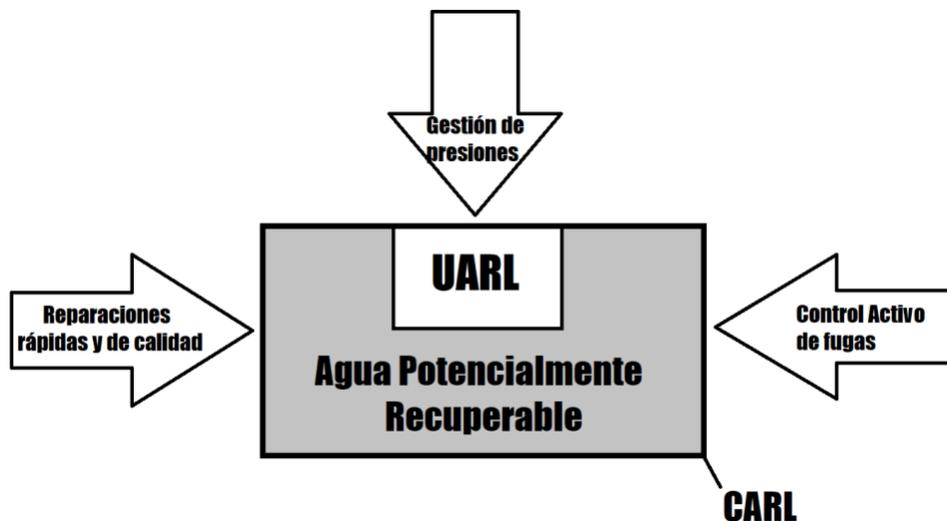


Figura 32. Relación entre el CARL, UARL e ILI para la gestión de pérdidas.

IV.3. Cuantificación de las pérdidas

Debido a que los sectores analizados se encuentran instrumentados y totalmente aislados, resulta más sencilla la medición y cuantificación de las fugas por el método del Caudal Mínimo Nocturno, para esto será necesario analizar las gráficas de suministro y consumo de cada sector.

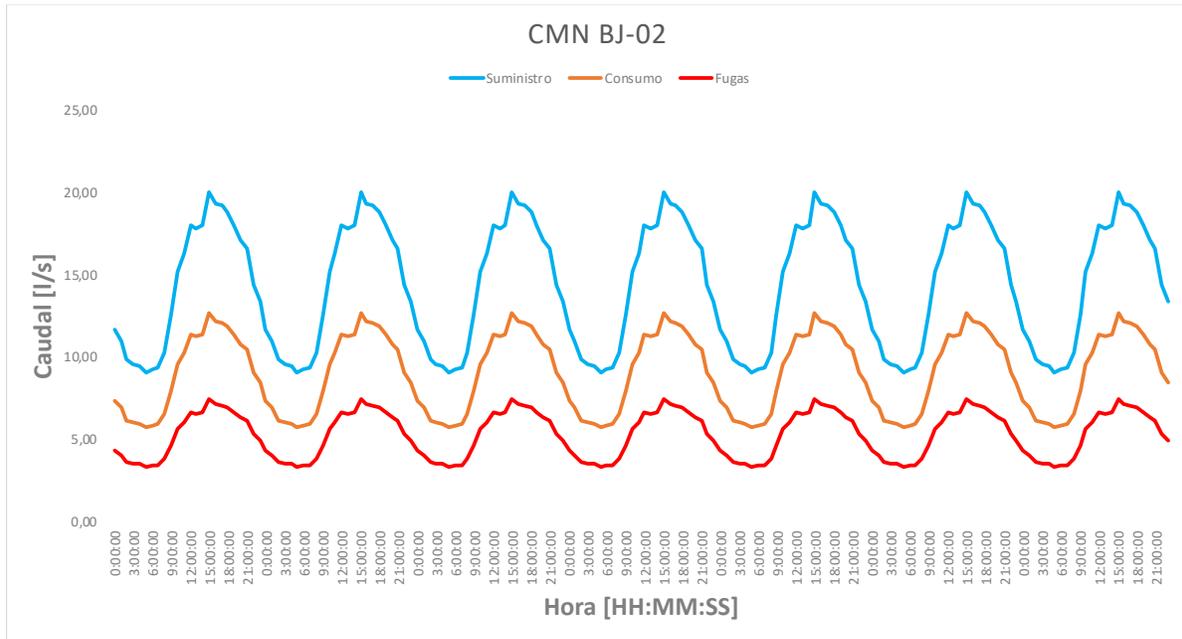


Figura 33. Gráfica, Suministro, Consumo y Fugas en el Sector BJ-02.

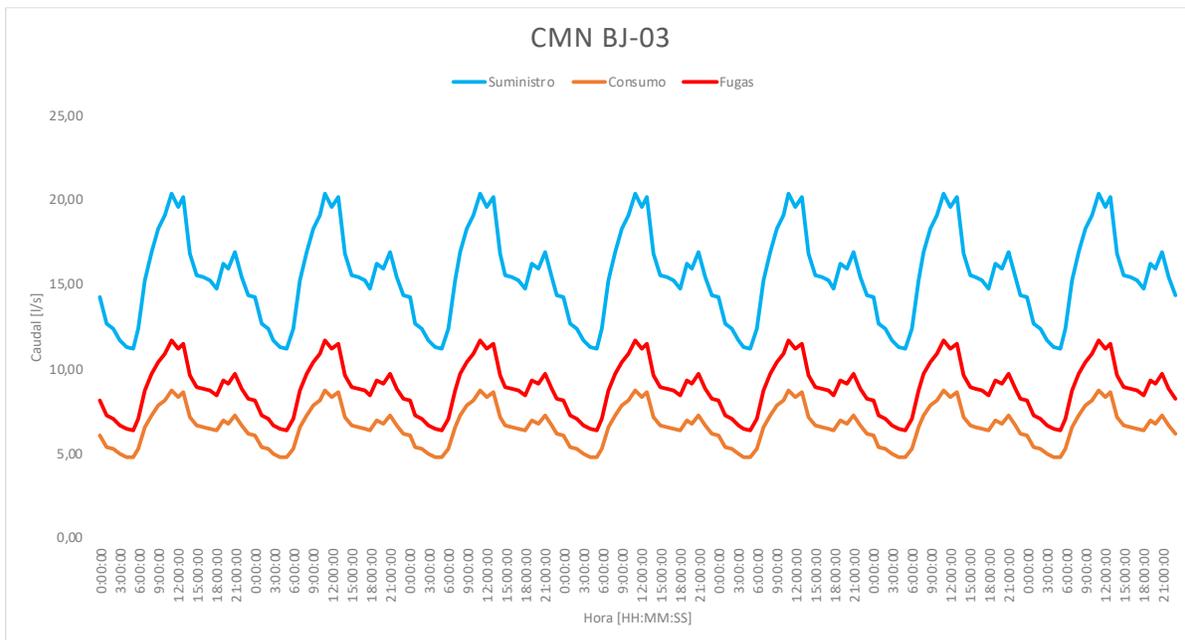


Figura 34. Gráfica, Suministro, Consumo y Fugas en el Sector BJ-03.

Conforme nos dicta la teoría del método del Caudal Mínimo Nocturno y utilizando las gráficas mostradas, podemos deducir que mientras más cercanos estén los valores promedio y mínimo del caudal, existirá la posibilidad de mejora, es decir, se podrán implementar acciones de gestión para controlar las pérdidas físicas, dicho de otra forma, mientras más alejado esté el valor del caudal mínimo del caudal promedio, la eficiencia física del sector será más alta.

Dicho lo anterior, el objetivo será entonces, hacer que el Caudal mínimo Nocturno disminuya, lo cual se traduce en la reducción de las pérdidas y para esto se pueden utilizar diferentes tecnologías para detección de fugas, así como recurrir a la gestión de presiones, estas se muestran en los siguientes capítulos.

IV.4. Gestión de presiones

IV.4.1. Salida Fija

Sector BJ-02

Dentro de este sector, en 2019 se hizo una primera gestión de presiones implementando el método **Salida Fija**. Se utilizaron tres diferentes niveles de reducción: 12.5, 17.5 y 22.5 [m] con estas reducciones se obtuvieron gastos de fuga de 7, 9 y 11 [l/s] respectivamente. De estas pruebas se detectó que con la presión de 12.5 [m] se presentan problemas con el suministro por lo que se decidió ajustar la presión promedio del sector a 17.5 [m].

Las condiciones del sector anteriores a esta gestión eran: presión de entrada de 28 [m] y un caudal de fuga aproximado de 13 [l/s], por lo que al regular la presión de entrada a 17.5 [m] y obtener un caudal de fuga de 9 [l/s], la recuperación de caudales es de 4 [l/s].

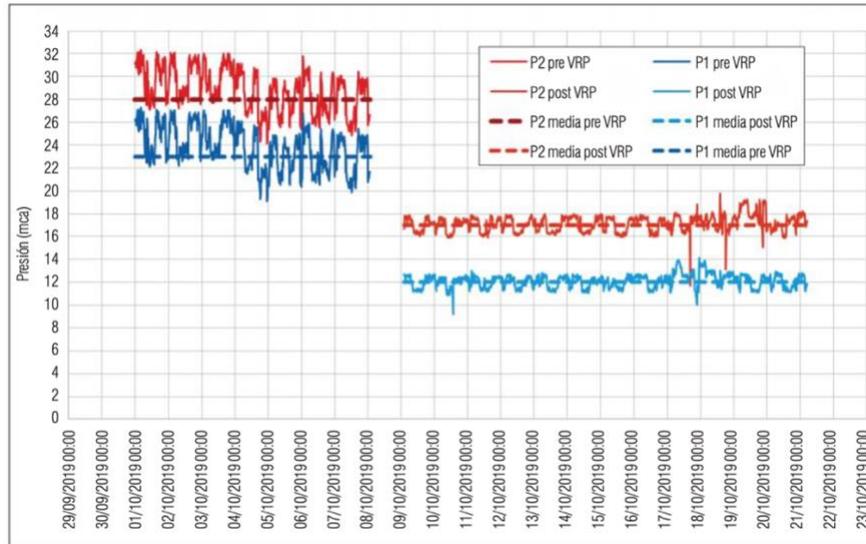


Figura 37. Gestión de presiones utilizando el método "Salida Fija" en el Sector BJ-02. [9]

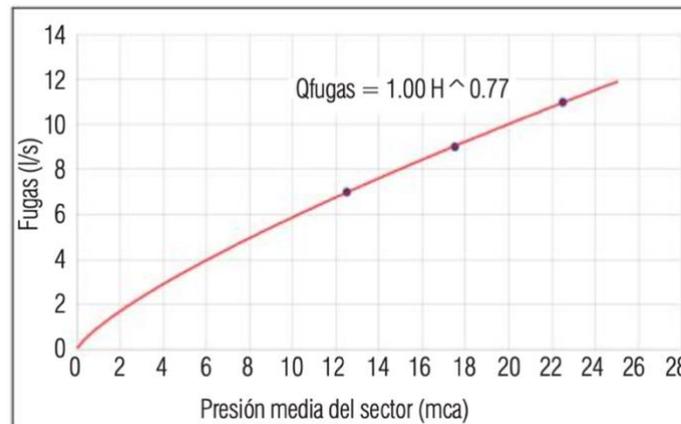


Figura 38. Relación Presión vs Caudal de Fuga en el Sector BJ-02. [9]

Sector BJ-03

Dentro de este sector no se han hecho trabajos de reducción de perdidas hasta ahora, por lo que, la idea que se presenta son propuestas de los valores de regulación y analizar los resultados a través de EPANET para conocer el posible comportamiento y llegar a una conclusión.

