



Título del Trabajo Fin de Máster:

***METODOLOGÍA PARA LA
CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE
MODELOS DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE
LA UTILIZACIÓN CONJUNTA DE
DEMANDAS Y CONSUMOS
DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

MOLINA ARCE, STEPHENSON XAVIER

Director/es:

DR. IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

***DR. MARTINEZ SOLANO, FRANCISCO
JAVIER***

Fecha: **JULIO, 2014**



Título del Trabajo Fin de Máster:

METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN CONJUNTA DE DEMANDAS Y CONSUMOS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

Autor: **MOLINA ARCE, STEPHENSON XAVIER**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	PEDRO LUIS IGLESIAS REY	Fecha de Lectura	JULIO, 2014
Codirector1	FRANCISCO JAVIER MARTINEZ		
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

Los modelos hidráulicos de redes de abastecimiento de agua son ampliamente utilizados por empresas de abastecimiento y consultores para asistir en tareas de planificación, diseño, evaluación de la operación, análisis de gestión energética y análisis de calidad del agua; y últimamente han ganado importancia entre la comunidad de reguladores de servicios de agua para la toma de decisiones relativas a la seguridad del consumidor y de inversiones de capital, convirtiéndose en una herramienta indispensable para la gestión del abastecimiento. Es así que mientras más preciso sea el modelo hidráulico, resulta más confiable como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, y por lo tanto la calibración de éste resulta un requisito fundamental al momento de su desarrollo.

El presente Trabajo de Fin de Máster propone una metodología para la calibración preliminar de modelos hidráulicos. Fundamentada en varias de las hipótesis utilizadas como formulaciones teóricas para las técnicas de calibración avanzada. La propuesta metodológica está basada en la modelación de demandas dependientes de la presión, distribuidas espacialmente en función de la longitud de las tuberías y del nivel de fugas estimado para sectores de red definidos en el sistema de distribución. Se compone de cuatro procesos básicos que buscan calibrar el emisor global de fugas, determinar los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base, ajustar los coeficientes de pérdida de válvulas, y calibrar los emisores de fuga distribuidos en los nudos del modelo hidráulico.

Para validar la metodología propuesta, ésta se ha aplicado a tres casos de estudio; los cuales consisten en sectores de red de distribución con diferentes rendimientos volumétricos, pertenecientes al sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Guayaquil (Ecuador).

ABSTRACT:

Hydraulic models of water distribution systems are widely used by water utilities and consultants to assist in planning, design, evaluation of the operation, analysis of energy management and water quality analysis; and lately have gained importance among the regulatory community water services for decision-making regarding consumer safety and capital investment, becoming an indispensable

tool for supply management. Thus, the more accurate the hydraulic model, it is more reliable as a support tool for decision making, and therefore this calibration is a fundamental requirement at the time of development.

This investigation work proposes a methodology for preliminary calibration of hydraulic models. Based on a number of assumptions and theoretical formulations advanced calibration techniques. The proposed methodology is based on the modeling of the pressure-dependent demands, spatially distributed according to the length of the pipes and the level of estimated leakage for network sectors defined in the distribution system. It consists of four basic processes that seek to gauge the overall emitter leakage, determine the coefficients of the consumption pattern for the base demand, adjust the valve loss coefficients, and calibrate the leakage emitters assigned to the nodes of the hydraulic model.

To validate the proposed methodology, it has been applied in three case studies; sectors of the water distribution system with different volumetric flows belonging to the water supply system of the city of Guayaquil (Ecuador).

RESUM:

Els models hidràulics de xarxes d'abastiment d'aigua són àmpliament utilitzats per empreses d'abastiment i consultors per a assistir en tasques de planificació, disseny, avaluació de l'operació, anàlisi de gestió energètica i anàlisi de qualitat de l'aigua; i últimament han guanyat importància entre la comunitat de reguladors de servicis d'aigua per a la presa de decisions relatives a la seguretat del consumidor i d'inversions de capital, convertint-se en una ferramenta indispensable per a la gestió de l'abastiment. És així que mentres més precís siga el model hidràulic, resulta més fiable com a ferramenta de suport per a la presa de decisions, i per tant la calibratge d'este resulta un requisit fonamental al moment del seu desenrotllament.

Este treball d'investigació proposa una metodologia per a la calibratge preliminar de models hidràulics. Fonamentada en diverses de les hipòtesis utilitzades com a formulacions teòriques per a les tècniques de calibratge avançada. La proposta metodològica està basada en la modelació de demandes dependents de la pressió, distribuïdes espacialment en funció de la longitud de les canonades i del nivell de fugues estimat per a sectors de xarxa definits en el sistema de distribució. Es compon de quatre processos bàsics que busquen calibrar l'emissor global de fugues, determinar els coeficients del patró de consum per a la demanda base, ajustar els coeficients de pèrdua de vàlvules, i calibrar els emissors de fuga distribuïts en els nucs del model hidràulic

Per a validar la metodologia proposada, esta s'ha aplicat a tres casos d'estudi; els quals consistixen en sectors de xarxa de distribució amb diferents rendiments volumètrics, pertanyents al sistema d'abastiment d'aigua de la ciutat de Guayaquil (Equador)

Palabras clave:

calibración / red de distribución de agua / emisor de fugas / patrón de consumo / EPANET

Índice de contenidos

1	INTRODUCCION	1
1.1	Justificación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estructura del Trabajo de Fin de Máster	2
2	ESTADO DEL ARTE	5
2.1	Generalidades de la modelación hidráulica de redes de distribución de agua.....	5
2.2	Carga del modelo hidráulico: Asignación de la demanda independiente y dependiente de la presión	6
2.2.1	Asignación de las demandas independientes de la presión: Consumos	6
2.2.2	Asignación de las demandas dependientes de la presión: Fugas.....	9
2.2.2.1	Hidráulica de fugas.....	9
2.2.2.2	Modelación de fugas	12
2.3	Calibración de modelos hidráulicos.....	15
2.3.1	Fuentes de error en los modelos hidráulicos.....	16
2.3.2	Procedimiento general para la calibración de modelos hidráulicos.....	19
2.3.3	Criterios para evaluar la calibración de modelos hidráulicos.....	22
2.3.4	Técnicas avanzadas de calibración.....	25
2.3.4.1	Técnicas analíticas de calibración	27
2.3.4.2	Técnicas implícitas apoyadas en métodos de optimización no evolutivos	29
2.3.4.3	Función objetivo para la calibración mediante técnicas implícitas no evolutivas	31
2.3.4.4	Técnicas implícitas apoyadas en métodos de optimización evolutivos.....	33
2.3.4.5	Simplificación del problema de la calibración mediante la agrupación de tuberías y nudos.....	34
2.4	Gestión de pérdidas de agua	36
2.4.1	Conceptos básicos	36
2.4.2	Estimación de pérdidas	38
2.4.2.1	El Balance hídrico de la IWA/AWWA	39
2.4.3	Técnicas para la gestión de pérdidas de agua	42
2.4.4	Distritos de Medición aplicados a la gestión de pérdidas.....	44
2.4.4.1	Detección de fugas apoyada en Distritos de Medición	47

3	PROPUESTA METODOLOGICA	51
3.1	Carga del modelo hidráulico	52
3.2	Ajuste de los parámetros de calibración del modelo	55
3.2.1	Calibración del emisor global de fugas.	58
3.2.2	Calibración del patrón de consumo de la demanda base.....	59
3.2.3	Calibración de las pérdidas de carga en la red.....	60
3.2.4	Calibración de los emisores de fugas distribuidos espacialmente.	62
3.3	Resumen del procedimiento de calibración	65
4	CASOS DE ESTUDIO	67
4.1	Información técnica de los sectores de estudio.	67
4.2	Información comercial de los sectores de estudio.....	69
4.3	Descripción general de los modelos hidráulicos construidos	72
4.4	Datos de calibración.....	76
4.5	Carga de los modelos hidráulicos	80
4.6	Aplicación de la metodología de calibración.....	82
4.6.1	Caso 1: distrito de medición N72-M132	82
4.6.2	Caso 2: distrito de medición N50-M31	88
4.6.3	Caso 3: distrito de medición CTC-M44.....	96
4.7	Resumen de los casos de estudio desarrollados	103
5	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	105
5.1	Conclusiones	105
5.2	Desarrollos futuros	107
	Referencias	109
	Anexo 1. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso N72-M132.....	119
	Anexo 2. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso N50-M31.....	123
	Anexo 3. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso CTC-M44	cxxvii

1 INTRODUCCION

1.1 Justificación

Actualmente los modelos hidráulicos de redes de abastecimiento de agua son ampliamente utilizados por empresas de abastecimiento y consultores para asistir en tareas de planificación, diseño, evaluación de la operación, análisis de gestión energética y análisis de calidad del agua; y últimamente han ganado importancia entre la comunidad de reguladores de servicios de agua para la toma de decisiones relativas a la seguridad del consumidor y de inversiones de capital, convirtiéndose en una herramienta indispensable para la gestión del abastecimiento. Es así que mientras más preciso sea el modelo hidráulico, resulta más confiable como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, y por lo tanto la calibración de éste resulta un requisito fundamental al momento de su desarrollo.

La American Water Works Association (AWWA) afirma que la calibración consiste en comparar los resultados del modelo con mediciones obtenidos en campo, realizando ajustes a parámetros del modelo y la revisión de los datos de campo hasta alcanzar la concordancia entre ambos (AWWA, 2013). Los parámetros hidráulicos usualmente ajustados para calibrar los modelos son aquellos correspondientes a rugosidades de tuberías, válvulas, patrones de demanda y grupos de bombeo. La revisión de la literatura técnica relativa a calibración de modelos muestra que al día de hoy existe una gran variedad de técnicas de calibración que han sido formuladas, tanto para estado estacionario como período extendido; entre las cuales se incluyen técnicas analíticas (iterativas, prueba-error, modelos explícitos), y técnicas implícitas basadas en optimización utilizando métodos no evolutivos y evolutivos. Sin embargo, el ajuste de los factores antes mencionados mediante cualquier técnica de calibración resulta insuficiente para obtener un modelo que sea capaz de reproducir el funcionamiento real de la red con un adecuado nivel de precisión si la carga del modelo hidráulico no ha sido realizada adecuadamente considerando todas las demandas independientes y dependientes de la presión; tales como consumos registrados, no registrados y fugas. Se plantea por lo tanto que éste objetivo puede lograrse adaptando las buenas prácticas propuestas para la gestión de pérdidas en redes de abastecimiento a los requerimientos de la modelación en la fase de carga y calibración del modelo.

Por otro lado, un estudio realizado por la AWWA en 2008 mostró que mientras las empresas de software y el sector académico apuntan hacia el desarrollo continuo de técnicas avanzadas de calibración de modelos basadas en algoritmos de optimización avanzada; en la práctica, la mayoría de las empresas de abastecimiento enfocan equivocadamente la solución al problema de la calibración de modelos hidráulicos. Es así que el autor considera que el sector académico no debe olvidar la necesidad de los operadores de los abastecimientos de disponer una metodología de calibración simplificada basada en los conceptos básicos de las técnicas avanzadas de calibración, para que los asista y que se

adapte a la realidad técnica, económica y experiencia del personal disponibles para la modelación de redes; lo que constituye la justificación para el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster.

1.2 Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Máster busca presentar una propuesta metodológica para la asignación de consumos y demandas dependientes de la presión (fugas) en los modelos hidráulicos de redes de abastecimiento de agua potable que permita:

- Asignar espacialmente las demandas utilizando herramientas informáticas para la gestión y manejo de bases de datos espaciales (Sistemas de Información Geográfica)
- Estimar las pérdidas (aparentes y reales) de la red utilizando las buenas prácticas sugeridas por consultores y académicos para la gestión de pérdidas.
- Representar espacialmente las fugas existentes en la red de abastecimiento basándose en las propuestas existentes en el estado del arte de la modelación de redes.
- Resolver de manera práctica el problema de la calibración del modelo hidráulico a través de un proceso iterativo simplificado de rápida convergencia, que esté enmarcada en las buenas prácticas de la modelación y calibración de redes.
- Utilizar información mínima referente a la operación técnica, comercial y de gestión de pérdidas de la red de abastecimiento.
- Analizar la metodología propuesta a través de tres casos de estudio correspondientes a zonas de distribución con diferente rendimiento volumétrico, pertenecientes a la red de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Guayaquil (Ecuador). Este objetivo busca contrastar el coeficiente del emisor de fugas obtenido con el método planteado, en función del rendimiento volumétrico de la red de abastecimiento.

1.3 Estructura del Trabajo de Fin de Máster

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se estructura en cinco capítulos. En el capítulo 1 se ha revisado la justificación para el desarrollo de este documento, y se han planteado los objetivos a cumplir. En el capítulo 2 se presentará el estado-del-arte relativo al enfoque de la metodología propuesta. Es así que inicialmente se revisa la bibliografía existente del proceso de carga del modelo hidráulico, diferenciando entre demandas independientes y dependientes de la presión en la red, correspondientes a los consumos propiamente dichos y las fugas respectivamente. A continuación se revisa información relativa a la calibración de modelos, incluyendo la revisión de las principales fuentes de error en modelos, y criterios generales para desarrollar y evaluar la calibración de modelos. En un apartado especial son presentadas las técnicas avanzadas de calibración disponibles en la literatura técnica, varias de las cuales constituyen la base para el desarrollo del enfoque utilizado en la metodología propuesta en este trabajo. Finalmente, puesto que la técnica propuesta está apoyada en técnicas para la gestión de pérdidas en redes de distribución de agua, se hablará del balance

hídrico y la estimación de pérdidas fugas, la medición del caudal inyectado a Distritos de Medición, y un método de detección de fugas.

En los diferentes apartados que conforman el capítulo 3 se formulará la metodología propuesta, y en el capítulo 4 se presentarán y desarrollarán los casos de estudio utilizados para verificar la aplicabilidad de ésta. Finalmente, en el capítulo 5 se presentarán las conclusiones del presente trabajo de investigación y las propuestas para desarrollos futuros, en los que se discutirá la ampliación del alcance del trabajo desarrollado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades de la modelación hidráulica de redes de distribución de agua

Teixeira et al (2006) afirman que un modelo hidráulico está compuesto por: (1) un conjunto de datos descriptivos de las características físicas del sistema, de los consumos, y de las condiciones de operación, (2) un conjunto ecuaciones matemáticas que reproducen el comportamiento hidráulico de los componentes individuales del sistema, (3) algoritmos numéricos necesarios para resolver el conjunto de ecuaciones del sistema. Por otro lado, de acuerdo con la Real Academia Española, un *modelo* es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Es así que es posible definir un modelo hidráulico como la representación matemática de los elementos existentes en una red de distribución. Cabrera et al (2009) afirma que el objetivo de todo modelo hidráulico es simular el comportamiento una red con la mayor exactitud posible. Siendo posible conocer las dinámicas existentes en la red de distribución y analizar su respuesta a situaciones específicas (Savic y Banyard, 2011).