Lo primero que se hizo fue calibrar el modelo para la simulación a los datos actuales; suministro promedio de 15 [l/s] y un nivel de fugas del 57%, la Curva de Variación Horaria de consumo se muestra a en la Figura 39.

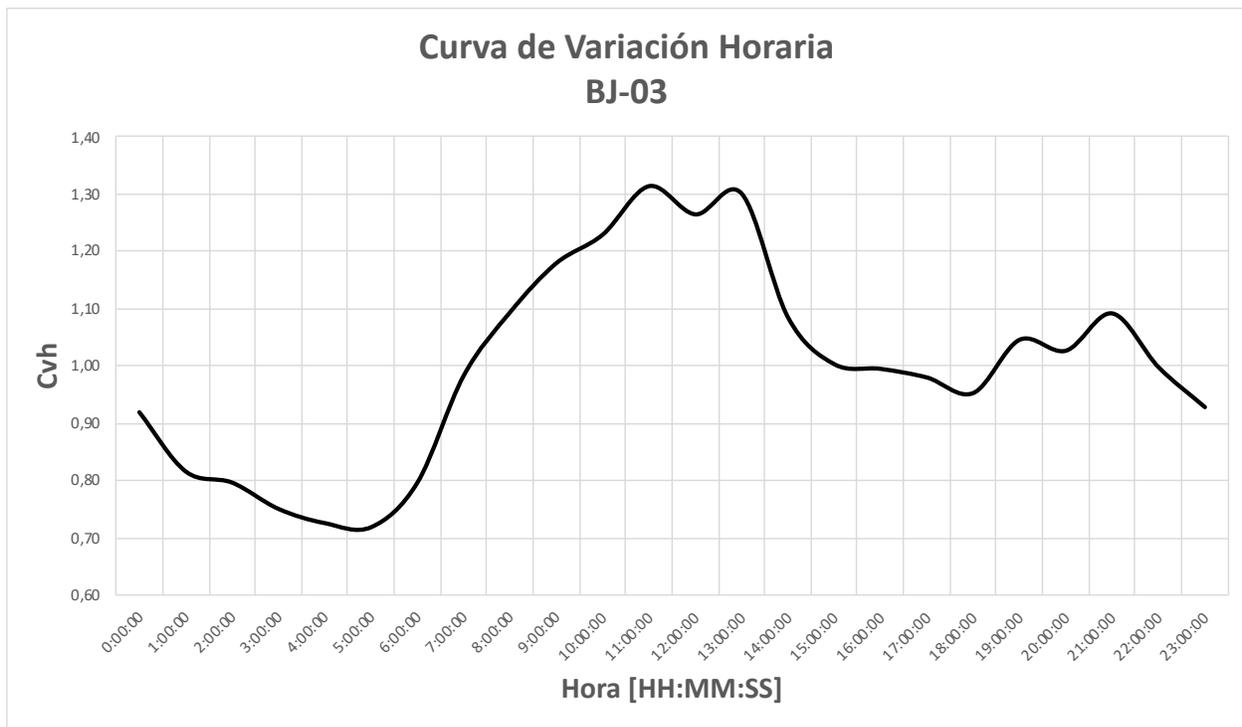


Figura 39. Curva de Variación Horaria del Sector BJ-03.

Para las simulaciones realizadas en este trabajo, se tomarán dos características de diseño principales para la gestión de presiones, estas son:

- Presión mínima de suministro en las tomas domiciliarias de 10 [m.c.a.]
- Presión máxima de entrada al sector de 20 [m.c.a.]

Los resultados de las simulaciones se pueden observar en la Figura 40, la tendencia es muy clara como se sabe, a mayor presión mayor caudal de fugas se tendrá y por consiguiente el índice de fugas aumentará o disminuirá conforme a la presión.

Se encontró en las simulaciones que la presión mínima de entrada al sector deberá ser de 14 [m] para así poder cumplir con la presión mínima de suministro en las tomas domiciliarias de 10 [m], esta distribución se puede ver en la Figura 41 cumpliendo así con la presión de suministro mencionada. Con estas condiciones se estaría disminuyendo el índice de fugas de un 57% a un 49%.

Finalmente, en la Figura 42 se refleja el cambio en el comportamiento del suministro dando como resultado que el caudal promedio de consumo en el sector y el Caudal Mínimo Nocturno disminuyan.

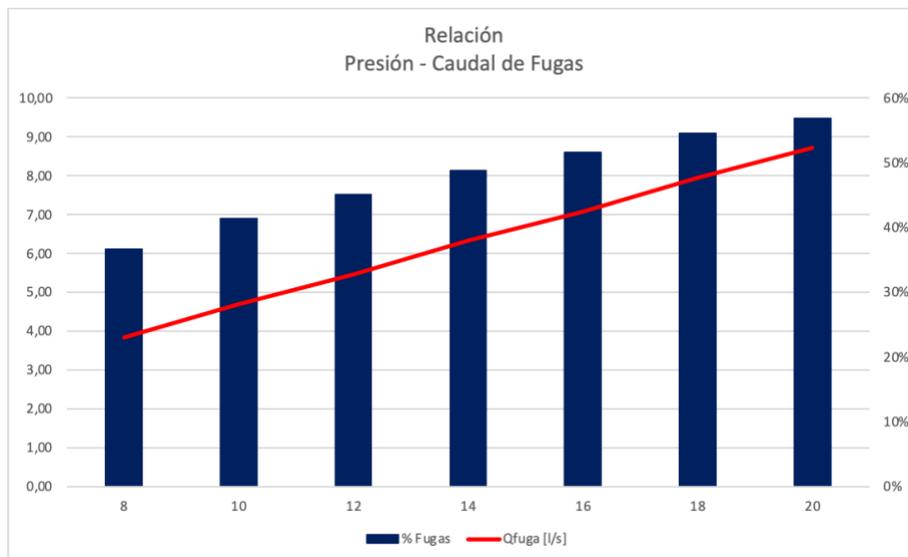


Figura 40. Relación Presión vs Caudal de Fuga en el Sector BJ-03, modulación salida fija.

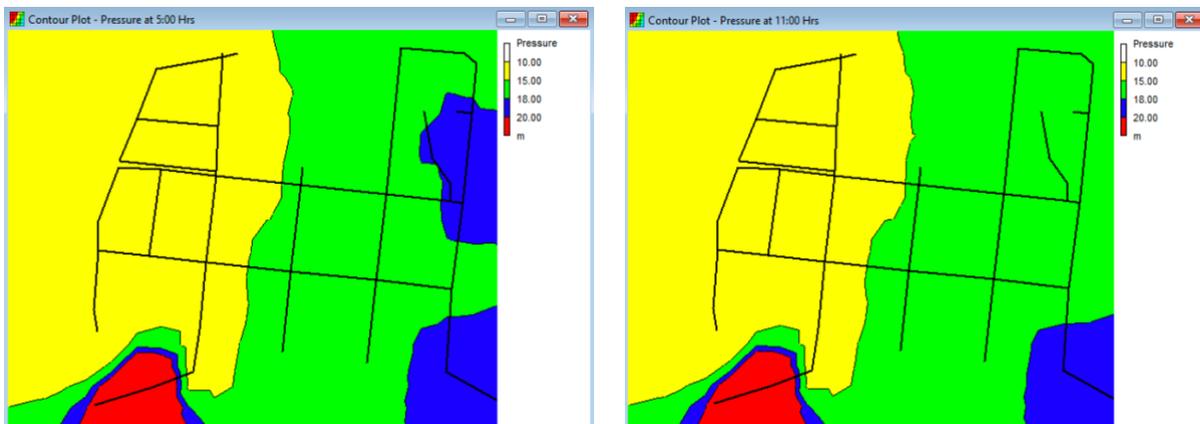


Figura 41. Distribución de presiones en el Sector BJ-03 en los horarios de mínima (izquierda) y máxima demanda (derecha).

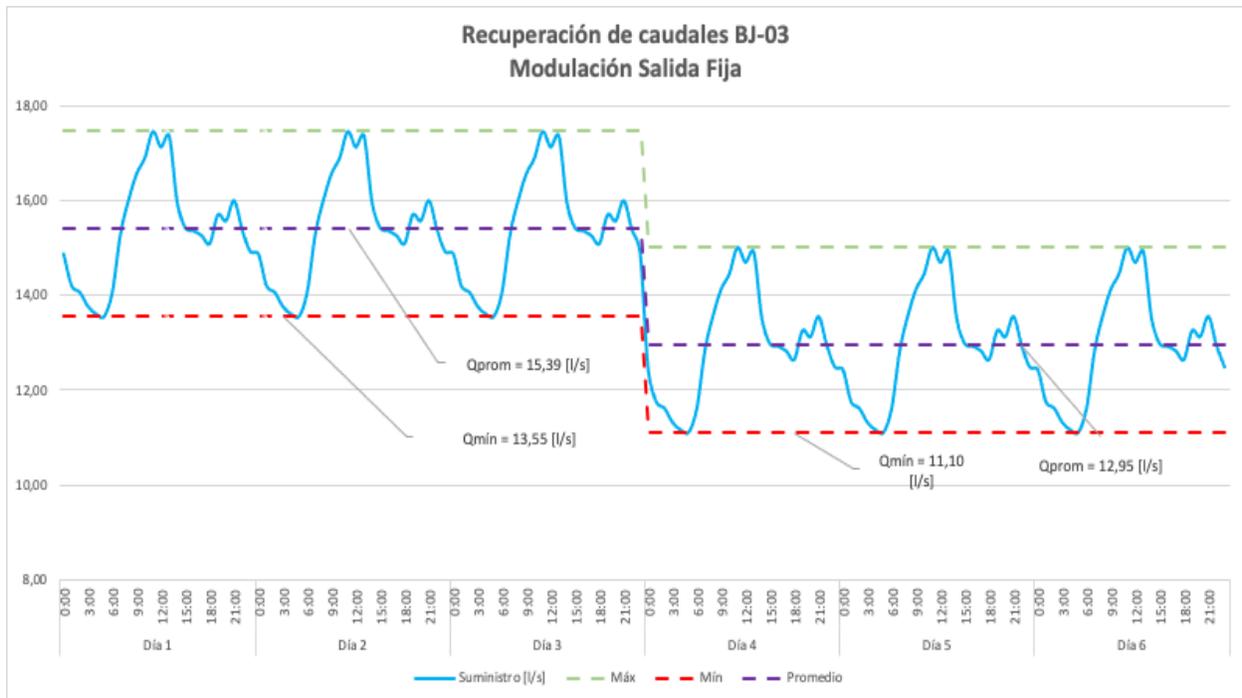


Figura 42. Gráfica, Recuperación de caudales en el Sector BJ-03 con Salida Fija a 14 [m] de presión.