Los modelos hidráulicos se pueden clasificar en estáticos y dinámicos. Los *modelos estáticos*, también llamados modelos de análisis en régimen permanente, simulan el estado de la red en un único instante. Es decir, buscan determinar los valores de las variables del sistema para una situación dada sin considerar las variaciones temporales. Los *modelos dinámicos* simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo (Cabrera et al, 2009; Fuertes et al, 2002). Entre estos deben distinguirse los modelos inerciales y los no inerciales (o cuasi-estáticos); siendo este último tipo de modelo el que se conoce como simulación en período extendido.

El desarrollo de un modelo hidráulico debe ser realizado de forma estructurada y sistemática (Teixeira et al, 2006) cumpliendo dos etapas generales: la construcción y calibración del modelo. La construcción del modelo contempla inicialmente la estructuración de los datos físicos (tuberías, nudos, depósitos, válvulas, bombas) a ser representados en el modelo mediante líneas y nudos. En función del nivel de detalle requerido, y basada en la información disponible se realiza la *esqueletización* o *reducción* de la red de distribución real. Posteriormente en la etapa de construcción se realiza la *carga del modelo* hidráulico, que abarca la estimación de los consumos existentes, y su distribución espacial y temporal en los nudos del modelo. Al finalizar esta etapa se obtiene un modelo completamente funcional, pero cuyos resultados de simulación pueden diferir significativamente de los medidos en la red real. Esto es solucionado en la segunda etapa del modelo, a través de la calibración; la cual consiste en el ajuste de los parámetros que introducen mayor incertidumbre al modelo, tales como: rugosidad de tuberías, demandas en los nudos, y fugas. En todas las etapas y fases del desarrollo del modelo se realiza recopilación de información de campo; relacionada

con las características geométricas y operacionales de los elementos de la red, y mediciones de parámetros que describen el comportamiento hidráulico de la misma.

2.2 Carga del modelo hidráulico: Asignación de la demanda independiente y dependiente de la presión

La carga del modelo hidráulico consiste en asignar a los nudos del modelo las demandas de agua supuestas en la red de distribución (Larado, 2012). Asumir que las demandas no están distribuidas uniformemente a lo largo de las tuberías, sino que ocurren en los extremos de ésta, genera errores significativos en el cálculo de las pérdidas de carga (Giustolisi y Todini, 2009; Giustolisi, 2010). Esto ocasiona diferencias entre los resultados de la simulación del modelo y las mediciones realizadas en la red; cuya magnitud depende de la desviación asociada al método de asignación de demandas utilizado (Kanakoudis y Gonelas, 2014). Para tratar de representar en el modelo las pérdidas de carga debidas a los consumos distribuidos a lo largo de las tuberías, Franchini y Alvisi (2010) y Farina et al (2014) proponen métodos para ajustar la rugosidad de las tuberías; basados en el Método del Gradiente Global, y un procedimiento iterativo, respectivamente.

Centrándonos en el problema de la carga del modelo, Cesario y Lee (1980) hacen una primera aproximación para la asignación de la demanda en los nudos del modelo. Proponen dos métodos basados en la agregación del consumo por categoría de uso, en los cuales los consumos comerciales e industriales se asignan a los nudos espacialmente respectivos; diferenciándose en la forma en la que se asignan los consumos domésticos y el agua no registrada. En el primer método los consumos domésticos se obtienen multiplicando el número de viviendas relacionadas espacialmente a cada nudo por el consumo promedio por vivienda correspondiente a cada sector, distrito o barrio. La diferencia entre el volumen promedio diario de agua inyectada y la suma de todos los consumos asignados se considera como agua no registrada, y se reparte uniformemente entre todos los nudos del modelo. En el segundo método propuesto, el valor del consumo doméstico asignado a cada nudo se obtiene prorrateando la diferencia entre el volumen promedio diario de agua inyectada y la suma de los consumos comerciales e industriales. Sin embargo, estos enfoques tradicionales no tienen en cuenta la sensibilidad de las fugas a la variación de la presión. Por lo tanto, es necesario revisar en este estado del arte las técnicas de asignación de consumos y fugas por separado.

2.2.1 Asignación de las demandas independientes de la presión: Consumos

Según Martínez (2002) la asignación de cargas incluye dos procesos simultáneos: determinar el 'consumo medio' de cada abonado (que en este apartado se describirá simplemente como 'consumo'), y la distribución espacial y temporal de dichos consumos; para luego ser asignados como demanda base en los nudos del modelo hidráulico.

Generalmente, el consumo de los abonados puede ser determinado a partir de la información disponible en la base de datos de clientes del abastecimiento. La información registrada en esta base de datos usualmente corresponde: nombre del abonado, número de cuenta, localización espacial (dirección o código catastral), volumen medido por los contadores o el volumen facturado, la categoría de uso (doméstico, comercial, industrial), información del contador (tipo, diámetro, edad), y su periodicidad de lectura o facturación (Larado, 2012). Fuertes et al (2002) basa el cálculo de caudales de la modelación de redes en el balance hídrico del abastecimiento o zona de estudio; cuantificando el volumen de agua inyectada y los consumos registrados y no registrados. Puesto que este TFM está apoyado en conceptos de gestión de pérdidas, se ha considerado incluir éste tema en el capítulo 2.4.2.1, correspondiente al balance hídrico.

La distribución espacial de los consumos existentes en la red de distribución es un factor que condiciona la precisión del modelo hidráulico. Es así que resulta necesario utilizar herramientas de análisis espacial incluidas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para apoyar el proceso de asignación de consumos. Las principales estrategias apoyadas en SIG corresponden a métodos de Área (técnicas polígono-a-punto) y métodos basado en Punto (técnicas punto-a-punto). Larado (2012) sugiere que el uso de cada método depende de la calidad y el tipo de los datos disponibles, y el uso previsto del modelo; sin embargo, el consumo correspondiente a los grandes consumidores deben ser asignados separadamente para asegurar su adecuada ubicación espacial.

Los *métodos de Área* utilizan polígonos para realizar la distribución del consumo. Walski et al (2007) proponen la agrupación del consumo de todos los abonados localizados dentro de un 'polígono de servicio', para luego ser relacionados a un nudo específico del modelo (Figura 1).

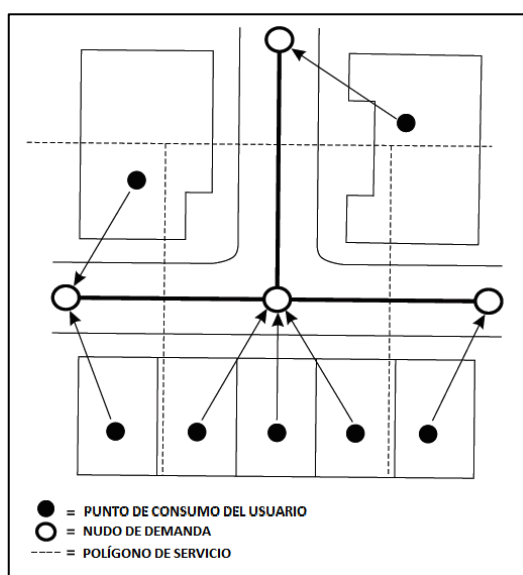


Figura 1 Ilustración del Método de Área (Fuente:Walski et al, 2007)

En este tipo de técnica el polígono de servicio define el área de servicio asociada a cada nudo. Este método puede estar apoyado en el uso de diagramas de Voronoi, también conocidos como polígonos de Thiessen. Es así que los consumos conocidos (en valor y ubicación) son asignados al nudo más cercano según el criterio de la distancia Euclidiana entre el nudo asociado al polígono y los puntos de consumo. Si el valor individual de los consumos y su ubicación no son conocidos, estos pueden ser obtenidos utilizando datos del área del polígono de Thiessen, la distribución y densidad de la población, y el consumo per cápita. En este último caso los datos se obtienen a partir de los registros del volumen total o caudal suministrado a una zona de la red (Guth y Klingel, 2012).

Los *métodos basados en Punto* (Figura 2) se utilizan cuando se conoce el consumo por cada abonado, no siendo necesario conocer la ubicación exacta del punto de consumo (o contador) del abonado; pues basta con representar el punto de consumo mediante el centroide de la parcela o edificio, o inclusive a lo largo de la frontera de éstos. Éste método utiliza la función de unión ('Join') disponible en los SIG; de tal forma que sea posible relacionar cada abonado al nudo de demanda más cercano del modelo hidráulico.

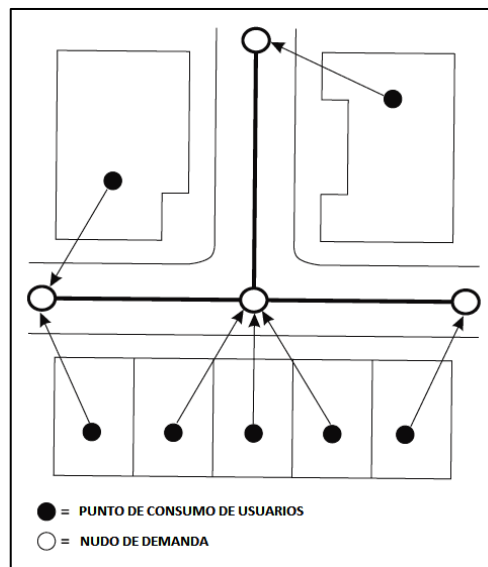


Figura 2 Ilustración del Método basado en Punto (Fuente: Walski et al, 2007)

Como ya se mencionó en párrafos anteriores los valores correspondientes al consumo de los abonados pueden ser determinados a partir de los registros de lectura de contadores o de facturación. Sin embargo, no siempre es posible alcanzar una cobertura completa de medición del consumo, como ocurre en el Reino Unido, donde la mayoría de los abonados no disponen de contadores. En ese caso es posible utilizar un método simple basado en el cálculo del 'consumo unitario' e información relativa a la densidad poblacional o áreas de servicio por zonas o predios. Este enfoque utiliza información de los registros operacionales del sistema tales como: medidores instalados en la salida de producción o tanques, en la entrada de zonas de presión o Distritos de Medición, y contadores de grandes consumidores o abonados industriales (Savic y Banyard, 2011). Walski et al (2007) proponen los enfoques 'TOP-DOWN' y 'BOTTON-UP'; que utilizan el concepto de balance de masa y permiten

realizar una distribución espacial de los consumos cuando se dispone de los registros de consumo o de volumen producido; pero no se dispone de información relativa a su ubicación. El método 'Top-Down' distribuye entre los nudos del modelo la diferencia entre el volumen conocido de producción y el volumen registrado por los contadores de los grandes consumidores. El método 'Botton-Up' utiliza los registros del volumen consumido (o del volumen facturado) y un criterio de reparto zonal para realizar la asignación del consumo a los nudos del modelo. Estos dos enfoques son muy similares a los métodos de 'estimación del consumo' y del 'consumo real' propuestos por Cesario (1995).

Otros métodos alternativos para la asignación de consumos son revisados por Martínez (2002), entre los que se menciona la asignación de consumos unitarios por calle (García-Serra, 1984), asignación por derivaciones de líneas y nudos (López Patiño, 1994), y asignación por mallas del modelo (Martínez Solano, 1994). Todas ellas utilizadas como alternativa cuando no se dispone de un SIG para apoyar la tarea de asignación de demanda.

Para determinar la variación temporal de las demanda base asignada a los nudos del modelo es necesario definir una curva de modulación, usualmente horaria, que represente el ratio entre el consumo instantáneo en cada hora y la demanda base. En función del propósito del modelo y del detalle de la información disponible es posible determinar una curva que represente a todos los consumos, o una curva para cada categoría de uso (Mays, 2000). El cálculo de los factores de demanda se realiza a partir del balance de masa para una zona discreta de la red de distribución; a partir de los registros de caudal inyectado, caudal bombeado; junto con el caudal de entrada y salida, y volumen almacenado en depósitos (Larado, 2012).

2.2.2 Asignación de las demandas dependientes de la presión: Fugas

La asignación de las demandas dependientes de la presión en los nudos del modelo hidráulico consiste en la declaración de los valores correspondientes a los parámetros físicos que determinan el comportamiento de las fugas en la red de distribución; por lo que resulta necesario primero entender la hidráulica asociada a éstas, antes de revisar los distintos enfoques para la modelación de fugas existentes en la literatura disponible.

2.2.2.1 Hidráulica de fugas

Si las pérdidas de carga en el terreno alrededor de una tubería son ignoradas, una fuga en dicha tubería será hidráulicamente equivalente a un orificio de salida en un tanque, por lo que su comportamiento estará basado en la ecuación de Torricelli (Van Zyl y Clayton, 2007). Esta ecuación (Ec. 1) describe la relación entre el caudal de fuga y la presión en el punto de salida del tanque, y considera el concepto de coeficiente de descarga C_d para representar la reducción del área efectiva del orificio debido a la contracción del chorro del fluido aguas abajo del orificio y las pérdidas de energía por fricción.

$$Q = C_d A (2gH)^{0.5} \quad (1)$$

donde Q es el caudal de fuga a través del orificio, C_d es el coeficiente de descarga del orificio, A es la sección transversal del orificio, g la aceleración debida a la gravedad, y H la pérdida de carga entre los puntos ubicados aguas arriba y aguas abajo del punto de descarga. Esta ecuación asume que tanto el valor del coeficiente de descarga como la sección transversal se mantienen constantes.

Sin embargo, la simulación de las fugas es mucho más compleja que un simple caudal fluyendo a través de un orificio. La validez de los términos incluidos en la ecuación del flujo a través de un orificio para representar las fugas en una red de distribución está limitada por factores como: el tipo de flujo (determinado por el número de Reynolds), las propiedades mecánicas de la tubería, las propiedades hidráulicas del terreno alrededor de la tubería, y las demandas (Van Zyl y Clayton, 2007). Walski et al (2006) determinan que el tipo y tamaño del orificio tienen mayor influencia sobre el caudal de fuga que la porosidad media del terreno circundante. Van Zyl y Clayton (2007) concluyen que el comportamiento del material es el factor más importante para determinar valores de exponentes de fuga distintos al valor teórico. Bennis (2011) resalta que si bien es cierto que un orificio de fuga puede ser aproximado a una sección circular, en la realidad su sección es irregular, o corresponderá a una fisura longitudinal o transversal, e inclusive variará en función de la presión. Wu et al (2011) afirma que es incorrecto asumir que el coeficiente de descarga de un orificio es constante para una fuga, y considera más adecuado afirmar que su valor depende del número de Reynolds; el cual determina su régimen de flujo. May (1994) afirma que “al igual que la velocidad de flujo está función de la presión, tal vez el área del orificio de fuga varía con la presión en algunas situaciones”. Con esta hipótesis se trata de explicar la variabilidad de los resultados de pruebas de campo realizadas para obtener el valor del exponente de fuga, y es la base de la teoría para trayectos de descarga de área fija y variable conocida como FAVAD (Fix And Variable Area Discharge). Es así que una red con fugas predominantemente de agujeros de superficie fija (por ejemplo, orificios de corrosión en las tuberías de metal) tendría exponentes de fuga cercanos a 0.5. En las redes donde los agujeros varían en tamaño proporcionalmente con la presión (por ejemplo, fisuras en tubos de plástico) el exponente se aproximaría a 1,5; lo que implica que el área varía con exponente de 1.0 y la velocidad varía con exponente 0.5. Los valores superiores a 1.5 se explican por la existencia de trayectorias de fuga que aumentan de tamaño en dos direcciones, con un exponente de 2.0 (UKWIR, 2011). Es así que varios autores proponen la Ec. 2 para representar la hidráulica de fugas, y que permite analizar diferentes tipos de fugas utilizando valores de exponente de fugas distintos del valor teórico. Donde Q_{fuga} es el caudal de fuga, K es el coeficiente emisor de la fuga, P es la presión, N es el exponente de fugas.

$$Q_{fuga} = KP^N \quad (2)$$

Respecto al valor del exponente de fugas, la literatura revisada no coincide en fijar un valor único. Es así que se han realizado ensayos experimentales tanto en laboratorio como en campo para obtener tratar de comprobar la validez de su valor teórico 0.5 o en su defecto determinar un valor distinto según lo supuesto en la teoría FAVAD. Hikki (1981) obtiene experimentalmente exponentes de fuga entre 0.36 y 0.70 para orificios entre 1 y 5 mm perforados en tuberías metálicas entre 60 y 180 mm. Las tuberías ensayadas son enterradas en arena o sumergidas en agua. El valor promedio de los ensayos es cercano a 0.5. Ashcroft y Taylor (1983) realizan ensayos en tuberías polietileno de 22mm de diámetro. Obtienen exponentes entre 1.39 y 1.72 para cortes longitudinales de 10 mm de largo; y entre 1.23 y 1.97 para cortes longitudinales de 20 mm de largo. El valor promedio de los ensayos es de 1.52. Idelchik (1994) se basa en resultados experimentales para limitar la validez del exponente teórico de fugas a flujos en régimen turbulento. En flujo laminar, con números de Reynolds menores a 10, la relación entre el caudal de descarga y la presión es lineal. UKWIR (1996) presenta los resultados obtenidos de ensayos en laboratorio con tramos de acometidas defectuosas retiradas de servicio. Y obtienen repetidamente valores cercanos a 0.5 para las tuberías metálicas (hierro galvanizado, cobre y plomo), y 1.5 para los casos de tuberías metálicas. Walski et al (2009) realiza ensayos en tuberías plásticas entre 25 y 150 mm de diámetro, simulando fugas a través orificios circulares, y fisuras tanto longitudinales como transversales. El valor medio obtenido para el exponente de fugas es de 0.58, para un rango de valores entre 0.47 y 0.76. Greyvenstein y Van Zyl (2007) realizan ensayos en laboratorio utilizando tuberías averiadas de acero, asbesto cemento y PVC, recuperadas de la red de Johannesburgo. Los resultados obtenidos para el exponente de fugas están entre 0.40 y 2.30. Los mecanismos de fallas ensayados incluyeron orificios circulares (0.52 – 0.53), fallas longitudinales en PVC (1.38 – 1.85), fallas longitudinales en asbesto cemento (0.79 – 1.04), roturas transversales (0.41 – 0.53), y corrosión (0.67 – 2.3). Bennis (2011) realiza ensayos en tuberías de acero y PVC con orificios circulares perforados entre 1.6 y 2.8 mm de diámetro. En todos los casos obtiene valores cercanos a 0.5 para el exponente de fugas. Cassa et al (2010) y Cassa y Van Zyl (2011) realizan una análisis con elementos finitos y proponen una expresión (Ec. 3) que considera la deformación elástica de la sección de fuga en función de la presión, independientemente del diámetro o material de la tubería. Comparan la similitud de la ecuación (3) con la propuesta de May (1994), y afirman que ésta no diferencia entre fugas de sección fija o variable, sino que considera que todas los tipos de fuga tendrán sección variable.

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad (3)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, g la aceleración debida a la gravedad, A_0 es el área inicial de fuga a presión cero, h es la presión, m es la pendiente del gráfico área vs. presión obtenida en los ensayos de deformación elástica de la sección de fuga.

2.2.2.2 Modelación de fugas

Con la finalidad de tener en cuenta la sensibilidad de las fugas a la variación de la presión, las fugas deben ser tratadas como una demanda dependiente de la presión, tal como se ha descrito en el apartado anterior. El enfoque más simple para modelar las fugas en un modelo hidráulico consiste en utilizar la Ec. 4 de emisores de flujo. Esta ecuación, incluida en la librería EPANET y cualquier programa comercial que utilice su algoritmo de cálculo, permite simular el flujo de salida a través de una tobera u orificio descargando a la atmósfera; por lo que también pueden emplearse para simular una fuga en una tubería conectada a un nudo (Martínez, 2000).

$$q_{F,j} = K_j(P_j)^N \quad (4)$$

donde $q_{F,j}$ es el caudal de fuga en el nudo j , K_j es el coeficiente emisor en el nudo j y que depende del tamaño y de la forma del orificio de fuga, P_j es la presión en el nudo j , N es el exponente de fugas.

Varios autores han propuesto variaciones y mejoras a la Ec. 4. Germanopoulos (1985) y Germanopoulos y Jowitt (1989) suponen que las fugas se distribuyen uniformemente a lo largo de la tubería, y proponen la Ec. 5 para modelar las fugas de fondo existentes en una red de distribución.

$$q_{F,ij} = \beta_L L_{ij} (\bar{P}_{ij})^N \quad (5)$$

$$\bar{P}_{ij} = \frac{P_i + P_j}{2} \quad (6)$$

donde β_L es el coeficiente de fuga expresado por unidad de longitud (en función de la edad y estado estructural de la tubería). L_{ij} es la longitud de la tubería, N es el exponente de fuga para el cual Germanopoulos sugiere un valor de 1.18 basado en mediciones estudios de campo realizados en el Reino Unido, \bar{P}_{ij} es la presión promedio en la tubería, calculada con la Ec. 6.

Vela et al (1994) suponen que el caudal perdido por fugas en una red de distribución es proporcional al número de roturas en las tuberías de la red, y puede ser representado entre los nudos de la red a través de un reparto estadístico y registros históricos. Por lo tanto para un sector compuesto por tuberías de similar material y edad, el caudal de fugas estará expresada mediante la Ec. 7.

$$q_{F,ij} = c^s L_{ij} (D_{ij})^d e^{a\tau} (\bar{P}_{ij})^N \quad (7)$$

donde c^s es un coeficiente global que depende del material, tipo y calidad de las tuberías incluidas en el sector s , L_{ij} es la longitud de la tubería, D_{ij} es el diámetro de la tubería, d es un exponente que toma valores de 1 para diámetros pequeños (< 125 mm) y -1 para diámetros grandes, a es un parámetro que ajusta temporal de los defectos, τ es la edad de

las tuberías incluidas en el sector s , \bar{P}_{ij} es la presión promedio a lo largo de la tubería, N es el exponente de fugas (los autores consideran 1.18).

Tucciarelli et al (1999) proponen la Ec. 8 para una red de distribución dividida en zonas con tuberías de similar condición estructural. Esta ecuación supone que en cada zona hay un área de filtración constante por unidad de área en la superficie de las tuberías, de acuerdo con la idea de que el efecto del envejecimiento es uniforme en todas las tuberías.

$$q_i = (H_i + z_i)^N \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (8)$$

donde q_i es el volumen de agua perdida por unidad de tiempo asociado a las fugas pequeñas próximas al nudo i , H_i es la altura piezométrica en el nudo i , z_i es la elevación topográfica en el nudo i , M_i es el número total de tuberías conectadas al nudo i , N es el exponente de fugas, L_{ij} es la longitud de la tubería, D_{ij} es el diámetro de la tubería, y θ_{ij} es el área de fuga por unidad de área en la superficie de la tubería conectada a los nudos i y j .

Giustolisi et al (2008) proponen la Ec. 9 para considerar por separado las fugas de fondo y las roturas a lo largo de la tubería. Y utiliza la ecuación para emisores de flujo con el exponente de fugas teórico (0.5) para las roturas, y la expresión propuesta por Germanopoulos (1985) para las fugas de fondo.

$$q_{F,ij} = \beta_L L_{ij} (\bar{P}_{ij})^N + C_L (\bar{P}_{ij})^{0.5} \quad (9)$$

donde C_L es el coeficiente emisor correspondiente a la suma de los coeficientes de las roturas existentes a lo largo del tubo. Así también existen varias propuestas enfocadas en la estimación del emisor K , para garantizar una adecuada asignación de las fugas en los nudos del modelo hidráulico.

El enfoque más simple consiste en asumir el mismo coeficiente emisor para todos los nudos del modelo (Ec 10). Este enfoque no considera las características físicas de la red de distribución, tales como la longitud o la condición estructural de las tuberías, el número de conexiones de servicio (Wu et al, 2011).

$$Q_F = K \sum_{i=1}^{ND} (P_i)^n \quad (10)$$

Donde Q_F es el caudal de fugas en la red de distribución, K es el coeficiente emisor global, ND es el número de nudos de demanda del modelo, P_i es la presión en el nudo i , n es el exponente de fugas.

Burrows et al (2003) suponen que, para zonas urbanas densamente pobladas, es en las acometidas domiciliarias donde se da el mayor volumen de fugas en la red de distribución. Y

propone la Ec. 11 para la asignación de fugas en función del número de conexiones (acometidas) asociadas a cada nudo, utilizando el caudal de fugas estimado para el instante de caudal mínimo nocturno, y un coeficiente global de fuga por conexión y por unidad de presión.

$$Q_{F,CMN} = C_u \left[\sum_{i=1}^{NJ} Nc_i (P_i)^N \right] \quad (11)$$

donde $Q_{F,CMN}$ es el caudal de fuga para el instante de caudal mínimo nocturno (CMN), C_u es el caudal de fuga por conexión domiciliaria a 1 mca de presión, Nc_i es el número de conexiones domiciliarias asociadas al nudo i , N es el exponente de fugas, NJ es el número total de nudos de demanda en el modelo hidráulico.

Araujo et al (2003) consideran más apropiado utilizar la longitud de tuberías conectadas a cada nudo como parámetro para la asignación de fugas. El método supone que el 80% del caudal mínimo nocturno son fugas, y utiliza la Ec. 12 junto con un algoritmo genético para determinar el valor del coeficiente global de fuga C , que será dependiente de la presión en cada instante t de la simulación. La asignación de las fugas a cada nudo de demanda se realiza a través de un coeficiente emisor individual, calculado con la Ec. 13, y que está en función de la longitud de las tuberías conectadas a cada nudo.

$$Q_{F,CMN} = \sum_{i=1}^{NJ} q_{F,CMN,i} = \sum_{i=1}^{NJ} \left(P_{i,CMN}^{1.18} C \sum_{j=1}^M 0.5L_{ji} \right) = 0.8Q_{T,t_{cmn}} \quad (12)$$

$$K_{f,i} = C \sum_{j=1}^M 0.5L_{ji} \quad (13)$$

En la ecuación 12 $Q_{F,CMN}$ es el caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno (CMN), C es el coeficiente global de fugas, NJ es el número total de nudos de demanda en el modelo hidráulico, $q_{F,CMN,i}$ es el caudal de fuga en el nudo i para el instante de CMN, P_i es la presión en el nudo i para el instante de CMN, M es el número de tuberías conectadas al nudo i , L_{ji} es la longitud de la tubería j conectada al nudo i . En la ecuación 13 $K_{f,i}$ es el coeficiente emisor del nudo i para todo instante t .

Almandoz et al (2003) proponen asignar las fugas en el modelo utilizando un coeficiente emisor global, ajustado a cada nudo mediante un factor de ponderación de la longitud ponderada de las tuberías conectadas al nudo respecto a la longitud total de la red de distribución.

$$Q_F = K \sum_{i=1}^{NJ} \bar{L}_i (P_i)^n \quad (14)$$

$$\bar{L}_i = \frac{L_i}{L_T} \quad (15)$$

En la ecuación 14 Q_F es el caudal de fugas, K es el coeficiente global de fugas, \bar{L}_i es el factor de ponderación de longitud para el nudo i , P_i es la presión en el nudo i , n es el exponente de fugas, NJ es el número total de nudos en el modelo. En la ecuación 15 L_i es el 50% de la longitud de las tuberías conectadas al nudo i , L_T es la longitud total de tuberías en el modelo.

Tabesh et al (2009) proponen un coeficiente global de fugas calculado a partir de la Ec. 17, y que utiliza el valor del caudal de fugas estimado en el instante de caudal mínimo nocturno a partir de la Ec. 16. La asignación de las fugas en cada nudo se realiza utilizando la Ec. 18, basada en la ecuación de emisores definida en EPANET (Rossman, 2000)

$$Q_{F,CMN} = Q_{CMN} - Q_{uso_noct} \quad (16)$$

$$C_F = \frac{Q_{F,CMN}}{\sum_{i=1}^{NJ} \left(\sum_{j=1}^{NP} \frac{L_{ij}}{2} P_{i,CMN}^N \right)} \quad (17)$$

$$Q_{F,i} = \sum_{j=1}^{NP} \frac{L_{ij}}{2} C_L P_i^N \quad (18)$$

donde $Q_{F,CMN}$ es el caudal de fugas en el instante de caudal mínimo nocturno (CMN), Q_{CMN} es el caudal mínimo nocturno inyectado a la red de distribución, Q_{uso_noct} es el caudal asociado a usos legítimos durante el instante de CMN, C_F es el coeficiente global de fugas, NJ es el número total de nudos en el modelo, NP es el número de tuberías conectadas el nudo i , L_{ij} es la longitud de la tubería j conectada al nudo i , $P_{i,CMN}$ es la presión en el nudo i en el instante de CMN, N es el exponente de fugas, $Q_{F,i}$ es el caudal de fugas en el nudo i para todo instante t , P_i es la presión en el nudo i para todo instante t .