IV.4.2. Modulación por tiempo

Sector BJ-02

Este sector cuenta con tres puntos de medición de presión colocados estratégicamente para conocer el comportamiento, los datos obtenidos se analizaron y se obtuvieron las presiones mínimas, máximas y promedio dentro del sector, siendo estas 7.7, 23.3 y 13.1 [m] respectivamente.

Para este tipo de modulación se proponen utilizar dos consignas para la regulación, las cuales serían diurna y nocturna debido al comportamiento del suministro dentro de este sector, este comportamiento lo podemos ver de mejor manera en la Figura 43 Curva de Variación Horaria del sector.

Para fijar la consigna nocturna, que será el nivel bajo, se buscó cumplir con tener la presión mínima de suministro en las tomas domiciliarias que se fijó anteriormente y es de 10 [m], de las simulaciones se encontró que, para cumplir con esto, la presión de entrada al sector debe ser de 16 [m].

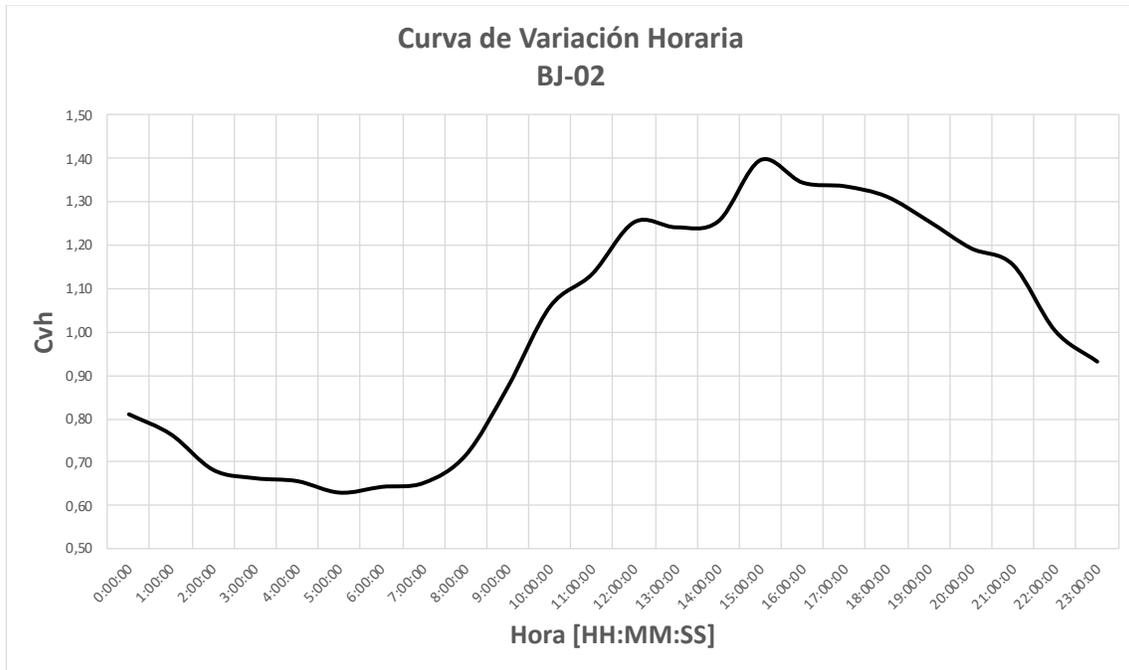


Figura 43. Curva de Variación Horaria del Sector BJ-02.

Para obtener la consigna diurna o alta, se hicieron simulaciones desde 17 [m] hasta 20 [m] para poder obtener el valor óptimo donde se podrá tener una recuperación máxima de las perdidas, de los resultados se obtuvo como era de esperarse, que la consigna alta debe ser de 17 [m], en la siguiente Figura 44 se muestran los resultados.

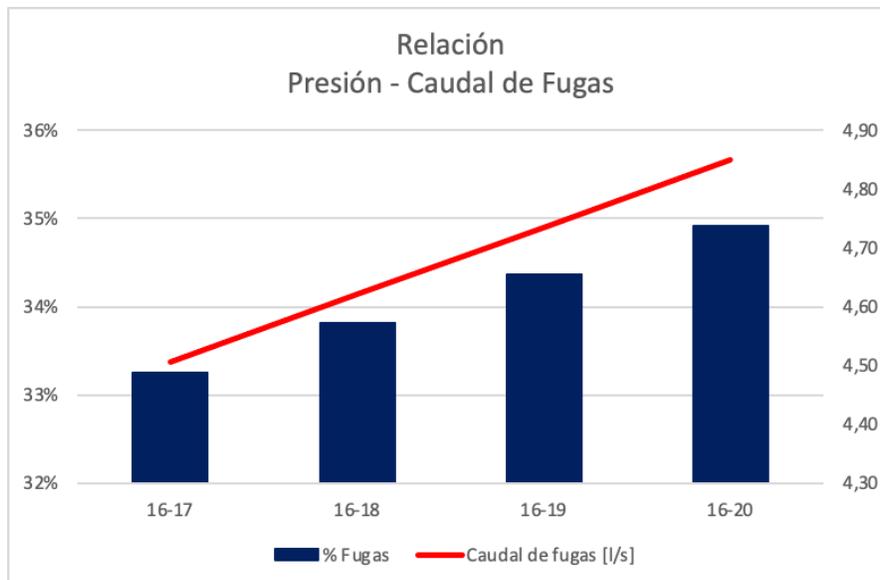


Figura 44. Relación Presión vs Caudal de Fuga en el Sector BJ-02, modulación por tiempo.

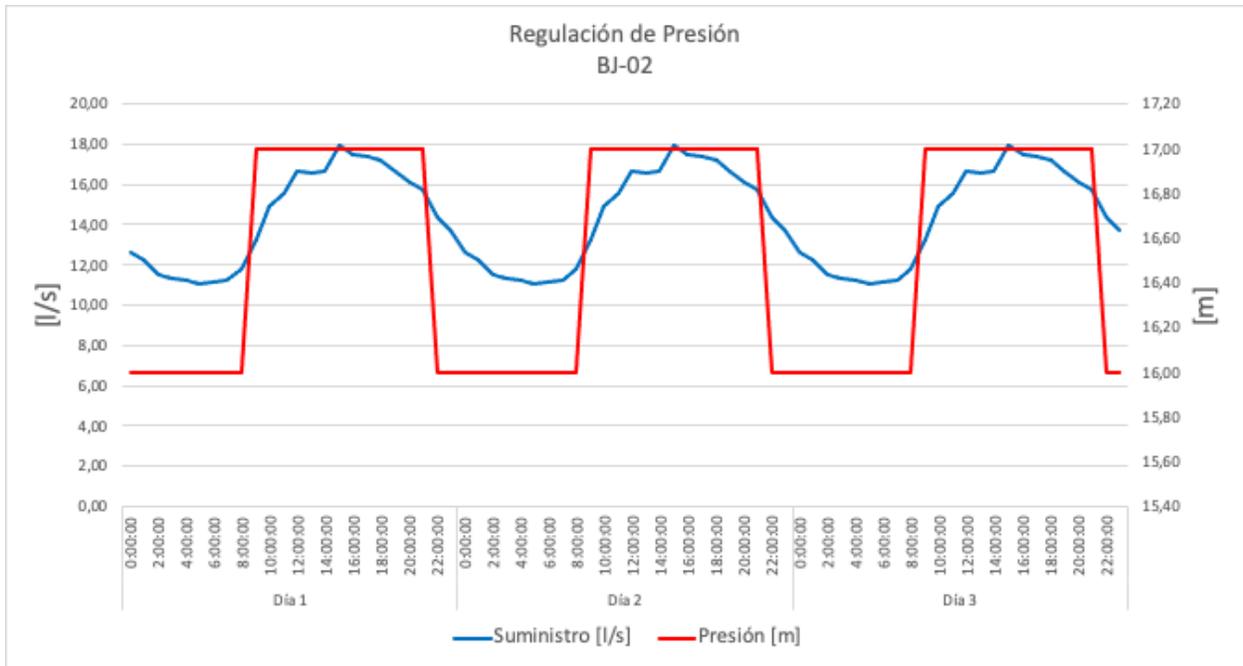


Figura 45. Regulación de presión diaria y nocturna, sector BJ-02.

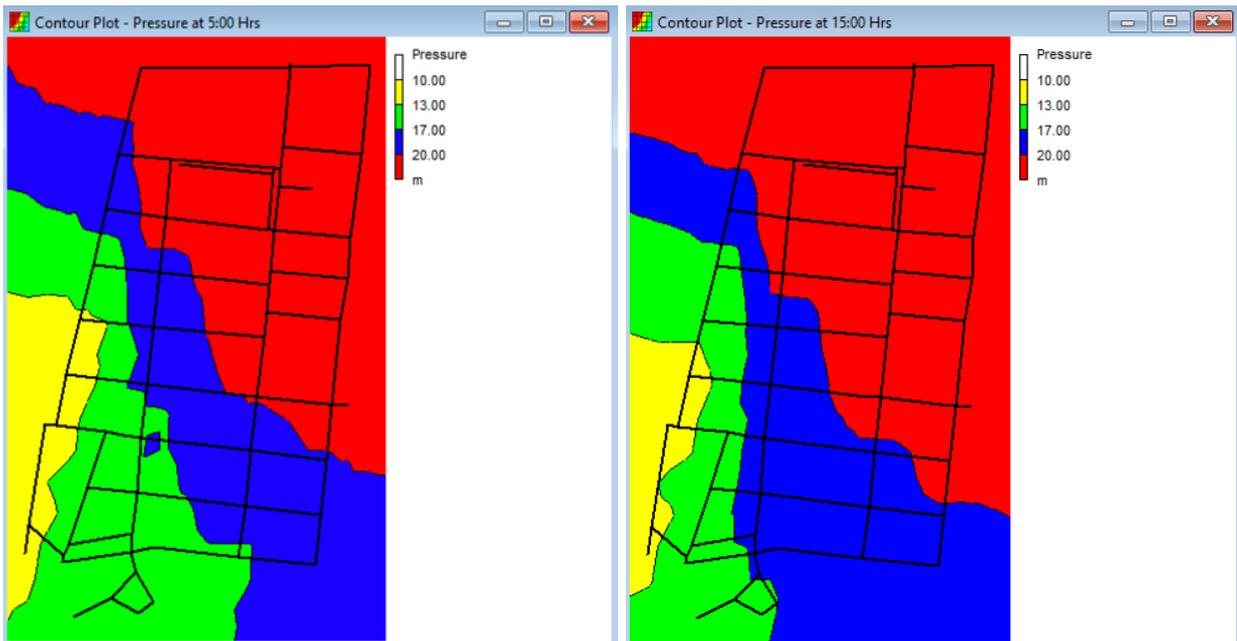


Figura 46. Distribución de presiones en el sector BJ-02, horario de consumo mínimo (izq.) y consumo máximo (der.)

Finalmente, en la Figura 47 se observa el nuevo comportamiento del suministro una vez implementada la regulación de presiones con la cual, el índice de fugas pasaría de un 37% a un 33%.