2.3 Calibración de modelos hidráulicos

Según Shamir y Howard (1977) “la calibración consiste en determinar las características físicas y operacionales de un sistema existente, que ingresados como datos al modelo computacional permitan obtener resultados realistas”. Walski (1983a) define la calibración como un proceso de dos pasos que consisten en: (1) comparar las presiones y caudales simulados con aquellos observados (medidos) para unas condiciones de operación conocidas, y (2) ajustar los datos de entrada al modelo de tal forma que exista concordancia entre los valores simulados y observados. En un trabajo posterior Walski (1986) enuncia que “un modelo se considera calibrado en la medida en que éste puede predecir el comportamiento del sistema de distribución de agua en una amplia gama de condiciones de funcionamiento y consumo”.

En los trabajos de Ormsbee y Wood (1986) y Ormsbee (1989) se describe el proceso de calibración como: “un proceso de ensayo y error en el que las cargas de la demanda o las rugosidades de las tuberías se ajustan hasta que las presiones y/o caudales observados y

simulados se acerquen razonablemente para los diferentes niveles y escenarios de demanda, bombeo, y almacenamiento”. Boulos y Ormsbee (1990) consideran que el proceso de calibración de un modelo involucra el ajuste de las condiciones de frontera y de los valores de parámetros hidráulicos (rugosidad de tuberías y demanda en nudos) hasta que los resultados del modelo coincidan con los datos observados (caudal y presión). Para Lansey y Basnet (1991) la calibración del modelo consiste en determinar los valores de los parámetros de la red con los cuales los valores observados de las variables de estado coincidan con los generados por el modelo de simulación de la red; para una gama de condiciones de carga y un nivel de confianza deseado.

La AWWA (AWWA, 2013; Larado, 2012) afirma que la calibración consiste en comparar los resultados del modelo con mediciones obtenidos en campo, realizando ajustes al modelo y la revisión de los datos de campo hasta alcanzar la concordancia entre ambos. Esta definición se puede complementar con lo manifestado por el Comité de Aplicaciones Computacionales de Ingeniería de la AWWA (ECAC-AWWA, 1999), la cual afirma que la calibración no sólo involucra el ajuste de los coeficientes de rugosidad de tuberías y la demanda en nudos; y extiende esta tarea a cualquier factor que deba ser ajustado hasta alcanzar la concordancia entre los datos medidos y los simulados.

En definitiva, la calibración de modelos hidráulicos puede definirse como el proceso de ajuste de los parámetros que definen el comportamiento hidráulico del modelo, para reflejar con la mayor precisión posible el funcionamiento real de la red de distribución, tanto para el escenario estático como dinámico.

2.3.1 Fuentes de error en los modelos hidráulicos

Resulta poco probable que los resultados del modelo y los datos medidos en campo coincidan perfectamente, principalmente debido simplificaciones, aproximaciones, supuestos, imprecisiones y errores en los datos vinculados a la construcción y carga del modelo. Ejemplos de los factores antes mencionados pueden ser: la variabilidad inherente a la red de distribución, no inclusión de las pérdidas menores, no considerar la variabilidad estacional del consumo, uso del diámetro nominal en lugar del diámetro interno de las tuberías, redondeo de los valores de cota, errores de conectividad entre tuberías, desconocimiento de válvulas cerradas, inexactitud de medida de sensores, o manejo incorrecto de los datos medidos (AWWA, 2013).

Según Walski (1983a) las dos principales fuentes de error en los análisis de simulación de deben a estimaciones incorrectas de uso del agua y de la capacidad de carga de la tubería; siendo la importancia de cada factor variable en función de las características particulares del sistema de red analizado. Walski (1983b) afirma que si la calibración del modelo no es satisfactoria, existe la posibilidad de que existan aberraciones locales tales como válvulas de frontera con otros sectores de la red que estén abiertas.

Ormsbee y Lingireddy (1997), el Comité de Aplicaciones Computacionales de Ingeniería de la AWWA (1999), y Walski et al (2007) proponen varias fuentes de error que pueden contribuir a las discrepancias entre los valores observados en campo y simulados por el modelo tales como errores en los datos de entrada, definición de las características físicas de las tuberías, errores en la asignación de la demanda, errores en la geometría y topología de la red, errores en la definición de las condiciones de frontera, el nivel de esqueletización del modelo, errores en las curvas características de bombas, o errores de precisión en los equipos de medición. Walski (1990) hace una reseña de varios errores de este tipo que fueron identificados en el modelo hidráulico de la ciudad de Austin (Texas); y que fueron corregidos luego de cuestionar la validez de los resultados del proceso de calibración del modelo, analizar minuciosamente los ajustes requeridos durante la calibración, y realizar comprobaciones en campo.

Los *errores en los datos de entrada* del modelo pueden ser atribuidos a errores de medición y errores en el ingreso de datos. Los errores de medición están relacionados con la imprecisión de los equipos de medición; y el segundo tipo de error, con errores humanos durante la digitación de la información. La precisión del modelo hidráulico depende de la precisión de los datos utilizados (Cesario y Lee, 1980).

Los errores en los modelos hidráulicos relacionados con las *características físicas de las tuberías* son resultado de la práctica de utilizar el diámetro nominal de las tuberías en reemplazo de su diámetro interno, debido principalmente a la complicación de determinar con exactitud su valor para todas las tuberías incluidas en el modelo. Adicionalmente, durante el proceso de calibración se varía únicamente el coeficiente de rugosidad de las tuberías y se mantiene constante el diámetro de éstas, desconociendo la variación del diámetro interno a lo largo del tiempo como resultado de la corrosión y el depósito de sedimentos. Estas simplificaciones del problema acumulan errores que afectan significativamente los resultados del modelo hidráulico, y pueden generar errores en otros parámetros hidráulicos y de calidad (Filion, 2003).

Los errores relacionados con la *asignación de la demanda* se deben a las aproximaciones y simplificaciones realizadas durante la fase de construcción del modelo hidráulico para determinar su distribución espacial y variación temporal. Para representar los consumos en el modelo hidráulico se asume que éstos no ocurren a lo largo de las tuberías sino en los nudos. Walski (1983b) afirma que asignar la demanda a los nudos del modelo es una tarea laboriosa pero necesaria, sujeta a un error considerable. Al error originado por esta aproximación se le debe adicionar el error asociado al método utilizado para realizar la carga hidráulica del modelo; el cual está relacionado con el nivel de detalle de la información comercial disponible. La aproximación más simple reparte la demanda equitativamente a cada nudo del modelo, sin distinguir categorías según su uso ni el área de influencia de cada nudo. Por otro lado el cálculo de la demanda puede realizarse mediante la revisión de los registros históricos del consumo, y cálculos de balances de masa para la red de distribución.

Por lo que a pesar de disponer de la información necesaria para realizar una aproximación espacial más precisa de la demanda, puede existir un error asociado a los valores utilizados o al método para estimar el valor de ésta (AWWA, 1999; Mays, 2000; Filion, 2003). Adicionalmente se deben tener en cuenta los posibles errores al asignar la demanda de un gran consumidor, o asignar erróneamente consumos en zonas próximas a la frontera entre zonas de presión o distribución (Walski et al, 2007).

Takahashi et al (2008) afirma que “es común que la empresa gestora del abastecimiento no tenga conocimiento preciso de la conformación de la red de distribución, y que no se tengan planos y/o registros completos de la topografía, topología y demás características físicas de la red. Es así que existirán *errores en la geometría y topología de la red* relacionados con errores en la localización espacial y la conectividad de los elementos de la red, o errores cometidos al determinar la elevación de nudos o de los equipos de medición de presión. Según Walski et al (2007) resulta posible identificar este tipo de error en aquellos casos en los que se requiere asignar a los parámetros de calibración valores poco realistas para lograr calibrar el modelo hidráulico. Sin embargo se requiere especial atención al obtener información desde archivos CAD o sistemas de información geográfica, siendo necesario también actualizar las bases de datos con información proveniente de las áreas de mantenimiento y obras.

El nivel de esqueletización del modelo hidráulico depende del uso que éste tendrá. La esqueletización de un modelo consiste en la simplificación de la red de distribución, con el objetivo de reducir su tamaño y complejidad; para lo cual se excluyen del modelo los accesorios, las tuberías de pequeño diámetro y/o aquellas que se considera que no influyen significativamente en la hidráulica de la red (AWWA-ECAC, 1999). Walski et al (2007) apunta que un modelo hidráulico esqueletizado debe proporcionar una representación simplificada pero precisa del sistema, Una excesiva esqueletización tiene un efecto negativo en la precisión del modelo, que sólo es apreciable durante el proceso de calibración del modelo. Filion (2003) afirma que un modelo excesivamente esqueletizado puede presentar presiones simuladas inferiores a las medidas, debido principalmente a la disminución de la capacidad hidráulica del modelo respecto a la red de distribución (Walski, 1990); o en otros casos ajustar los coeficientes de pérdidas de las tuberías en valores inferiores a los correctos.

Al momento de construir o actualizar un modelo hidráulico es posible cometer errores al definir el estado de los elementos de la red asociados a las *condiciones de frontera*; tales como puntos de presión conocida, tanques elevados, setting de válvulas reguladoras de presión, límites de las zonas de presión, medición o distribución. Adicionalmente, se puede incluir en este tipo de fuente de error aquellos problemas relacionados con la sincronización temporal de las lecturas realizadas en campo y los valores simulados para el caudal y/o presiones (AWWA-ECAC, 1999; Walski et al, 2007).

2.3.2 Procedimiento general para la calibración de modelos hidráulicos

Walski (1990) reconoce que “se tiende a pensar que la calibración de modelos hidráulicos de redes de distribución es un proceso lógico sencillo; que involucra determinar aquello que está mal en el modelo, y corregir los errores que harán que el modelo funcione adecuadamente. Sin embargo, las mejores herramientas para la calibración de modelos pueden consistir en realizar un trabajo de detective, tener intuición y una pizca de suerte”; pues son muchos los factores que pueden influir para que el modelo no tenga la precisión deseada, siendo necesario realizar grandes esfuerzos de trabajo y tiempo para determinar el problema con un nivel de confianza adecuado.

Resulta improbable que el problema de calibración de modelos hidráulicos sea resuelto utilizando un procedimiento analítico simple o una técnica de optimización; sin embargo, existen consideraciones generales que pueden ayudar a su aproximación. Ormsbee (1989), Ormsbee y Lingireddy (1997) proponen el siguiente procedimiento general de siete pasos al momento de abordar un proceso de calibración (Savic et al, 2009; Christi et al, 2011):

- Identificar el propósito del modelo.
- Determinar el valor inicial de los parámetros a estimar.
- Recolectar datos de calibración.
- Evaluar los resultados del modelo.
- Realizar una calibración a nivel macro.
- Realizar un análisis de sensibilidad.
- Realizar una calibración a nivel micro.

El *propósito del modelo hidráulico* está asociado con el tipo de análisis hidráulico requerido, ya sea simulación en régimen estacionario o simulación período extendido (EPS). Este criterio proporciona una guía de los requerimientos referentes al nivel de detalle del modelo, tipo y calidad de los datos de campo a ser recolectados, y de la tolerancia que debe tener el error entre los datos observados y simulados (Ormsbee y Lingireddy, 1997; Walski et al, 2007). Por otro lado, Walski (1995, 2003) identifica cinco posibles aplicaciones para las cuales puede construirse un modelo: planes maestros, estudios de protección contra incendios, estudios de calidad del agua, estudios de eficiencia energética, y operación de la red (Christie et al, 2011). Un modelo a ser utilizado para estudios de la calidad del agua, que requiere simulaciones en período extendido; exige un mayor nivel de calibración que aquellos modelos enfocados en estudios de planes maestros, ejecutados en régimen estacionario (Larado, 2012).

Los *valores iniciales de los parámetros* a estimar corresponden a aquellos parámetros básicos del modelo, como lo son los coeficientes de rugosidad de las tuberías, la demanda asignada en cada nudo (Ormsbee y Lingireddy, 1997) y su correspondiente factor de modulación para el caso de las simulaciones en período extendido. Los coeficientes de rugosidad iniciales pueden estimarse mediante pruebas de campo o utilizando los valores

propuestos por fabricantes o investigadores, los cuales usualmente son tabulados en función del material, diámetro y edad de las tuberías. Debido a que las condiciones de operación, la composición química del agua circulante y el envejecimiento de las tuberías pueden afectar significativamente la rugosidad de éstas; se considera que los valores propuestos en la literatura técnica solo pueden ser útiles para las tuberías nuevas. Walski et al (2007) propone pruebas de campo para estimar los coeficientes de rugosidad de la una tubería, mediante la medición de las pérdidas de carga y la descarga en hidrantes.

La *recolección de los datos de calibración* proporciona información que permite evaluar los resultados preliminares del modelo hidráulico, éstos últimos obtenidos a partir de simulaciones que utilicen las estimaciones iniciales de los parámetros básicos de la red. Los datos de calibración pueden ser recolectados mediante:

- i) pruebas de campo realizadas en hidrantes para obtener datos de caudal y presión, requeridas para calibrar modelos de análisis en régimen estacionario (Mays, 2000)
- ii) ii) datos de telemetría (SCADA) correspondientes a series de tiempo para caudales, presiones, y niveles de tanques; necesarias para calibrar modelos de análisis en período extendido (Walski et al, 2007)
- iii) iii) datos referentes a pruebas con trazadores químicos conservativos o no conservativos, utilizados determinar el tiempo de viaje entre dos puntos de la red de distribución (Ormsbee y Ligureddy, 1997). Mays (2000) sugiere que para los análisis en período extendido se debe disponer datos de calibración para períodos de tiempo entre 24 horas y 7 días. Y en caso de no disponer de datos de telemetría se deben instalar provisionalmente equipos de medición de caudal, presión o sensores de niveles en tanques.

La *evaluación de los resultados* de la simulación permite valorar la precisión del modelo hidráulico, comparando los resultados de éste y las mediciones realizadas en campo. Los criterios comúnmente utilizados para llevar a cabo esta tarea están relacionados con la valoración de la diferencia absoluta de la presión, y más comúnmente, en la diferencia relativa de la presión; obtenida como el ratio entre la diferencia absoluta de la presión y la diferencia absoluta promedio para toda la red (Mays, 2000).

Walski (1983b) afirma que es posible alcanzar una precisión del modelo de ± 5 psi (± 3.5 m) a través del uso de 'buenos' datos de calibración. Debido a la importancia de los datos de calibración en el proceso de evaluación del modelo, se debe asegurar la calidad de los datos recolectados para este propósito. Walski (2000) realiza una clasificación cualitativa de la calidad de los datos, y propone 3 tipos: 'buenos' (good data), 'malos' (bad data) e 'inútiles' (useless data). Los datos pueden ser clasificados como 'buenos' si éstos registran una pérdida de carga significativa. Los datos serán 'malos' si contienen errores vinculados al equipo de medición de presión, causados por errores de lectura, determinación incorrecta de la cota de instalación del equipo, o lagunas de información en las condiciones de frontera

durante la captura de datos. Los datos ‘inútiles’ corresponden a aquellas mediciones de presión vinculadas a velocidades bajas o pérdidas de carga de similar magnitud que el error esperado en los equipos de medición (Walski et al, 2007).