Cabe mencionar que la diferencias entre las consignas diurna y nocturna es muy baja y por esta razón se hizo una simulación con una presión fija de 16 [m] solamente y se encontró que el índice de fugas permanece en 33%, igual que si se aplica la regulación con las consignas, por lo que resulta necesario hacer el análisis económico sobre la implementación para conocer el costo-beneficio.



Figura 47. Recuperación de caudal en el Sector BJ-02 utilizando modulación por tiempo.

Sector BJ-03

Al igual que el sector BJ-02, este tiene medidores de presión en diferentes puntos estratégicos para conocer el comportamiento y como se distribuye a lo largo de la zona, la presión promedio de entrada al sector es de 23.34 [m].

Por el comportamiento de este sector visto en la Figura 39. gráfica de la Curva de Variación Horaria, de primera instancia se podría regular con tres consignas; de el análisis hecho por modulación de salida fija sabemos que la presión mínima de suministro debe ser de 14 [m] para cumplir con la condición de diseño fijada anteriormente, por lo que las otras consignas deberán ser mayor a 14 [m] de presión.

Los resultados de las simulaciones hechas se pueden ver a continuación en la Tabla 19 donde se observa que la mejor combinación de las consignas disminuirá el índice de fugas de un 57% a un 50%.

La regulación de presión respecto al comportamiento del suministro se puede ver de manera gráfica en la Figura 48, siendo las consignas seleccionadas como baja, media y alta en 14, 15 y 16 [m] respectivamente.

Presión en Consignas [m]			
Baja	Alta	Media	Índice de Fugas
14	16	15	50%
	17	15	51%
	17	16	51%
	18	15	51%
	18	16	52%
	18	17	52%
	19	15	52%
	19	16	52%
	19	17	53%
	19	18	53%
	20	15	52%
	20	16	53%
	20	17	53%
	20	18	54%
20	19	54%	

Tabla 19. Regulación de presión con diferentes consignas, sector BJ-03.

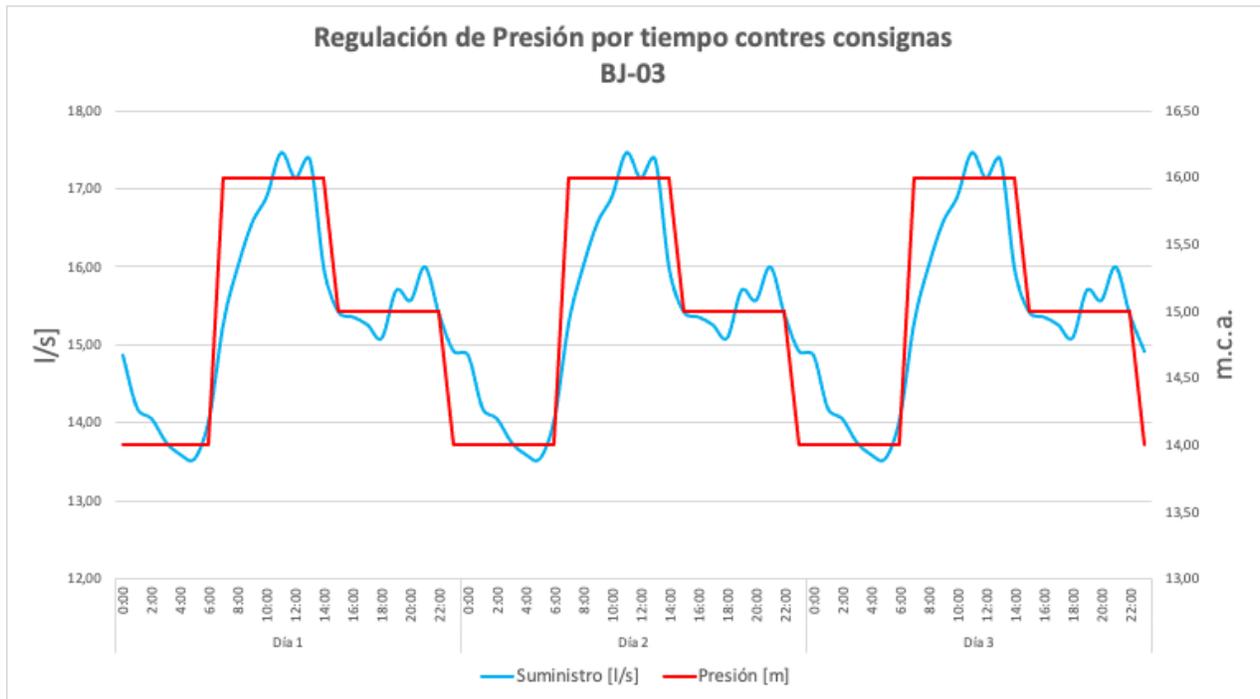


Figura 48. Regulación de presiones en el Sector BJ-03 utilizando modulación por tiempo.

En la Figura 49 se muestra el nuevo comportamiento que tendría el sector con una recuperación promedio de caudal de 2 [l/s] logrando disminuir el Caudal Mínimo Nocturno en un 18%.

Por otro lado, en la Figura 50 se puede observar la distribución de presiones en los horarios de mínima y máxima demanda donde se aprecia que se cumple con la condición de presión de diseño para las tomas domiciliarias.

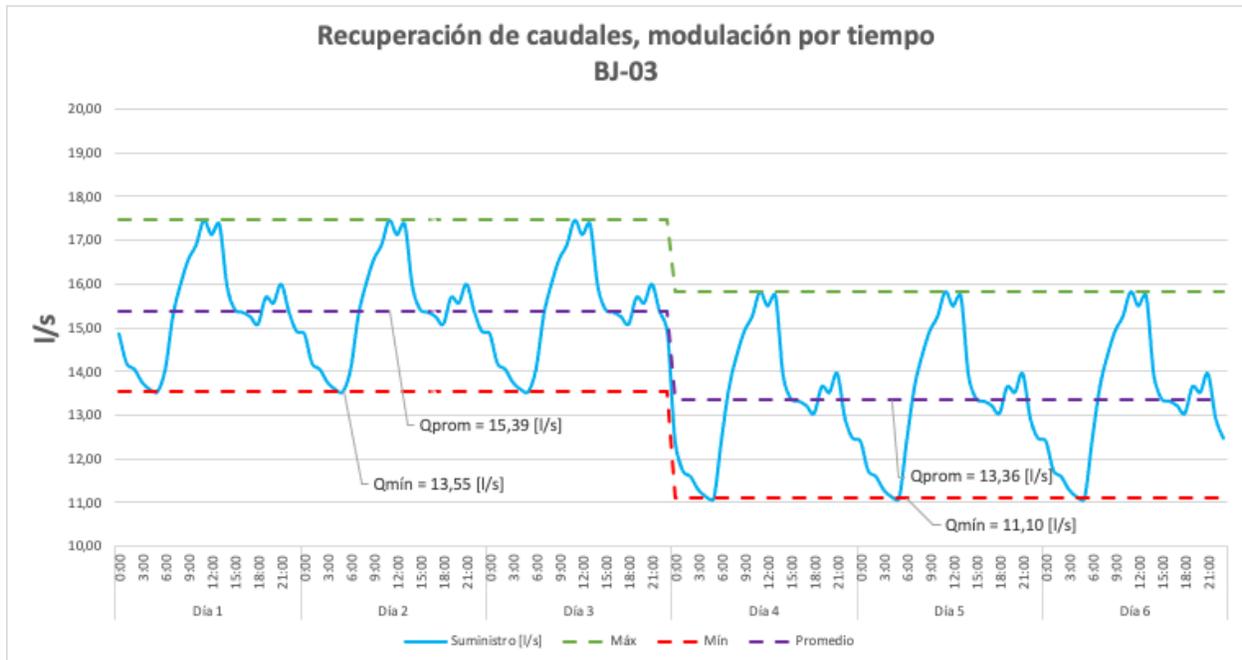


Figura 49. Recuperación de caudal en el Sector BJ-03 utilizando modulación por tiempo.

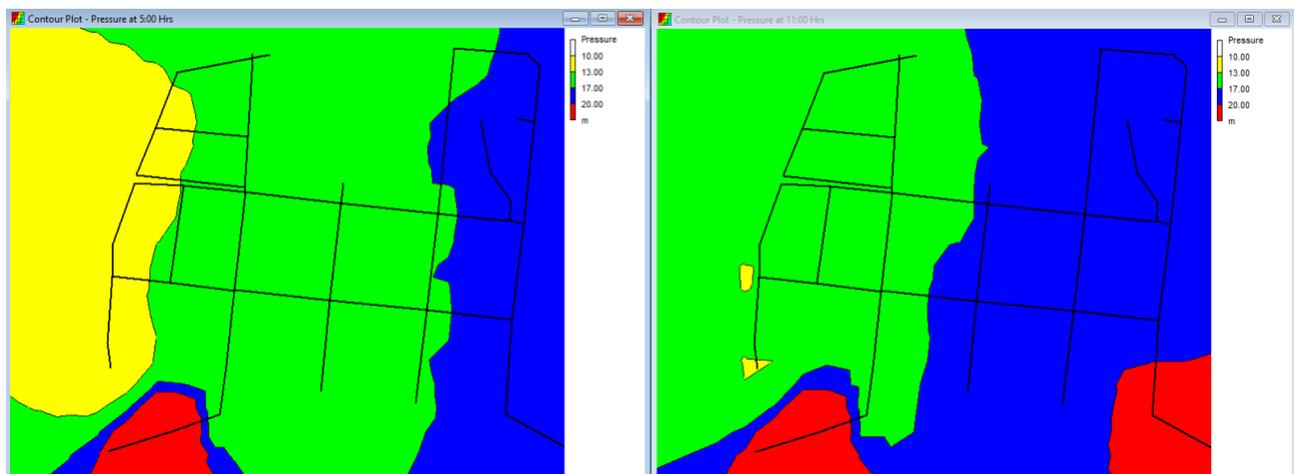


Figura 50. Distribución de presiones en el Sector BJ-03 en los horarios de mínima (izq.) y máxima demanda (der).

IV.4.3. Modulación por consumo

Para la utilización de este tipo de modulación se requiere conocer la relación de pérdidas que existen entre la presión de entrada en el sector y la presión en el punto crítico para diferentes caudales de suministro, por lo que resulta necesario hacer el análisis para conocer esta relación en los sectores. Esta actividad quedará pospuesta y propuesta para otro trabajo, sin embargo, a manera de ilustración, abajo se muestra una relación típica entre la relación que existe suministro-pérdidas y que a partir de esta se pueden establecer los valores de presión regulada conforme al comportamiento del consumo para asegurar el suministro en los sectores.

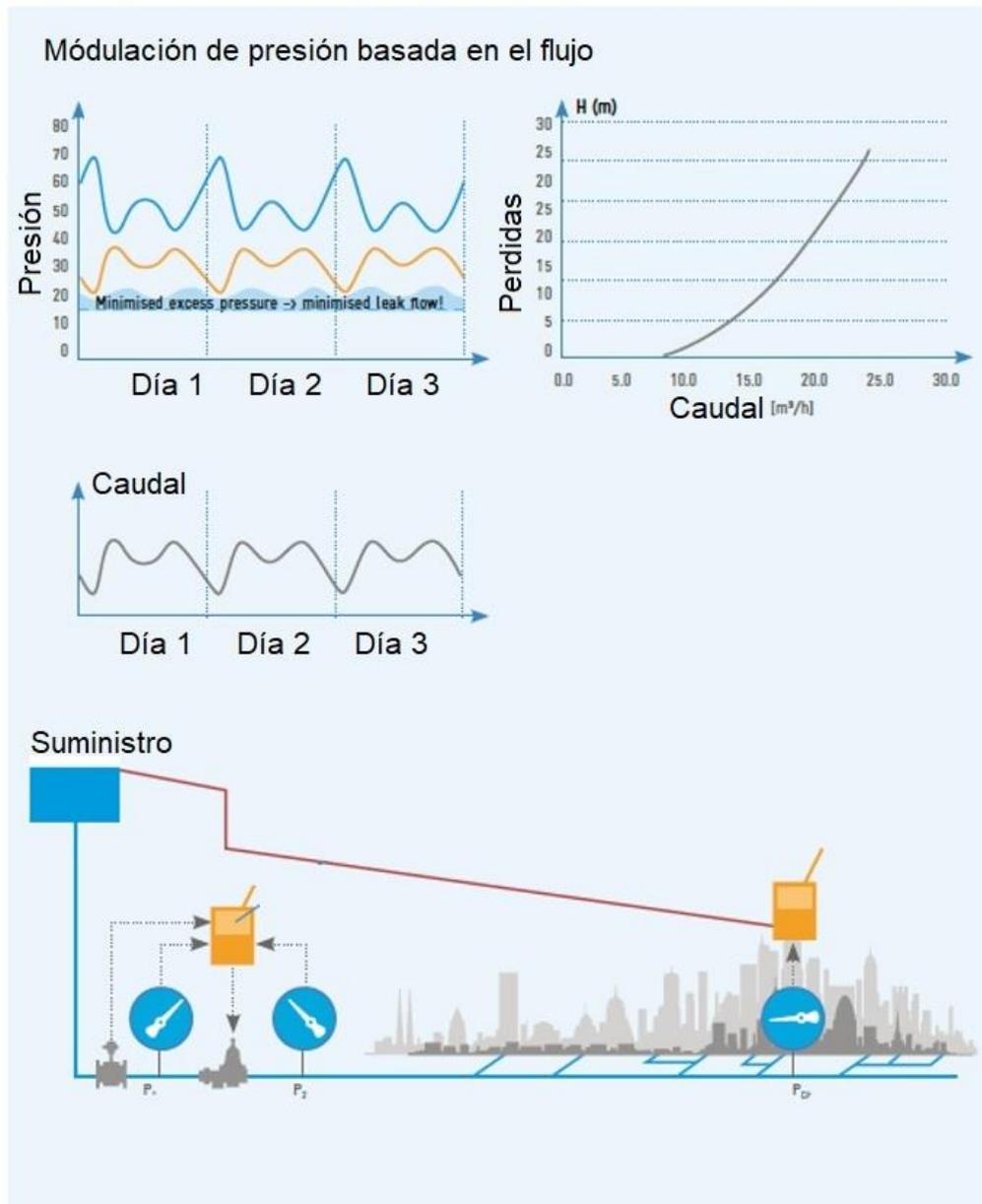


Figura 51. Modulación por consumo utilizando el punto crítico del sector.

Sector BJ-02

Dentro de este sector se pueden identificar dos posibles puntos críticos, P_{cp1} y P_{cp2} , estos se muestran en la Figura 52; el primero es el punto más alto dentro del sector con una elevación aproximada de 2275 m.s.n.m y se ubica Calle 20 y Periférico Norte, por lo que será necesario asegurar que la presión de suministro en este punto sea la de diseño de 10 [m]; como segundo punto crítico se identifica el cruce más alejado de la entrada del sector, siendo este el ubicado en Calle 4 y Av. Revolución con una elevación promedio de 2260 m.s.n.m. Recordemos que la entrada del sector se encuentra en Calle de los Pinos y Av. San Antonio con una elevación promedio de 2270 m.s.n.m. por lo que, el P_{cp2} se puede descartar debido a la diferencia de cotas y solamente fijar el comportamiento en el P_{cp1} , sin embargo se deberá cuidar el exceso de presión que se pueda presentar en P_{cp2} .

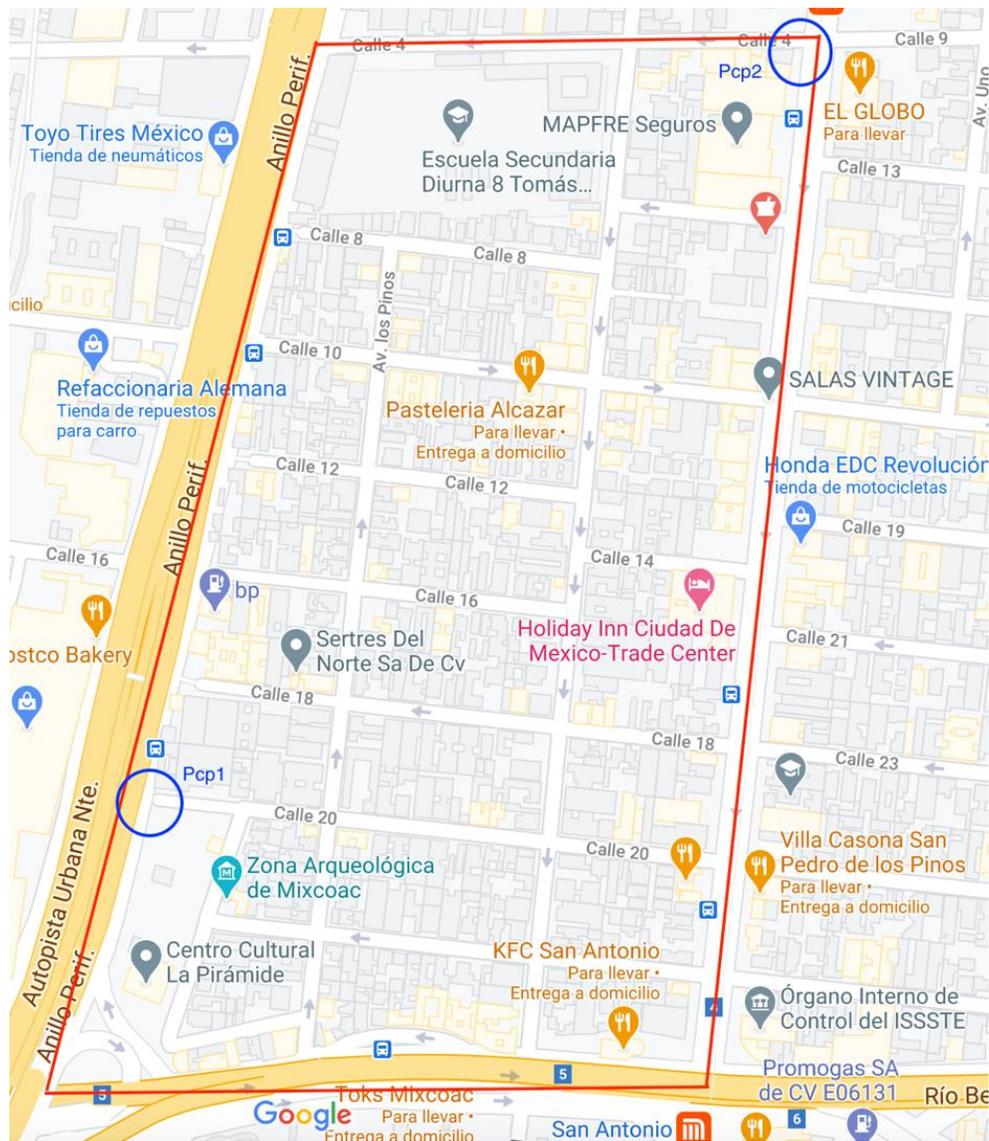


Figura 52. Ubicación de los puntos críticos del Sector BJ-02.

Siguiendo el principio de operación de este tipo de modulación, se utilizó el patrón de comportamiento de la Curva de Variación Horaria en este sector, además, de las simulaciones y resultados anteriores se sabe que la presión mínima de suministro en la entrada de este sector debe ser de 16 [m] y para este sector específico por el desnivel que se tiene entre el punto de entrada y el más alejado que se definió como P_{cp2} , la presión de entrada no podrá ser mayor para evitar que sobrepase lo 30 [m] en este punto por lo que la variación de presión conforme varía el consumo deberá tener estos límites inferior y superior.

Para encontrar los valores se decidió recurrir a una regresión lineal, por un lado, los valores de “X” están dados por los coeficientes de variación horaria, mientras que los dos puntos conocidos son los caudales en el horario de mínima demanda y en el de máxima demanda. En la Tabla 20 se pueden observar los valores de presión para la regulación.

Hora [HH:MM:SS]	Curva de Variación Horaria	Presión [m]
0:00:00	0,81	16,94
1:00:00	0,77	16,70
2:00:00	0,68	16,27
3:00:00	0,66	16,17
4:00:00	0,66	16,14
5:00:00	0,63	16,00
6:00:00	0,64	16,07
7:00:00	0,65	16,12
8:00:00	0,72	16,45
9:00:00	0,88	17,27
10:00:00	1,06	18,23
11:00:00	1,14	18,62
12:00:00	1,26	19,24
13:00:00	1,24	19,18
14:00:00	1,26	19,25
15:00:00	1,40	19,99
16:00:00	1,35	19,72
17:00:00	1,34	19,67
18:00:00	1,31	19,55
19:00:00	1,26	19,25
20:00:00	1,20	18,93
21:00:00	1,16	18,73
22:00:00	1,00	17,94
23:00:00	0,93	17,57

Tabla 20. Curva de Variación Horaria y Presión Regulada, sector BJ-02

Se puede ver en la Tabla 20 que efectivamente la presión varía conforme a la Curva de Variación Horaria del sector y que no sobrepasa ni el límite inferior fijado de 16 [m] ni el superior de 20 [m]. En la Figura 53 se puede ver gráficamente esta variación.