Es necesario mencionar que el Water Research Center del Reino Unido propone un procedimiento general para la construcción de un modelo, en el cual se incluyen aspectos relevantes para la calibración del modelo: (1) revisión de los registros y planos de la red de distribución y abonados, (2) inspección en campo de los equipos, (3) realizar mediciones de campo preliminares, (4) ejecución de mediciones de campo, (5) ingreso de los datos en el modelo, (6) calibración del modelo (Savic y Walters, 1995).

La identificación, minimización o eliminación de los errores que provocan las discrepancias entre los valores simulados y observados requieren de la aplicación iterativa de los procesos conocidos como macro-calibración, micro-calibración y análisis de sensibilidad. Cada uno de estos procesos es descrito a continuación.

La *macro-calibración* (o calibración preliminar) se enfoca en la calibración de toda la red de distribución, o zonas de presión de ésta; y consiste en identificar y corregir las fuentes de error que ocasionan las diferencias más significativas entre los resultados del modelo y las mediciones realizadas en campo (Larado, 2012). Ormsbee y Lingireddy (1997; Mays, 2000) proponen un conjunto de fuentes de error causantes de las diferencias más importantes entre los datos simulados y medidos, que pueden ser detectados durante la macro-calibración:

- Errores en parámetros (rugosidad de tuberías y demanda en nudos).
- Errores en datos físicos de la red (diámetro, longitud).
- Errores topológicos.
- Errores al delimitar las zonas de presión
- Errores en condiciones de frontera.
- Errores en registros históricos de datos
- Errores debidos a problemas de calibración de los equipos de medición.
- Errores de lectura y registro de datos.

Por otro lado Walski (1990) relaciona los posibles errores con válvulas total o parcialmente cerradas, errores de precisión en datos de telemetría, errores en las curvas definidas para el funcionamiento de bombas, diámetro y/o longitud de tuberías, errores topológicos, errores de sectorización en el modelo.

El *análisis de sensibilidad* consiste en variar los parámetros del modelo, cuantificar el efecto sobre los resultados de la simulación asociado a cada una de estas variaciones, e identificar aquellos parámetros que generan mayor impacto en los resultados de la simulación.

La *micro-calibración* se enfoca en analizar la precisión del modelo en un área en particular, verificando que en ésta se cumplan las condiciones locales requeridas. Los parámetros a ajustar “finamente” en esta fase son usualmente los coeficientes de rugosidad de tuberías y las demandas en nudos; tarea para la cual se utiliza la información obtenida durante pruebas en hidrantes (régimen estacionario) y datos de telemetría (análisis en EPS), respectivamente. (Mays, 2000; Ormsbee y Lingireddy, 1997; Larado, 2012).

2.3.3 Criterios para evaluar la calibración de modelos hidráulicos

Los primeros criterios para valorar la calibración de un modelo hidráulico corresponden a los propuestos en los trabajos de Walski, Cesario y Lee, Harris, Boluos y Ormsbee. Walski (1983b) afirma que un modelo hidráulico calibrado debe ser capaz de simular presiones y alturas piezométricas con una precisión de ± 5 psi (± 3.5 m) y ± 12 pies (± 3.7 m), respectivamente. Cesario y Lee (1984) mencionan que los modelos hidráulicos deben ser calibrados con una precisión entre 5 psi (± 3.5 m) y 10 psi (± 7.0 m) en los nudos. Harris (1984) manifiesta que las presiones simuladas en el modelo deben tener una precisión de ± 5 psi (± 3.5 m) para que el modelo hidráulico sea considerado adecuadamente calibrado. Boulous y Ormsbee (1991) consideran que los resultados del modelo deben tener una precisión del $\pm 5\%$ respecto a los valores medidos. Por otro lado, Cabrera et al (1995) afirma que las tolerancias de calibración deben establecerse siempre en términos del sistema particular que va a ser analizado.

En 1989 la Water Authorities Association & Water Research Centre del Reino Unido, publicaron el documento “Network Analysis: A Code of Practice” (WAA y WRC, 1989). Este propuso criterios prácticos para la tolerancia de los valores simulados luego de la calibración del modelo en régimen estacionario (Tabla 1). Para simulaciones en período extendido se debe considerar adicionalmente que la diferencia volumétrica en los depósitos debe ser $\pm 5\%$, considerando ésta como la diferencia entre los valores medidos y simulados para dos períodos consecutivos (Walski et al, 2007).

Tabla 1 Criterios prácticos para calibración de modelos según Water Authorities Association

Criterios de caudal
(1) Precisión de $\pm 5\%$ respecto a los caudales medidos para caudales $> 10\%$ de la demanda total; tuberías de conducción, generalmente de diámetro mayor a 16 pulgadas (406 mm).
(2) Precisión de $\pm 10\%$ respecto a los caudales medidos para caudales $< 10\%$ de la demanda total; tuberías de distribución de diámetro generalmente menor de 12 pulgadas (305 mm).
Criterios de presión
(1) El 85% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 0.5 m o $\pm 5\%$ de la pérdida de carga registrada.
(2) El 95% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 0.75 m o $\pm 7.5\%$ de la pérdida de carga registrada.
(3) El 100% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 2 m o $\pm 15\%$ de la pérdida de carga registrada.

(Fuente: Edwards, 2006; Walski et al 2007; Larado, 2012)

La AWWA (AWWA-ECAC, 1999) sugiere un conjunto de criterios (Tabla 2) para definir el número de mediciones de presión y caudal en función del uso que tendrá el modelo hidráulico, el nivel de detalle requerido, el tipo de simulación a utilizar, y la precisión requerida de las mediciones. El cumplimiento de los valores propuestos por la ECAC para el número de mediciones de presión sugiere la instalación de numerosos equipos de medición en hidrantes durante las pruebas de campo. De igual forma, el cumplimiento de los valores propuestos para las mediciones de caudal es difícilmente alcanzable; debido principalmente a la falta de condiciones para monitorear el caudal en zonas de poca extensión en las redes de distribución de agua (Edwards, 2006).

Tabla 2 Criterios para la calibración de modelos sugeridos por el Comité de Aplicaciones Computacionales de Ingeniería de la American Water Works Association

Propósito del modelo	Nivel de detalle	Tipo de simulación	No. mediciones de presión (% de nudos)	Precisión en mediciones de presión	No. mediciones de caudal (% de tuberías)	Precisión mediciones de caudal (%)
Planificación	Bajo	Régimen estacionario o EPS	10	± 5 psi (3.5 mca) para el 100% de las mediciones	1	± 10
Diseño	Moderado - Alto	Régimen estacionario o EPS	2 – 5	± 2 psi (1.4 mca) para el 90% de las mediciones	3	± 5
Operación de la red	Bajo – Alto	Régimen estacionario o EPS	2 – 5	± 2 psi (1.4 mca) para el 90% de las mediciones	2	± 5
Calidad de agua	Alto	EPS	2	± 3 psi (2.1 mca) para el 70% de las mediciones	5	± 2

EPS = Simulación en Período Extendido (Extended Period Simulation)

(Fuente: AWWA-ECAC, 1999)

En 2006 la AWWA realiza un análisis comparativo de las prácticas utilizadas por empresas gestoras de abastecimiento en Estados Unidos y Canadá, y el Reino Unido. El informe concluye que no se disponía de directrices y criterios unificados para valorar la calibración de modelos hidráulicos, y se determina que los modelos hidráulicos analizados no cumplen los criterios propuestos por la AWWA ni el Water Research Centre. Adicionalmente se identifica la discrepancia que ocasiona tener criterios porcentuales. Por ello se sugiere adoptar como buenas prácticas la recolección de mediciones de campo y la calibración continua del modelo hidráulico, y garantizar la actualización de la red mediante una comunicación permanente con las áreas operativas y de obras del abastecimiento (Edwards, 2006).

Por otro lado, Walski et al (2007) proporciona una guía para valorar cuantitativamente la precisión de la calibración del modelo. Ésta establece tolerancias entre los valores simulados y medidos para el caudal, altura piezométrica y nivel de depósitos; en función del tamaño de

la red de distribución y el propósito del modelo hidráulico (Tabla 3). Estos criterios son afines a los criterios para calibración propuestos por la AWWA en su manual para Modelación de Sistemas de Distribución de Agua M32 (Larado, 2012).

Tabla 3 Criterios para valorar la calibración de modelos sugerido por Walski et al (2007)

Aplicación del modelo	Precisión requerida
Planificación, sistemas pequeños (tuberías menores a 600mm)	(1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registrada en los nudos de calibración durante condiciones normales de demanda y para pruebas de campo en hidrantes. (2) Fluctuación del nivel de depósitos entre $\pm 1.0\text{m}$ y $\pm 2.0\text{m}$ para EPS. (3) Diferencia de caudal entre 10% y 20% en puntos de inyección y bombeos
Planificación, sistemas grandes (tuberías mayores a 600mm)	(1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registrada en los nudos de calibración durante condiciones normales de demanda e instantes de velocidad máxima. (2) Fluctuación del nivel de depósitos entre $\pm 1.0\text{m}$ y $\pm 2.0\text{m}$ para EPS. (3) Diferencia de caudal entre 10% y 20% en puntos de inyección y bombeos.
Diseño	(1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registrada en el nudo extremo de la red durante el funcionamiento de hidrantes (escenario de incendio). (2) Fluctuaciones del nivel de depósitos entre $\pm 1.0\text{m}$ y $\pm 2.0\text{m}$
Análisis de incendios	Altura piezométrica estática y residual entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registradas en el nudo representativo de cada zona de presión, durante condiciones normales de demanda y escenario de incendio.
Diseño de sectorización	Altura piezométrica entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registrada en el punto de división de sectores, durante condiciones normales de demanda y escenario de incendio.
Sistemas rurales de distribución	Altura piezométrica entre $\pm 3.0\text{m}$ y $\pm 6.0\text{m}$ registrada en los nudos extremos de la red durante condiciones normales y de máxima demanda.
Estudios de rehabilitación	Altura piezométrica estática y residual entre $\pm 1.5\text{m}$ y $\pm 3.0\text{m}$ registradas en el área de estudio, durante condiciones normales de demanda y durante el escenario de incendio
Purgas de la red	Diferencia de caudal entre 10% y 20% para la descarga en hidrante, a 14.0 mca.
Estudios de eficiencia energética	(1) Energía total utilizada entre 5% y 10% para 24 horas (2) Consumida energético horario entre 10% y 20% (3) Demanda máxima instantánea de energía entre 5% y 10%
Operación de la red	El modelo debe reproducir los problemas que ocurren en el sistema, de tal manera que el modelo se puede utilizar para la toma de decisiones para ese problema en particular.
Planificación en emergencias	Altura piezométrica entre $\pm 3.0\text{m}$ y $\pm 6.0\text{m}$ registrada durante el escenario de emergencia
Modelación de desinfectantes	El modelo debe reproducir el patrón de concentración del desinfectante, observado a través del tiempo con un error aproximado de 0.1 mg/l a 0.2 mg/l.

(Fuente: Walski et al, 2007)

En 2008 la American Water Works Association Research Foundation desarrolla un proyecto con el objetivo de establecer una guía para la modelación hidráulica que incluya criterios unificados para valorar la 'bondad de ajuste' de los modelos hidráulicos (Speight, 2008). Esta guía aplica un procedimiento basado en un análisis matricial para establecer la calidad de los datos de entrada y de calibración, y de la 'bondad-de-ajuste' de los resultados del modelo entre: 'TOLERABLE', 'BUENO', 'MEJOR', y 'SUPERIOR'. En un primer paso se determina la calidad de los datos de entrada en función de su precisión, analizando los elementos más significativos de sistema de distribución. Como segundo paso se evalúa la calidad y cantidad de la información disponible para la calibración, y la 'bondad de ajuste' del modelo. Finalmente, se propone una clasificación que relaciona los resultados de los análisis cualitativos en función de la calidad requerida para el modelo según el propósito de éste. Los elementos y las fuentes de información analizados en esta propuesta de análisis cualitativo son los siguientes:

- Datos físicos de las tuberías (diámetro, localización, conectividad).
- Elevación de los nudos.
- Datos de demanda.
- Datos de depósitos (incluida su geometría).
- Curvas de bombas.
- Datos de válvulas (incluida la pérdida de carga).
- Bombas
- Depósitos
- Válvulas de control
- Pruebas con trazadores
- Mediciones de caudal y presión

En este trabajo de investigación el criterio para determinar el nivel de precisión de la calibración del modelo hidráulico será de tipo cuantitativo, y estará enmarcado en los criterios propuestos por Walski et al (2007). Debido a las características de las redes de distribución de los casos de estudio, se considerará la precisión requerida para modelos de planificación correspondiente a redes menores (con tuberías menores a 600mm).

2.3.4 Técnicas avanzadas de calibración

Siendo la simulación hidráulica un cálculo de presiones y caudales en tuberías de la red a partir del conocimiento de la topología de la red, diámetros, rugosidades, longitudes, coeficientes de pérdidas menores en tuberías, demandas en los nudos y energía disponible en la red; la calibración del modelo consistirá en encontrar los óptimos valores de las variables enumeradas (o una combinación de éstos) para reproducir el comportamiento hidráulico de la red real. Esto implica que el número de incógnitas vinculadas al problema de la calibración siempre será superior al número de ecuaciones disponibles, por lo tanto, para

lograr su resolución es necesario el uso de técnicas de calibración apoyadas en herramientas numéricas y computacionales (Saldarriaga, 2007; Saldarriaga y Jurado, 2008).

Las técnicas avanzadas de calibración de modelos pueden ser agrupadas en dos categorías: técnicas analíticas y técnicas implícitas (o de optimización). Las técnicas implícitas se dividen a su vez en no evolutivos y evolutivos, según el método de optimización en el cual están basadas (Mays, 2000; Kapelan, 2002; Walski et al 2007; Savic et al, 2009; Christi et al, 2011)

Las técnicas analíticas corresponden a métodos iterativos y métodos explícitos. Estas técnicas corresponden a las propuestas realizadas por Walski (1983a), Ormsbee & Wood (1986), Bhave (1988), Boulos y Wood (1990), Boulos y Ormsbee (1991). Los métodos iterativos están basados en procedimientos de prueba-error que ajustan los parámetros desconocidos en cada iteración utilizando presiones y/o caudales medidos, resolviendo el sistema de ecuaciones básicas de la red para el estado estacionario. Los métodos explícitos están basados en la resolución de un sistema extendido de ecuaciones compuesto por las ecuaciones básicas de la red para estado estacionario, y ecuaciones adicionales derivadas de las mediciones de caudal y presión disponibles.