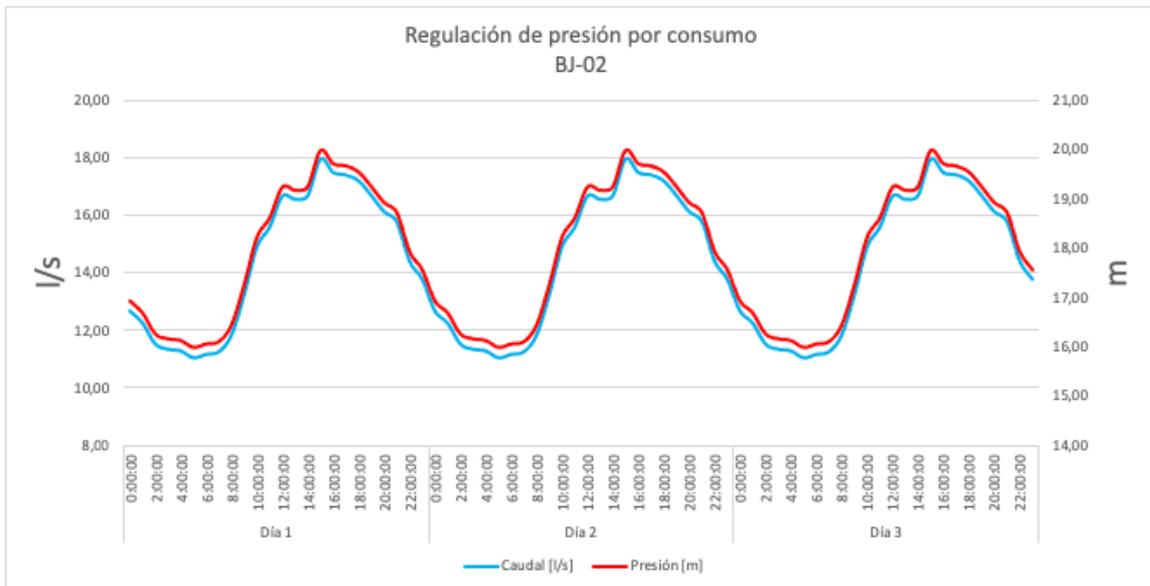


Figura 53. Regulación de presión por consumo, BJ-02

Una vez programada esta regulación de presiones, se simuló y los resultados obtenidos son: una reducción en el índice de fugas de 2%, es decir, pasó de 37% a un 35% con una recuperación de aproximadamente 0.5 [l/s], asimismo, el Caudal Mínimo Nocturno disminuye un 8.3%, estos resultados se presentan en la Figura 54, mientras que en la Figura 55 se aprecia que se cumple con una presión de suministro en las tomas del sector mínima de 10 [m] para los horarios de mínima y máxima demanda.

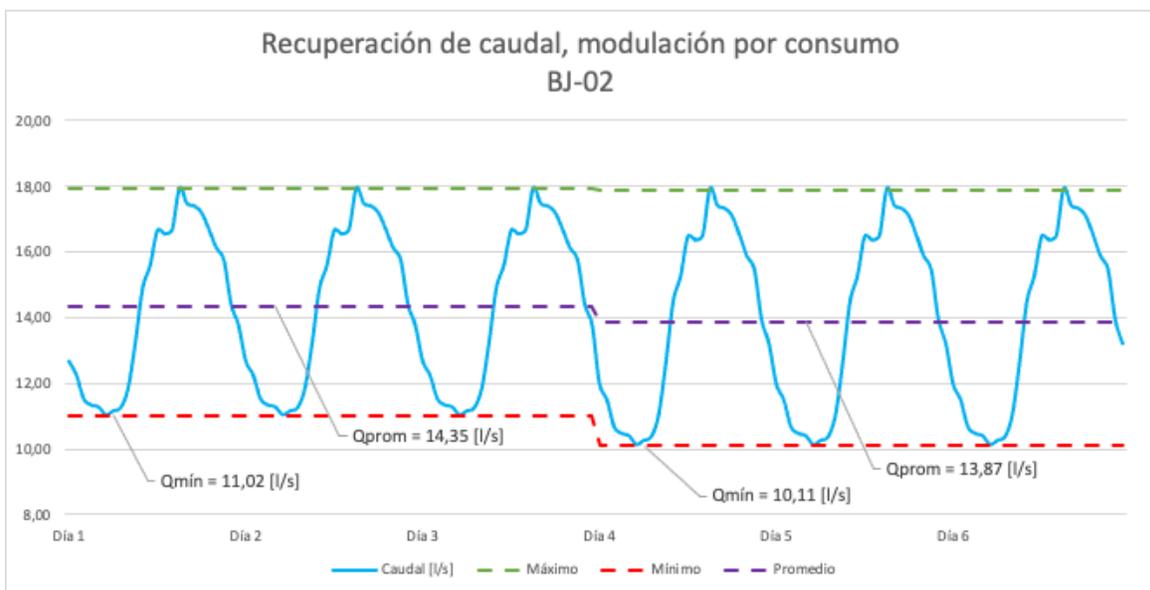


Figura 54. Recuperación de caudal, modulación por consumo en el sector BJ-02

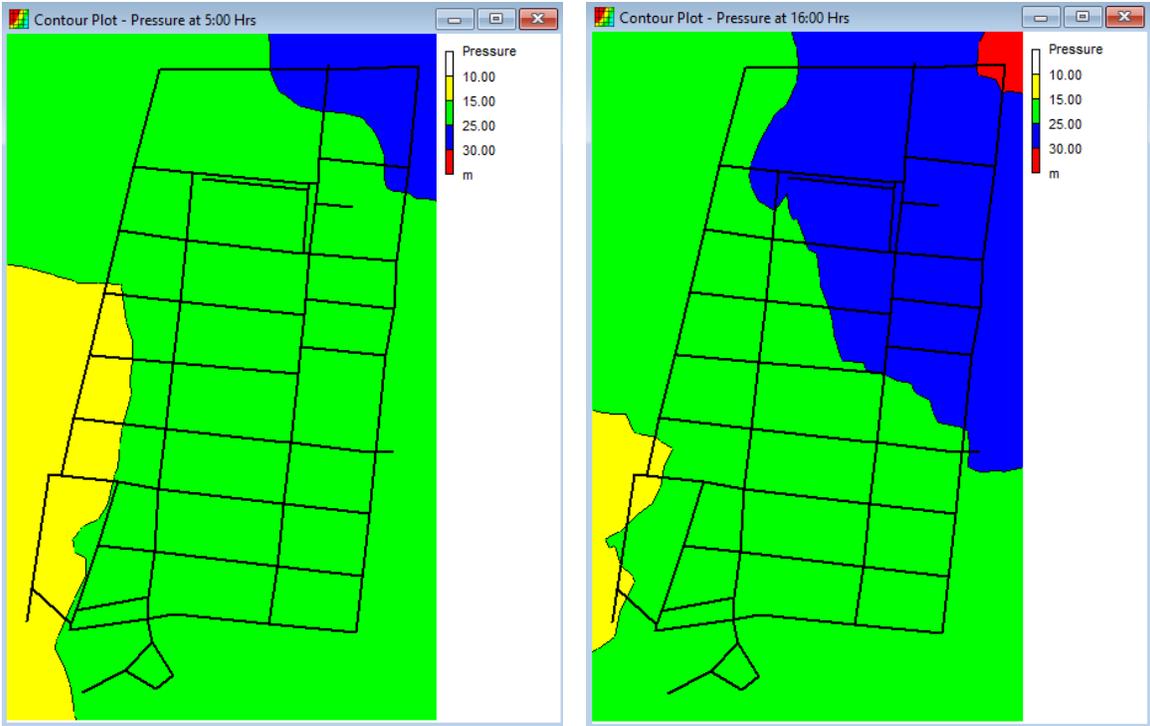


Figura 55. Distribución de presiones en el sector BJ-02, horario de mínima demanda (izq.) y de máxima demanda (der.)

Sector BJ-03

Para este sector, se identifica un punto crítico mostrado en la Figura 56 debido a la topografía con un desnivel de 7 metros con referencia a la entrada del sector, es decir, se encuentra a 2277 [m.s.n.m.] mientras que la entrada del sector se está a 2270 [m.s.n.m].

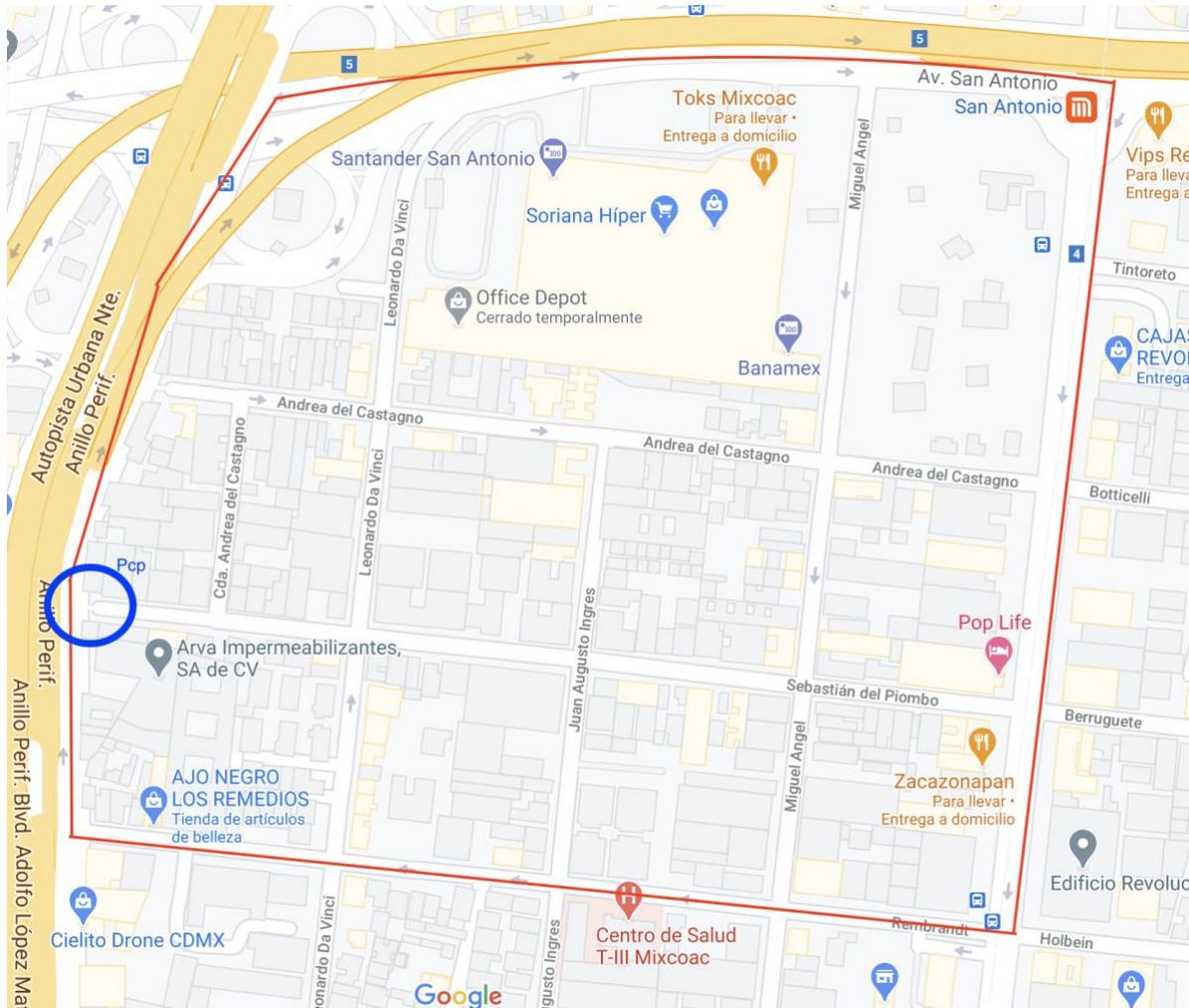


Figura 56. Ubicación de los puntos críticos del Sector BJ-03.