Las técnicas implícitas utilizan de manera acoplada un modelo de simulación hidráulica para resolver las ecuaciones básicas de la red, y un método de optimización para determinar los valores de los parámetros de calibración. Entre los principales métodos propuestos siguiendo este tipo de técnica están: métodos de búsqueda local derivativos y no derivativos (Ormsbee y Wood, 1986; Boulos y Wood, 1990; Boulos y Ormsbee, 1991; Reddy y Sridharam, 1996), métodos de optimización lineal y no lineal (Ormsbee, 1989; Lansey y Basnet, 1991; Pudar y Liggett, 1992; Greco y Giudice, 1999), métodos de búsqueda global basados en AG (Savic y Walters, 1995; Lingireddy y Ormsbee, 1999; Wu y Simpson, 2001; Lingireddy y Ormsbee, 2002; Menezes, 2012), técnicas de análisis de sensibilidad (Datta y Sridharam, 1994).

Los métodos implícitos no evolutivos están basadas en el uso de algoritmos de programación no lineal, desarrollados originalmente para el diseño óptimo de los sistemas de distribución de agua. En este tipo de técnica la calibración es formulada como un problema de optimización no-lineal, y consiste en definir una función objetivo sujeta a restricciones lineales y no-lineales (Ormsbee y Lingireddy, 1997). La función objetivo formulada busca minimizar las diferencias entre las mediciones (valores observados) y las variables simuladas (presiones y/o caudales); siendo los parámetros a determinar los correspondientes a la rugosidad en las tuberías, las demandas en nudos, y los ajustes de válvulas y bombeos.

Los métodos implícitos evolutivos están apoyadas en el uso de Algoritmos Genéticos (AG). Estos algoritmos están basados en las leyes de evolución biológica de Darwin, y tratan de simular la evolución de una población de individuos (reproducción, cruce y mutación) mediante criterios y acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución

biológica; en la cual sobreviven los más aptos y los menos aptos son descartados (Mora, 2012). Ormsbee y Lingireddy (1997) mencionan varias ventajas de los AG sobre los métodos no evolutivos, entre las que se menciona su capacidad para evaluar múltiples soluciones simultáneamente.

2.3.4.1 Técnicas analíticas de calibración

Walski (1983a) presenta una técnica de calibración basada en el uso de ecuaciones analíticas, que ajusta simultáneamente coeficientes de tuberías y demandas en nudos. Esta técnica permite simplificar el proceso de calibración mediante el cálculo de indicadores adimensionales de error, los que acompañados de una orientación cualitativa ayudan al abonado a decidir si ajustar el factor C de Hazen-Williams o el consumo en los nudos. Para el uso de las ecuaciones propuestas se requiere disponer de datos de presión del sistema en al menos un nudo, y para dos condiciones de funcionamiento significativamente diferentes; así como información relativa al funcionamiento u operación de bombas y tanques. Se sugiere obtener esta información durante condiciones normales de operación y durante la ejecución de pruebas de caudales para incendios. Se propone utilizar esta técnica de calibración en redes simplificadas, para lo cual se recomienda formar grupos de tuberías y reemplazarlos por tuberías equivalentes; razón por la cual el método resulta inherentemente aproximado por lo que no garantiza un elevado nivel de convergencia de los resultados.

Ormsbee y Wood (1986) proponen un algoritmo de calibración explícito que pretende mejorar la fiabilidad de los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua, así como eliminar la necesidad de métodos de calibración de ensayo y error. Esta técnica desarrolla una reformulación de las ecuaciones básicas de la red (continuidad y energía) en términos de coeficientes de pérdidas de carga y las resuelve de forma matricial considerando condiciones de contorno definidas. El método realiza ajustes de coeficientes de pérdida de carga de tuberías para cada condición de carga y de operación; los cuales son utilizados para definir rugosidades de tubería o pérdidas de carga menores que permitan cumplir con las condiciones de contorno expresadas a través de las mediciones de presión o caudal. Este enfoque asume que la estimación de los caudales de demanda en los nudos es razonablemente precisa, y que sólo los coeficientes de pérdidas de carga de las tuberías necesitan ser ajustados. Trabajos posteriores presentados por otros autores evidencian que el algoritmo propuesto sólo puede trabajar con una condición de carga a la vez; esto implica una seria limitación, siendo necesario aplicar el algoritmo para diferentes condiciones de carga. Y además, si los coeficientes de calibración de la pérdida de carga varían significativamente para cada caso se requiere aplicar un proceso matemático para obtener un valor promedio (Ormsbee y Wood, 1986).

Bhave (1988) presenta una técnica de calibración iterativa que busca ajustar simultáneamente los coeficientes de pérdida de carga de tuberías y la demanda en los nudos; de manera similar a la técnica propuesta por Walski (1983a). Se diferencia de esta

última en que supone que el caudal de entrada en el nudo de inyección puede medirse o estimarse con bastante precisión, y por lo tanto es conocido y permanece fijo durante el proceso de calibración. El método requiere la medición de presión en uno o varios nudos para varias condiciones de carga, siendo necesario al menos realizar mediciones para condiciones normales de operación y durante pruebas de apertura de hidrantes. Los coeficientes de pérdida de carga de las tuberías se estiman inicialmente en función de los datos de campo disponibles, o en su defecto en base a la experiencia y criterio del abonado del modelo. Luego de cada iteración se determinan las pérdidas de carga entre el nudo de inyección y los nudos de prueba; y calcular para cada condición de carga el ratio entre las pérdidas para los valores medidas y los simulados por el modelo. El método requiere realizar las iteraciones necesarias hasta que los ratios de las pérdidas de carga se consideren aceptables. Resulta necesario mencionar que autores de propuestas de calibración posteriores a ésta señalan como limitaciones del método: a) la lentitud de convergencia del método, siendo necesario realizar varios ciclos de iteraciones para ajustar los datos simulados y observados, b) el modelo asume que el caudal y la altura son conocidos en todos los posibles nudos de inyección, y que estos últimos no cambian, c) el método requiere que el abonado defina ecuaciones de energía adicionales basados en los resultados hidráulicos iniciales del modelo sin calibrar (Boulos y Ormsbee, 1990).

Boulos y Wood (1990) presentan un método que permite determinar de forma explícita los parámetros de diseño, operación y calibración de tuberías en modelos hidráulicos para determinadas condiciones de presión y caudal (condiciones de frontera) del régimen estacionario. De manera general el método busca un factor global para ajustar todos o un grupo de parámetros seleccionados de la red, modificando los valores inicialmente propuestos como solución a los parámetros desconocidos.

Este método introduce ecuaciones adicionales a las ecuaciones básicas de la red para representar condiciones específicas de operación de la red, siendo necesario adicionar ecuaciones de energía o continuidad por cada condición de frontera requerida que representen aquellos parámetros adicionales (o variables de decisión) que se deseen conocer. El nuevo sistema de ecuaciones resultante debe ser resuelto explícitamente. El enfoque matemático del método considera la solución simultánea del sistema de ecuaciones cuasi-lineales en términos de un parámetro, el cual es linealizado y resuelto aplicando el método de Newton-Raphson en un proceso iterativo que involucra el uso de matrices. Para los casos en los que se impone más de una condición de frontera, las tuberías requieren ser agrupadas de tal forma que el número de grupos formados sea igual al número de condiciones de frontera impuestas. Por lo tanto, el método busca calcular un factor global de corrección para los parámetros de cada grupo de tuberías.

Boulos y Ormsbee (1991) presentan una metodología semi-analítica que busca correlacionar datos de presiones observadas y simuladas utilizando factores globales de corrección de las

pérdidas de carga para modificar los valores inicialmente estimados de los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams.

Los autores presentan esta propuesta como una extensión al método de calibración explícita presentada por Ormsbee y Wood (1986). Se presenta un algoritmo para ser más eficiente y rápido el proceso de calibración, capaz de realizar análisis bajo múltiples condiciones de carga y aplicable tanto para redes malladas, ramificadas o una combinación de ellas. El algoritmo de calibración propuesto además de ajustar los coeficientes de rugosidad de las tuberías, resuelve el conjunto de ecuaciones de la red hasta obtener la solución simultánea de los caudales que atraviesan las tuberías, buscando cumplir el objetivo de ajustar los valores simulados a los observados para cada uno de los puntos medidos y para cada condición de carga u operación definida.

Cheung y Souza (2006) realizaron una comparación entre varias de las técnicas analíticas mencionadas en este apartado. En su trabajo utilizan las técnicas propuestas por Bhave (1988) y Boulos y Wood (1990), que fueron aplicadas en una red hipotética. Entre las conclusiones de su trabajo resaltan la flexibilidad de la formulación del método explícito, la que permite incorporar varios parámetros de calibración, operación y proyecto. Concluyen que el método iterativo empleado presenta una convergencia más lenta en comparación con el método explícito. Por otro lado se menciona que el método iterativo presenta menores desviaciones en sus resultados considerando la sumatoria de diferencias entre los valores observados y los valores reales para los sectores; pero sólo para el caso de redes hidráulicas de pequeño tamaño (Menezes, 2012).

2.3.4.2 Técnicas implícitas apoyadas en métodos de optimización no evolutivos

Ormsbee (1989) presenta una técnica de calibración que combina un modelo de simulación y un método de optimización. La calibración del modelo es formulada como un problema de optimización no lineal, sujeta a un conjunto de restricciones; cuya función objetivo busca minimizar la diferencia entre los valores observados y simulados (de caudal, presión y niveles en tanques) en varios puntos de la red para régimen estacionario o múltiples condiciones de carga (período extendido). La formulación matemática del problema considera que los valores simulados de la función objetivo son una función no lineal implícita de las variables básicas de decisión del problema: la demanda en nudos, la rugosidad de tuberías, la altura piezométrica en nudos de consumo, y la presión de regulación en válvulas de control. El problema de optimización es resuelto utilizando el método "Extended complex method of box", el cual resulta de simple conceptualización e implementación al no requerir de operaciones matriciales. El enfoque de esta técnica considera que los valores de rugosidad resultan de mayor importancia cuando el sistema se calibra en condiciones de caudal elevado, y para las condiciones de bajo caudal la distribución de la demanda puede ser más crítica. La solución del problema queda sujeta a tres tipos de restricciones:

- Restricciones implícitas de sistema (conservación de la masa y energía).

- Restricciones de frontera implícitas (valores máximos y mínimos de caudal en tuberías y presión en nudos).
- Restricciones de frontera explícitas (utilizados para acotar las variables de decisión).

Un método alternativo es el presentado por Lansey y Basnet (1991), quienes proponen un algoritmo de calibración de similar estructura al utilizado para el método de calibración implícita de Ormsbee (1989), diferenciándose en la técnica de optimización utilizada. Este método es capaz de analizar por separado o simultáneamente condiciones de carga independientes y en período extendido, y utiliza un modelo de simulación para resolver el sistema de ecuaciones implícitas. Para minimizar la función objetivo respecto a todos los parámetros de calibración se utiliza el método del gradiente general reducido (General Reduced Gradient - GRG). El método es probado en varios casos de estudio, luego de lo cual los autores concluyen que la estimación de parámetros con un número limitado de datos afecta negativamente la estimación de los valores parámetros (Kapelan, 2002).

Datta y Sridharan (1994) proponen una técnica cuyos parámetros a calibrar son estimados por comparación entre los valores simulados de las variables de decisión de la red con sus correspondientes valores observados para diferentes condiciones de carga. Para lograr la calibración se utiliza el criterio del mínimo error asociado al método de Mínimos Cuadrados Ponderados, y para resolver las ecuaciones básicas de la red se utiliza un procedimiento iterativo numérico. Los parámetros a calibrar considerados en este trabajo corresponden a los coeficientes de Hazen-Williams de las tuberías. Sin embargo, los autores mencionan que el algoritmo también se puede aplicar para obtener estimaciones de demandas en nudos, o una combinación de los coeficientes de Hazen-Williams y demandas. El método propuesto puede manipular una variedad de parámetros con valores que difieren en varios órdenes de magnitud, y múltiples condiciones de carga.

En la misma línea de Reddy y Sridharan (1996) proponen el método de Mínimos Cuadrados Ponderados basado en el método de optimización de Gauss-Newton. El alcance del modelo presentado incluye la estimación de parámetros tales como coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams, bombes, y consumos. Considera diferentes series, número y tipos de mediciones (pérdidas de carga, caudales en tuberías y consumos) para una única o múltiples condiciones de carga. El trabajo hace revisión de la influencia de la selección de los pesos de ponderación en la estimación de parámetros para diferentes calidades de mediciones: datos sin errores, datos con “ruidos” o pequeños errores (tanto dependientes como independientes de la magnitud de la variable medida), y datos con errores. Así también sugieren que para datos con problemas de “ruido” o malas mediciones se debe realizar un proceso iterativo para reasignar pesos. A criterio de los autores esta técnica comparte las ventajas de la propuesta por Datta y Sridharan (1994), mostrando adicionalmente una buena convergencia para situaciones con parámetros de distinto tipo u orden de magnitud, e incluso cuando los parámetros iniciales difieren en varios órdenes de magnitud de los valores adecuados.

Greco y Del Giudice (1999) presentan una técnica de calibración para estado estacionario y múltiples condiciones de carga. El método utiliza un algoritmo de optimización no lineal, y un simulador hidráulico para ajustar únicamente los coeficientes de rugosidad de las tuberías partiendo de estimaciones iniciales de rugosidad. Adicionalmente se asume que las diferencias entre los resultados obtenidos en el simulador hidráulico y las mediciones se deben a errores en las estimaciones iniciales de las rugosidades de las tuberías. El método minimiza la suma de la diferencia cuadrática entre los coeficientes de rugosidad estimados (variables de decisión del problema no lineal) y los valores iniciales asumidos; sujetos a una serie de restricciones determinadas por la diferencia entre los valores observados (medidos) y simulados, y una matriz de sensibilidad de las presiones en los nudos respecto a variaciones de la rugosidad de las tuberías. Este método trata de simplificar el problema de la calibración del modelo hidráulico; sin embargo, al incluir únicamente el ajuste de las pérdidas de carga, desestima la importancia del caudal consumido en el comportamiento hidráulico de la red.