Para obtener la curva de regulación de presiones, se siguió el mismo procedimiento que para el sector BJ-02, los resultados se muestran a continuación en la Tabla 21 y en la gráfica de la Figura 57 donde se puede observar que, la presión mínima en la entrada del sector debe ser de 14 [m] para asegurar la presión de suministro en las tomas domiciliarias de 10 [m] y la presión máxima de diseño es igualmente de 20 [m].

Hora	Curva de Variación Horaria	Presión Reguladaa [m]
0:00:00	0,92	16,03
1:00:00	0,82	14,98
2:00:00	0,80	14,79
3:00:00	0,75	14,32
4:00:00	0,73	14,07
5:00:00	0,72	14,00
6:00:00	0,80	14,79
7:00:00	0,98	16,68
8:00:00	1,09	17,79
9:00:00	1,18	18,66
10:00:00	1,23	19,17
11:00:00	1,31	20,02
12:00:00	1,26	19,52
13:00:00	1,30	19,89
14:00:00	1,08	17,70
15:00:00	1,00	16,88
16:00:00	1,00	16,80
17:00:00	0,98	16,64
18:00:00	0,95	16,37
19:00:00	1,05	17,31
20:00:00	1,03	17,12
21:00:00	1,09	17,77
22:00:00	1,00	16,82
23:00:00	0,93	16,12

Tabla 21. Curva de Variación Horaria y Regulación de Presiones, Sector BJ-02

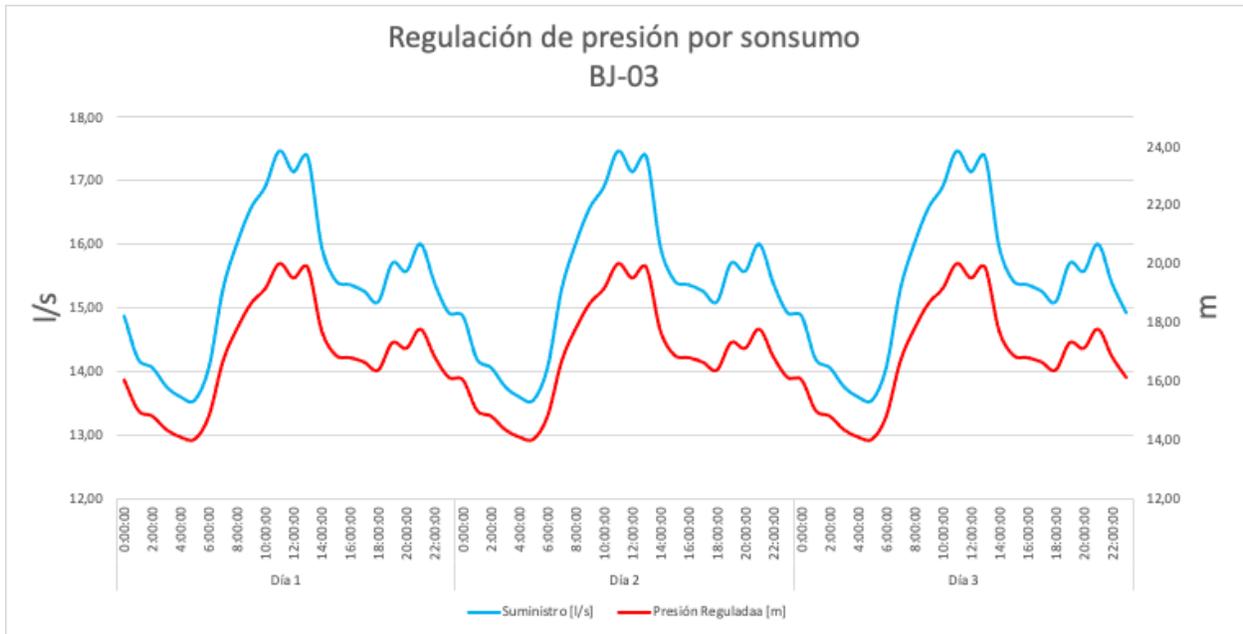


Figura 57. Regulación de presiones en el Sector BJ-03 utilizando modulación por consumo.

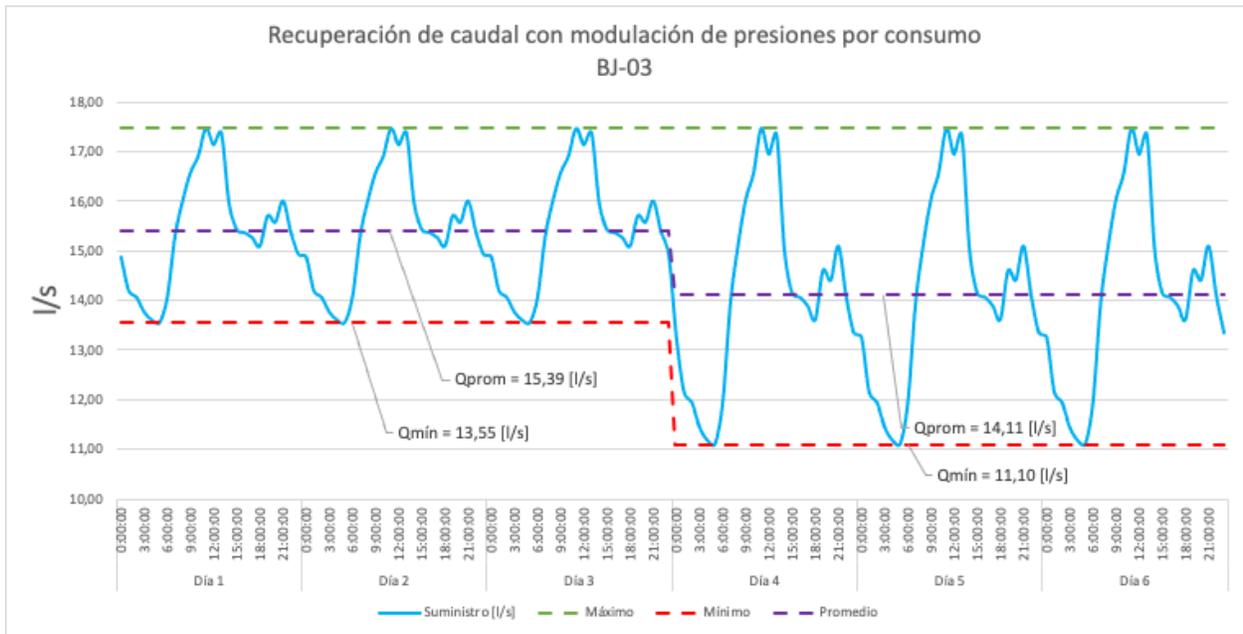
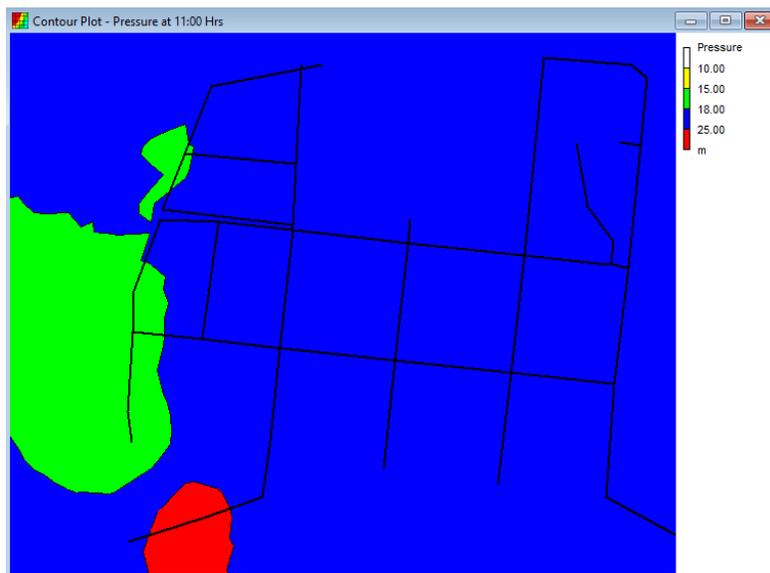
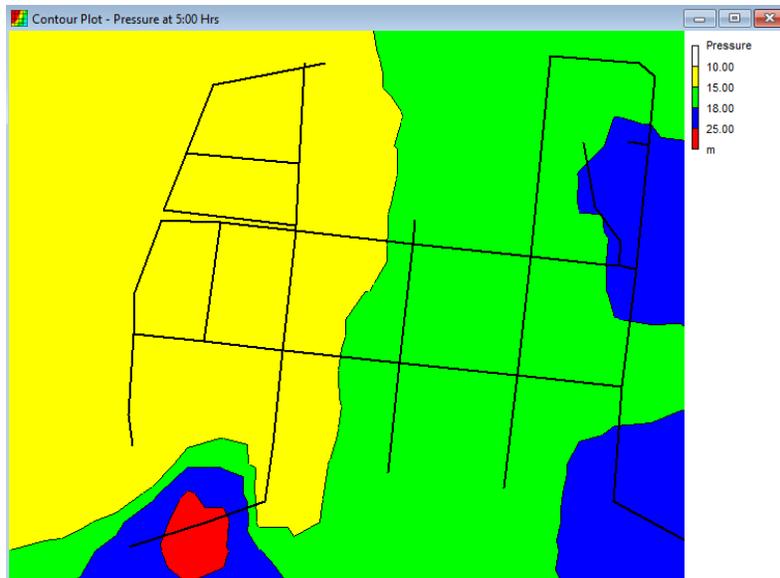


Figura 58. Recuperación de caudal en el Sector BJ-03 utilizando modulación por consumo.



Como resumen de el análisis hecho en este sector se destaca que, al aplicar la regulación de presiones utilizando una modulación por consumo, se podría disminuir el índice de fugas de un 57% a un 53%, recuperando un caudal aproximado de 1.28 [l/s] y reduciendo el Caudal Mínimo Nocturno en un 18%, esto se puede ver en la Figura 58.

Para finalizar este trabajo, en el siguiente capítulo se dan a conocer las conclusiones, donde, de manera general, se concluye que los tres métodos presentados de regulación de presiones no funcionan de manera sistemática, es decir no hay un orden de aplicación y no necesariamente funcionarán de la misma manera para todos los sectores pues estos tienen sus particularidades entre las que más destacan son la topografía y el comportamiento de consumo.

V. Conclusiones

En la actualidad, el principal problema al que se enfrentan los Organismos Operadores de Agua, ya sean públicos o privados en todo el mundo, es las pérdidas de agua, pues al ser un recurso natural tan importante, resulta necesario buscar la sostenibilidad de los servicios ofrecidos y de esto resulta la necesidad de buscar, la mejor metodología para poder atacar este problema buscando siempre el mayor costo-beneficio posible.

De los índices obtenidos y mostrados en la Tabla 18, siendo estos los indicadores de gestión iniciales, se pueden tener las siguientes conclusiones sobre el estado de la red.

- La pérdida económica anual en los sectores es de aproximadamente \$2,586,559.00 pesos para el sector BJ-02, mientras que para el BJ-03 es de \$4,037,109.00.
- Conforme a lo que dicta el UARL, la recuperación potencial tanto de agua como monetaria que se tiene para cada sector es de 88% para BJ-02 y del 93% para el BJ-03, del total de las pérdidas.
- Las eficiencias físicas para cada sector se incrementarían potencialmente en un 95% y un 96% para el BJ-02 y BJ-03 respectivamente.