2.3.4.3 Función objetivo para la calibración mediante técnicas implícitas no evolutivas

Walski (1986) afirma que el uso del error absoluto entre los valores observados y simulados es un error a la hora de evaluar la calibración de un modelo hidráulico. Como alternativa Ormsbee (1989) propone como función objetivo el error absoluto porcentual entre los valores simulados y observados (Ec. 19), el cual también es utilizado por Linsey y Basnet (1991), y donde S_i =valores simulados, O_i =valores observados.

$$\left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \quad (19)$$

Por el contrario, Datta & Sridharam (1994) y Reddy & Sridharan (1996) utilizan como función objetivo la suma ponderada del cuadrado de las diferencias entre los valores observados y calculados (Ec. 20). Esta característica corresponde a una función derivable, por lo que se convierte en un criterio necesario para utilizar aproximaciones por series de Taylor en el proceso de optimización.

$$E = \sum_{L=1}^{LMAX} \sum_{i=1}^{M(L)} W^L(i) |o^L(i) - s^L(i)|^2 \quad (20)$$

donde $o^L(i)$ = valor observado de la variable i para la condición de carga L , $s^L(i)$ =valor simulado de la variable i para la condición de carga L , W^L =Peso (ponderación) asociada a la i -ésima observación para la condición de carga L , $M(L)$ =número de mediciones para la condición de carga L , $LMAX$ =número de condiciones de carga.

Tucciarelli et al (1999) proponen una función objetivo adimensional (Ec. 21), donde la diferencia cuadrática entre valores simulados y medidos (tanto de caudal como de presión) es dividida por el cuadrado de la suma de los valores de cada serie medida; y cada término

es multiplicado por un factor de ponderación (peso) igual al inverso de la varianza de los errores relativos de las series de mediciones de caudal y presión.

$$OF_1 = \sum_{j=1}^{n_b} w_h \frac{(H_j - H_j^*)^2}{(\sum_{i=1}^{n_b} H_i^*)^2} + \sum_{j=1}^{n_f} w_f \frac{(F_j - F_j^*)^2}{(\sum_{i=1}^{n_f} F_i^*)^2} \quad (21)$$

donde n_b = serie de nudos, n_f =serie de tuberías, H^* =mediciones de altura total, H = alturas totales simuladas, F^* =mediciones de caudal, F =caudal simulado, w_h y w_f = pesos de ponderación.

Greco M. & Del Giudice (1999) utilizan un enfoque distinto del problema de la calibración y proponen como función objetivo la suma de las diferencias cuadráticas entre las rugosidades estimadas (variables de decisión) y las rugosidades inicialmente estimadas; siendo las mediciones en campo utilizadas dentro de las restricciones del problema no lineal. Donde ε_i =rugosidad estimada, ε_i^* =rugosidad inicial estimada.

$$f(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \varepsilon_i^*)^2 \quad (22)$$

Cheng W. y He Z. (2011) utilizan una función objetivo que minimiza la suma de las diferencias cuadráticas entre las mediciones y los valores simulados para los caudales en las tuberías, presiones en nudos, y caudales de inyección a la red. Cada término de la función objetivo es afectado por factores (pesos) que buscan hacer física y dimensionalmente compatible sus términos y fortalecer los elementos más significativos de la red.

$$J(Q) = \sum_{i=1}^{nh} (W_i^h)^2 [h_i^o - h_i^p(Q)]^2 + \sum_{j=1}^{nq} (W_j^q)^2 [q_j^o - q_j^p(Q)]^2 + \sum_{k=1}^{nk} (W_k^{qt})^2 [qt_k^o - qt_k^p(Q)]^2 \quad (23)$$

$J(Q)$ = función objetivo, h_i^o = medición de presión en el nudo i , h_i^p =valor de presión simulada en el nudo i , q_j^o = medición de caudal en la tubería j , q_j^p = valor simulado del caudal circulante por la tubería j , qt_k^o =medición de caudal de inyección en el punto k , qt_k^p = valor simulado de caudal.

El presente Trabajo de fin de Máster pretende proponer una metodología para la calibración de modelos hidráulicos, la cual es desarrollada de manera conceptual y aplicada en tres casos de estudio sin recurrir a rutinas de cálculo automatizadas. Por lo que no se ha definido una función objetivo en esta fase de la investigación; y se ha considerado utilizar el error cuadrático medio para valorar la desviación entre los valores observados y simulados en los casos de estudio desarrollados.

2.3.4.4 Técnicas implícitas apoyadas en métodos de optimización evolutivos

Este tipo de técnica de calibración presenta varias ventajas frente a las técnicas apoyadas en métodos no evolutivos, tales como:

- i) Pueden ser integrados satisfactoriamente con los modelos de simulación de la red
- ii) Pueden ser utilizados para resolver el problema de la calibración en redes de gran tamaño
- iii) Permiten incorporar varias condiciones de carga y considerar varios parámetros de calibración
- iv) Simplicidad conceptual, pues no requieren complejos métodos matemáticos para la resolución del problema de la calibración.

Sin embargo, presentan desventajas relacionadas con la habilidad y experiencia del abonado requerida para definir las condiciones de cálculo y valores iniciales de los parámetros a calibrar, la incapacidad del método para obtener un valor óptimo global del parámetro buscado, y los requerimientos computacionales requeridos (Savic et al, 2009).

Savic y Walters (1995) presentan una técnica basada en AG capaz de calibrar modelos hidráulicos para múltiples condiciones de carga en simulaciones de período extendido. Lingireddy y Ormsbee (1999) proponen una técnica enfocada en ajustar los factores de la demanda en simulaciones de período extendido. En un trabajo posterior Lingireddy y Ormsbee (2002) amplían el alcance de los parámetros a modificar por el AG; de tal forma que se incluyen el ajuste de los coeficientes de rugosidad en tuberías, y coeficientes de ajuste espacial y temporal para la demanda. Propuesta en la cual está orientada la línea de investigación del presente Trabajo de Fin de Máster.

Wu y Simpson (2001) proponen un algoritmo denominado por los autores “Messy Genetic Algorithm” enfocado en el diseño óptimo y la rehabilitación de redes de distribución. Este algoritmo es utilizado como punto de partida para el trabajo de Wu et al (2002), y posteriormente por Wu y Sage (2006) para apoyar la detección de fugas como herramienta complementaria de la calibración hidráulica.

Resulta relevante mencionar el trabajo realizado por el Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento de la Universidad Federal de Paraíba (LENHS) y el Centro de Investigación de Acueductos y alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). Menezes (2012) presenta el modelo computacional LENHS-CALIBRA, enfocado en la rehabilitación de redes hidráulicas. Este modelo utiliza EPANET (Rossman, 2000) como simulador hidráulico e incorpora dos algoritmos distintos para la calibración de redes de distribución: un algoritmo iterativo y un algoritmo genético multiobjetivo. El algoritmo iterativo busca modificar incrementalmente las rugosidades y las demandas, ajustando los valores de presión y caudal medidos a los simulados por el modelo hidráulico. Por otro lado, para el algoritmo genético multiobjetivo puede utilizar hasta siete variables simultáneamente (rugosidad, diámetro, pérdida de carga localizada, válvula de regulación,

caudal, topografía, demanda); y permite definir límites para las variables y escoger cualquier combinación de éstas. Takahashi (2008) propone un método de calibración basado algoritmos genéticos y programación por restricciones. Los módulos son aplicados en distintas fases del proceso de calibración, para ajustar los parámetros en función de si éstos son continuas o discretas. La demanda, rugosidades y fugas son ajustadas utilizando el módulo de AG; el módulo correspondiente a la programación por restricciones ajusta las variables topológicas.

2.3.4.5 Simplificación del problema de la calibración mediante la agrupación de tuberías y nudos

La calibración implica el ajuste de los coeficientes de rugosidad de todas las tuberías incluidas en el modelo hidráulico de la red. Por otro lado, durante la calibración del modelo hidráulico se debe ajustar la demanda en los nudos, debido a la incertidumbre asociada al proceso de estimación de los consumos. Esto puede ser una tarea compleja debido al gran número de incógnitas del problema y la disponibilidad de un número limitado de mediciones para realizar la calibración del modelo; especialmente en sistemas de distribución de gran tamaño o con tuberías de diferente edad y material. Una solución para disminuir el número de incógnitas y aumentar la precisión de la estimación de los parámetros, consiste en agrupar los elementos a calibrar en función de características físicas o cualitativas comunes. Consiguiendo adicionalmente disminuir las necesidades computacionales requeridas para la estimación de los parámetros.

Walski (1983a) sugiere trabajar con redes simplificadas, para lo cual forma grupos de tuberías y las reemplaza por tuberías equivalentes; pero reconoce que esto solo permite aproximarse a los resultados correctos. Bhave (1988) propone dividir la red en varias zonas, en función del número de mediciones disponibles, con lo cual en su propuesta de calibración se realiza la modificación de los coeficientes de pérdida de carga por grupos de tuberías y demandas por grupos de nudos.

Boulus y Wood (1990) proponen en su técnica de calibración el uso de un factor global como variable de decisión, utilizado para ajustar todas las variables de decisión de un grupo de elementos de la red. Cada grupo puede corresponder a un conjunto de elementos con un parámetro común desconocido; por ejemplo a un conjunto de tuberías con una edad determinada o de nudos que representen un consumo industrial. Boulus y Ormsbee (1991) sugieren desagregar la red realizando un análisis de la topología que permita generar grupos de mallas en función de características físicas de las tuberías, tales como el material o edad de las tuberías. Los autores sugieren realizar para cada grupo de tuberías pruebas de campo en hidrantes, necesarias para recolectar información a ser utilizada como datos de calibración y para verificar la precisión del modelo calibrado.

Datta y Sridharam (1994) resaltan la necesidad de agrupar apropiadamente aquellas tuberías y nudos con parámetros desconocidos (rugosidad y demanda, respectivamente), de tal forma que el número de parámetros a estimar sea mínimo. El número óptimo de parámetros a ser estimados dependerá de la cantidad y calidad de las observaciones disponibles. Reddy y Sridharam (1996) resaltan que los datos disponibles raramente justifican la calibración de elementos como las tuberías de manera individual, por lo tanto consideran agrupar las tuberías del modelo para reducir el número de parámetros a ser obtenidos; introduciendo un factor de corrección global de parámetros para cada grupo de elementos.

Tucciarelli et al (1999) enfocan su trabajo en la solución al problema inverso. Considera que para obtener un sistema de ecuaciones determinado y estable es necesario disminuir el nivel de parametrización. Por lo que plantea su agrupación por zonas asumiendo que los coeficientes de rugosidad y parámetros de fugas son homogéneos para áreas específicas de la red.

Mallick et al (2002) propone simplificar el modelo mediante la agrupación de tuberías asumiendo que cada grupo estará compuesto por tuberías con similares coeficientes de rugosidad. La metodología propuesta permite determinar el número de grupos de tuberías más adecuado para el modelo hidráulico; cuantificando el error asociado a la capacidad del modelo para representar físicamente la red de distribución y a la incertidumbre que tendrán los resultados del modelo. Esto se realiza comparando los valores simulados y medidos, de tal forma que es posible cuantificar el efecto que cada simplificación tendrá sobre los resultados del modelo.

Basciá y Tucciarelli (2003), como parte de su propuesta metodológica para la calibración de redes malladas y no malladas, presenta un algoritmo de optimización que minimiza la variación de los coeficientes de rugosidad de las tuberías. Esto incrementa la homogeneidad de la red permitiendo formar pequeños grupos de tuberías, y abordar el problema de calibración final de la red con número menor de parámetros a ajustar.

Kumar et al (2009) propone una metodología enfocada en la calibración de redes de distribución de gran dimensión, ajustando únicamente los coeficientes de rugosidad de las tuberías. El algoritmo asociado al método agrupa automáticamente las tuberías con similar coeficiente de rugosidad, de tal forma se reduce el número de parámetros a estimar durante el proceso.

El concepto de agrupación de tuberías y nudos será utilizado como parte del trabajo de investigación presentado en este Trabajo de Fin de Máster. El enfoque a utilizar permitirá distribuir espacialmente las fugas en zonas de la red con un mismo nivel de pérdidas, en función de la edad, material y condición estructural de las tuberías

2.4 Gestión de pérdidas de agua

La metodología de calibración propuesta en este Trabajo de Fin de Máster se basa en enfoques prácticos para la carga en el modelo hidráulico de las demandas independientes y dependientes de la presión; correspondientes a los consumos y fugas respectivamente. Para conocer con precisión los caudales asociados a cada tipo de demanda es necesario realizar un balance entre el volumen de agua inyectada y los volúmenes de salida del sistema. Por otro lado, la propuesta metodológica se apoya en técnicas de detección de fugas para obtener un parámetro físico que permita la distribución espacial de las fugas. Por lo tanto, se considera necesario incluir en este trabajo de investigación un apartado que describa el estado del arte relativo a la gestión de pérdidas de agua; concentrándose en técnicas para su estimación y detección.

2.4.1 Conceptos básicos

Las pérdidas de agua constituyen una de las principales fuentes de ineficiencia de las entidades gestoras de abastecimiento de agua (Alegre et al, 2005). Estas tienen un efecto financiero importante en el abastecimiento (Simmons, 1966), pues se trata de volúmenes de agua captada, bombeada, tratada, almacenada, y distribuida que se pierde en el instante en que está lista para ser consumida (Molina, 2009); por lo que cuando alcanzan valores elevados existe la necesidad de minimizarlas (Hudson, 1964).

La Asociación Internacional de Agua (IWA, por sus siglas en inglés) propone las siguientes definiciones para las pérdidas de agua, enmarcadas en el balance hídrico para la auditoría estandarizada de redes de distribución (Lambert y Hirner, 2000; Alegre et al, 2006):

Pérdidas de agua = Volumen inyectado al sistema - Consumo Autorizado

Pérdidas de agua = Pérdidas "aparentes" + Pérdidas "reales"

Las pérdidas aparentes corresponden a caudales de agua transportados a través de la red de distribución que alcanzan el punto de entrega a los abonados (EPA, 2010), por lo que se relacionan con aspectos de evaluación de cantidades de agua y no con pérdidas causadas por fugas. Para propósitos de comprensión del origen de las pérdidas aparentes, a continuación se hace referencia a las principales causas que constituyen cada uno de sus componentes (AWWA, 2009):

- Los consumos no autorizados corresponden a consumos a través de conexiones ilegales (dispersas o masivas), consumos a través de hidrantes, o consumos fraudulentos mediante conexiones paralelas a la acometida oficial o por adulteraciones del medidor.
- Las imprecisiones de medida, relacionados con consumos no registrados por el micromedidor debidos a errores derivados de la disminución de la sensibilidad y exactitud del equipo de medición. Este tipo de errores se atribuyen principalmente a problemas mecánicos derivados del deterioro físico a lo largo del tiempo, errores de

dimensionamiento e instalación, calidad del agua, falta de mantenimiento y baja calidad de los materiales empleados para su fabricación.