Se observa también, en la Tabla 22, la posible recuperación de caudal y la disminución del índice de fugas conforme a la aplicación de actividades de gestión de presiones en cada sector.

Tipo de modulación	Parámetro	BJ-02		BJ-03	
		Antes	Después	Antes	Después
Salida Fija	Caudal de Fuga [l/s]	13	9	8.87	6.32
	Recuperación de Caudal [l/s]		4		2.55
	Índice de fugas	59%	37%	57%	49%
Modulación por tiempo	Caudal de Fuga [l/s]	5.31	4.51	8.87	6.73
	Recuperación de Caudal [l/s]		0.80		2.14
	Índice de fugas	37%	33%	57%	50%
Modulación por consumo	Caudal de Fuga [l/s]	5.31	4.83	8.87	7.48
	Recuperación de Caudal [l/s]		0.48		1.39
	Índice de fugas	37%	35%	57%	53%

Tabla 22. Resultados de la simulación para diferentes tipos de gestión de presiones.

Si bien se puede observar para cada tipo de modulación los beneficios que se pueden obtener en la reducción del índice de fugas, es importante resaltar que cada zona de estudio o sector será diferente debido a la topografía, niveles de consumo, niveles de perdidas, densidad de tuberías, tomas, etc. Todos estos factores influenciarán la decisión final del método de gestión de presiones a utilizar.

Además de los efectos positivos de la gestión de presiones, algunos de los beneficios indirectos que se generan son:

- Redistribución de caudales para poder bastecer zonas de mayor problema
- Mejora en el suministro, ya sea el incremento de horas del servicio o incluso eliminar el tandeo para pasar a un suministro continuo
- Asegurar el acceso al servicio de agua para toda la población
- Reducción de costos de energía y producción

De cualquier manera, los Organismos Operadores de Agua deben tener en mente que la gestión de presiones ayuda a la reducción del impacto de las perdidas de agua, pero no resuelve el problema pues las rupturas seguirán en su sitio hasta que estas sean reparadas por lo que esta actividad debe ser vista como uno de los componentes que ayudarán a la reducción de perdidas de manera exitosa a un largo plazo. La gestión de presiones puede resultar un punto de partida importante en zonas/sectores donde exista un alto índice de fugas pues se pueden generar ahorros significantes con poca inversión y en periodos de retorno cortos.

En la Figura 59 se pueden observar los pasos básicos a seguir para implementar una estrategia de gestión de presiones.

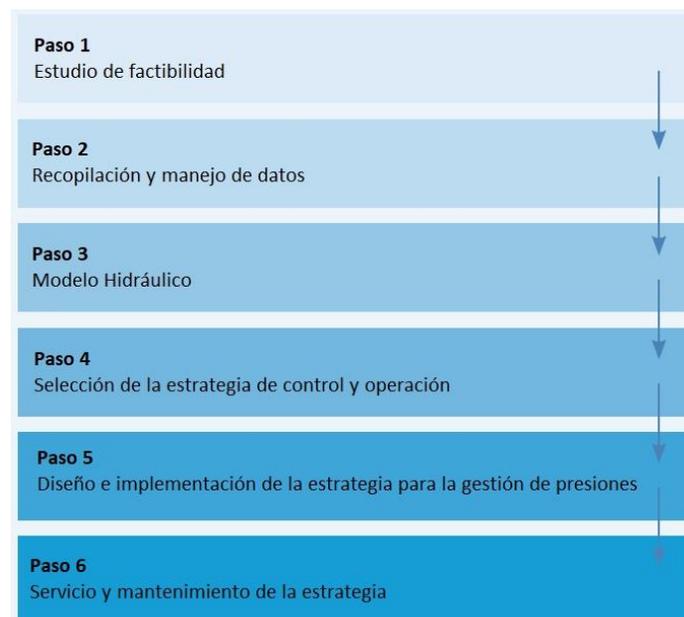


Figura 59. Pasos básicos para implementar una estrategia de gestión de presiones.

Por otro lado, el control activo de fugas resulta de igual importancia para lograr reducir las perdidas a un nivel óptimo. El objetivo principal de las actividades que involucran el control activo de fugas será la de reducir los tiempos en los que una fuga se encuentra activa para que, de esta manera, se pueda reducir el volumen de agua perdido.

Dicho lo anterior, el proceso para un Control Activo de Fugas deberá contar los siguientes pasos:

1. **Reconocimiento.** El monitoreo y análisis continuo el caudal nos permitirá tener un conocimiento de las nuevas fugas que se presenten.
2. **Detección de fugas.** Utilizando registradores de ruido o llevando a cabo inspecciones con equipo acústico se logrará delimitar y reducir las zonas críticas donde se deberán enfocar los esfuerzos para entonces dar paso a la siguiente etapa.
3. **Localización de fugas.** Se podrán utilizar los diferentes métodos existentes para puntualizar las fugas y que puedan ser reparadas.

Conforme a lo mencionado, en el sector BJ-03 no se ha realizado ningún trabajo sobre esto, por lo que lo único recomendado es planear la ejecución de actividades que permitan hacer el recorrido del sector con diferentes tecnologías para detectar y localizar las fugas que puedan existir.

Mientras tanto, dentro del sector BJ-02 si se han llevado a cabo diferentes actividades referentes al Control Activo de Fugas, estas actividades fueron recorridos utilizando las siguientes metodologías:

- Recorridos con detectores acústicos (geófonos)
- Tecnología de gas trazador
- Inspecciones en el drenaje

Una vez localizadas las fugas que se detectaron, se procedió a la reparación y con ello se lograron recuperar 3 [l/s].

Hasta este punto se han presentado soluciones para atacar las perdidas reales, pero son de igual importancia las perdidas aparentes debido a que estas pueden ser resueltas de manera casi inmediata y con costos bajos debido a su naturaleza. Algunas de las actividades que se recomiendan llevar a cabo para disminuir este tipo de perdidas son las siguientes.

- Gestión de micromedidores utilizando los siguientes criterios:
 - Cambio masivo
 - Control de grandes clientes
 - Sustitución según consumo
 - Sustitución según antigüedad o estado físico
- Disminución y control del volumen registrado, pero no facturado
- Brigadas de búsquedas de fraude

Como se puede observar, es difícil contar con una metodología única o universal para la gestión de fugas pues cada sector o zona de estudio opera de manera diferente y tendrán diferentes índices o niveles de fugas, sin embargo, está claro que la combinación de actividades como la gestión de presiones y el control activo de fugas permitirán un mejor control de las pérdidas en las redes de distribución.

El cálculo detallado del balance hidráulico y la determinación del ahorro económico potencial de las pérdidas reales y aparentes son factores decisivos al momento de seleccionar el método correcto para reducción de pérdidas por lo que es importante no solo analizar los componentes del Agua No Contabilizada por la pérdida de volumen si no también el impacto financiero pues como se mencionó anteriormente, la recuperación de las pérdidas aparentes pueden hacerse a relativamente bajo costo pero teniendo un alto beneficio económico de regreso permitiendo ingresos que financiaran nuevos proyectos que den paso a mejorar el servicio entregado por los Organismos Operadores.

Finalmente, se deberá encontrar el equilibrio entre los costos de la estrategia de control de fugas y sus beneficios, lo que se conoce como Nivel Económico de Fugas (ELL por su nombre en inglés). Este estudio se deja propuesto para otro trabajo.

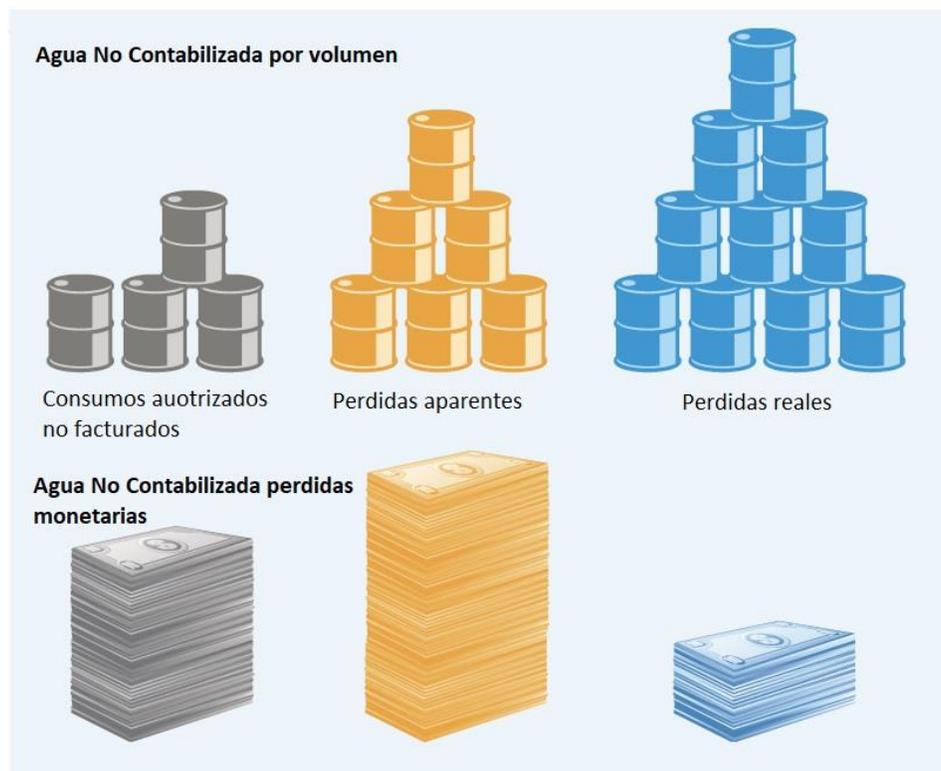


Figura 60. Relación entre pérdidas por volumen y pérdidas financieras del Agua No Contabilizada.

Bibliografía

- [1] D. Ziegler, F. Sorg, P. Fallis, K. Hübschen, L. Happich, J. Baader, R. Trujillo, D. Mutz, E. Oertlé, P. Klingel, A. Knobloch, *Guidelines for water loss reduction: A focus on pressure management*, IWA, 2011.
- [2] Malcolm Farley, *Leakage management and control: a best practice training manual*, 2001.
- [3] Winarni, *ILI as Water Losses Indicator / CED*, Vol. 11, No. 2, September 2009.
- [4] S. Hamilton, R. Mackenzie, C. Seago, *A review of performance indicators for real losses from water supply systems*, 2006.
- [5] CONAGUA, IMTA, *Indicadores de gestión prioritarios en organismos operadores*, 2016.
- [6] IMTA, PIGOO, www.pigoo.gob.mx, 2014.
- [7] Stuart Hamilton, Ronnie McKenzie, *Water Management and Water Loss*, IWA, 2014.
- [8] Stuart Hamilton, Bambos Charalambous, *Leak detection: technology and implementation*, IWA, 2013.
- [9] Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., *Revista Ingeniería Civil*, número 610, julio de 2020.
- [10] Gobierno de la Ciudad de México, *Proyecto Final de Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica*, 2018.