- Errores en el manejo de datos, que corresponden a variaciones en los períodos de facturación, errores en el manejo de las cuentas de los abonados debidos a la omisión de cuentas o consumos en los registros de facturación, deficiencias en el sistema de adquisición de datos y facturación, y errores humanos durante el proceso de lectura, análisis o facturación de consumos.

Las pérdidas reales de una red de distribución están constituidas por la sumatoria de caudales incontrolados debido a fallos en la estanqueidad de la misma; los que siguen dinámicas propias según su localización, tamaño (caudal de fuga) y tiempo durante el cual fugan (Guerrero y Arango, 2008). Es así que el volumen de agua perdida debida a las pérdidas reales depende de las políticas para la localización y reparación de fugas de cada empresa gestora del distribución de aguas potable, las características de las tuberías de la red de distribución, y de factores como la presión de servicio en la red y el nivel de fugas de fondo existente (Farley y Trow, 2003).

Si una tubería presenta fugas durante la operación ésta puede ser resultado de factores como: cargas superficiales y movimientos del terreno, deterioro provocado por corrosión excesiva y antigüedad, fatiga por presiones de servicio elevadas; e incluso puede tener deficiencias desde su instalación debido a materiales y mano de obra de baja calidad utilizada para su instalación (Molina, 2009).

Según su localización, las pérdidas reales, se clasifican en: fugas en tuberías de transporte y distribución, fugas y reboses en depósitos de almacenamiento, y fugas en acometidas hasta el punto de medición (Lambert y Hirner, 2000). Por otro lado, el análisis de componentes de las pérdidas reales según su tamaño y duración clasifica las fugas en tres categorías: fugas reportadas, fugas no reportadas y fugas de fondo (Fanner et al., 2007). Esta clasificación se ilustra en la Figura 1 y se detalla a continuación:

- Fugas reportadas (comunicadas). Son usualmente visibles y provienen de roturas en tuberías de transporte o distribución, por lo que ocasionan disminución de la presión o interrupción del servicio. Corresponden a fugas de caudales altos pero de corto período de duración.
- Fugas no reportadas (no comunicadas). Son usualmente no visibles, por lo que para su localización se requiere de equipos acústicos. Suponen caudales moderados cuya duración depende del método de detección y de las políticas de control activo de fugas de la empresa gestora del abastecimiento.
- Fugas de fondo. Además de ser no visibles son fugas de caudales muy bajos para ser localizadas por métodos acústicos, razón por la cual el tiempo de duración promedio de estas puede llegar a ser muy alto. Corresponden a fugas muy pequeñas en accesorios y juntas de conexión.

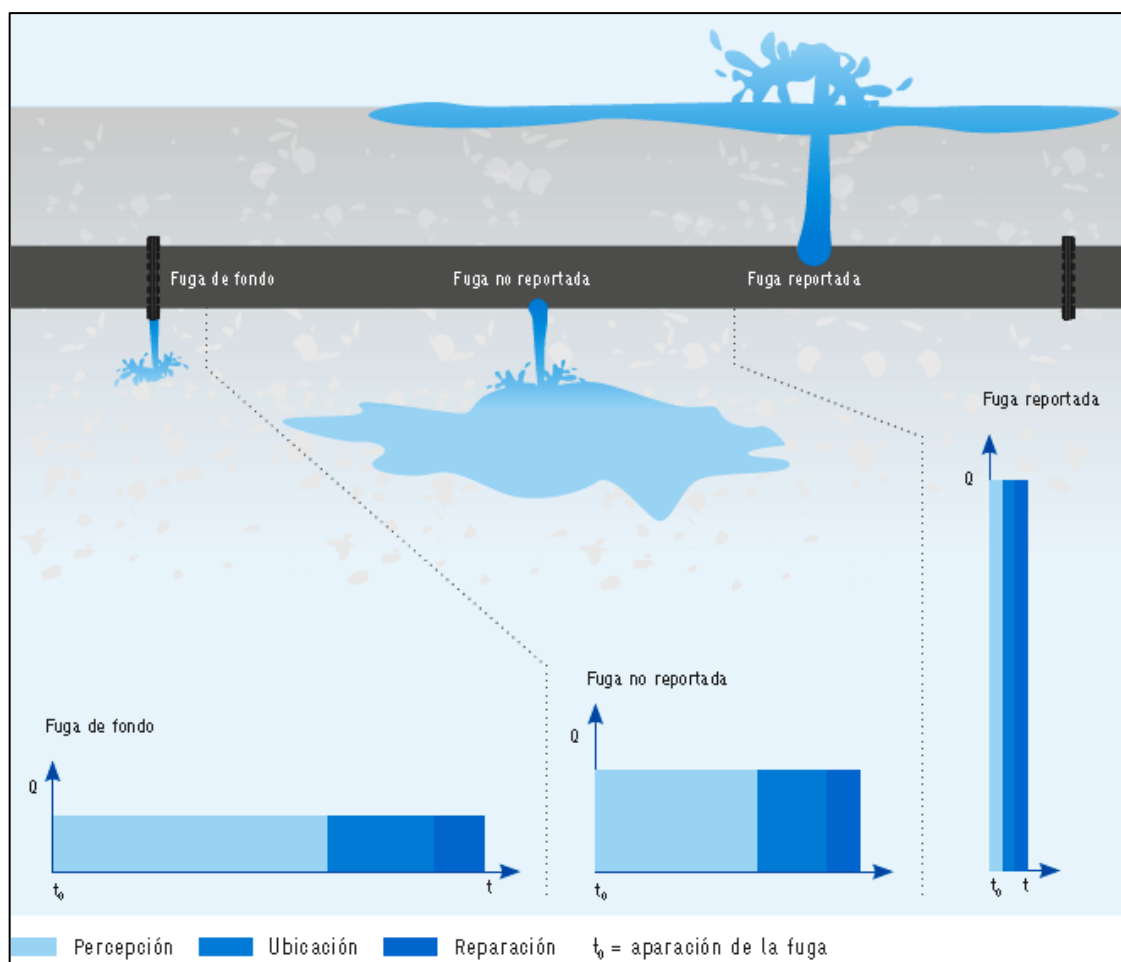


Figura 3 Clasificación de las fugas según su tamaño y duración (Fuente: GIZ y VAG-Armaturen, 2009)

2.4.2 Estimación de pérdidas

El objetivo de la estimación de pérdidas es cuantificar la cantidad de agua perdida en el sistema de distribución, sin considerar donde éstas se localizan. Esta estimación puede ser realizada mediante tres diferentes métodos, o una combinación de estos: el balance hídrico, el método de caudales nocturnos y el análisis de componentes de fugas.

El balance hídrico, también llamado método TOP-DOWN, estima el volumen anual de pérdidas totales a partir de los registros de caudales inyectados a la red de distribución y el volumen correspondiente a los diferentes tipos de consumos; siendo posible también estimar el volumen de pérdidas reales si se dispone de información suficiente para obtener una estimación adecuada de las pérdidas aparentes (Gil, 2010). Este método puede ser aplicado para todo un sistema de distribución (conducción y/o distribución) o zonas de distribución; siendo necesario para todos los casos verificar que los datos utilizados en el balance se correspondan con los límites físicos de la zona a evaluar (AWWA, 2009). En redes de distribución sectorizadas y con medición continua del caudal inyectado, el volumen de pérdidas reales estimado mediante este método puede ser contrastado con los resultados del análisis de caudales nocturnos (Lambert, 2003).

El método de caudales nocturnos, también denominado método BOTTON-UP, está basado en el análisis de los caudales nocturnos inyectados en sectores o zonas de pequeña dimensión (Distritos de Medición), conformados usualmente entre 500 y 3000 conexiones domiciliarias (Pilcher, 2003). En la mayoría de los casos, el caudal mínimo nocturno en zonas residenciales ocurre entre las 02h00 y 04h00 (McKenzie, 1999). Durante el período del caudal mínimo nocturno (CMN) el caudal consumido por los abonados es mínimo, por lo que las pérdidas reales (fugas) constituyen el mayor componente del caudal inyectado a la red. La estimación de las pérdidas reales se realiza sustrayendo el valor estimado del caudal de consumo nocturno del caudal mínimo nocturno inyectado a la red de distribución en estudio. Con el fin de convertir esta estimación en un volumen diario de pérdidas reales, es necesario extrapolarla para el resto del día utilizando la relación entre caudal de fuga y la variación de la presión a lo largo del día (McKenzei, 1998). Este método puede ser utilizado para validar el volumen de pérdidas reales obtenido mediante el enfoque TOP-DOWN (Thornton et al., 2008). La simplicidad de la información requerida para la aplicación del método lo hace conveniente cuando no se tiene disponible un modelo hidráulico de la red de distribución. Sin embargo, el nivel de confianza de los resultados obtenidos dependerá de la precisión de las medidas de caudal y presión, del método empleado para estimar el uso nocturno; y principalmente de la capacidad del nudo en el cual se registra presión, para representar la presión de servicio existente en toda la red de distribución evaluada (García et al. 2006).

El análisis de componentes se basa en el concepto BABE (Burts and Background Estimates) propuesto por el Water Institute Research en el reporte E de la serie Managing Leakage. Este método analítico permite estimar el volumen anual de pérdidas reales a partir de la estimación del caudal de fuga correspondiente a cada uno de los elementos de la red (Farley, 2001), basado en los parámetros más significativos relacionados con las fugas (Fanner, 2004). Este enfoque utilizan el número de fugas, caudales y tiempo de duración promedio para tres tipos de fugas (fugas de fondo, no reportadas, y reportadas) en diferentes elementos de la red de distribución, tales como tuberías de conducción y distribución, conexiones de servicio y acometidas (Parker, 2011). Otros datos requeridos incluyen información básica de la red (longitud total de tuberías, número de acometidas existentes y longitud promedio de acometidas), presión de servicio promedio en la red de distribución, y la relación presión-caudal de fuga obtenida con el valor apropiado del exponente de fugas N1 (Fanner et al, 2007b).

2.4.2.1 El Balance hídrico de la IWA/AWWA

Alegre et al (2006) afirman que el balance hídrico es fundamental para la estimación de las pérdidas de agua, pues éste permite determinar cuánta agua se pierde en el abastecimiento. Y para cumplir este objetivo el balance hídrico debe cuantificar los volúmenes en los principales puntos de entrada y salida del sistema; entre las cuales se incluye la captación, punto de importación o exportación de agua desde o hacia otros sistemas, tratamiento, y

suministro a sectores de la red. La Figura 4 permite ilustrar las principales entradas y salidas de un sistema de distribución, de manera secuencial, desde la captación hasta el punto de consumo de los abonados.

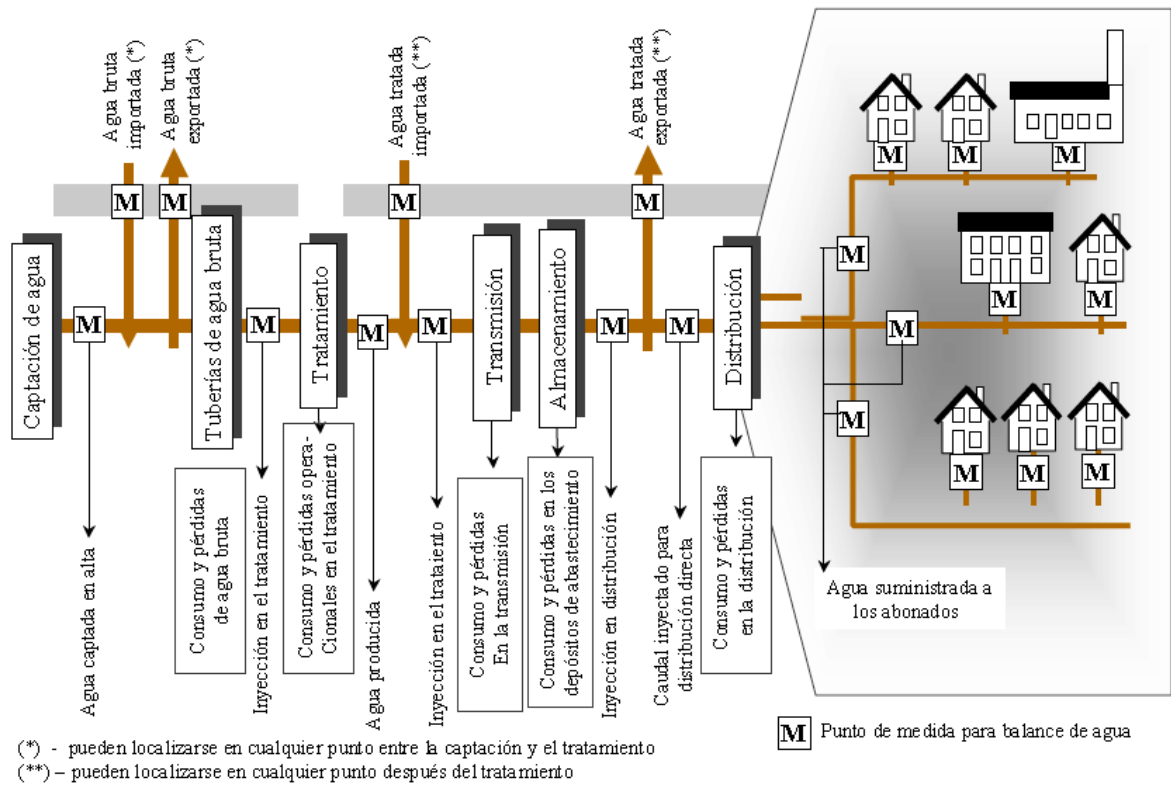


Figura 4 Definición de entradas y salidas de una red de distribución del agua (Fuente: Cabrera, 2013)

Tabla 4 Balance hídrico estandarizado propuesto por la IWA

Volumen inyectado al sistema	Consumo autorizado	Consumo Autorizado facturado	Consumo facturado medido	Agua Facturada
			Consumo facturado no-medido	
	Pérdidas de agua	Consumo Autorizado no facturado	Consumo no-facturado medido	Agua No Facturada
			Consumo no-facturado no-medido	
		Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	
			Imprecisiones de medida	
			Errores sistemáticos en el manejo de datos	
		Pérdidas reales	Fugas en tuberías de transporte y distribución	
			Fugas y reboses en depósitos de almacenamiento	
			Fugas en acometidas hasta el punto de medida	

(Fuente: Lambert y Hirner 2000)

La Tabla 4 ilustra el balance hídrico propuesto por la Asociación Internacional de Agua (Lambert y Hirner, 2000), y la Tabla 5 ilustra la adaptación realizada por la American Water Works Association (Kunkel, 2003); el que cubre la totalidad del ciclo del suministro de agua, es decir, desde su captación hasta su entrega al abonado.

Tabla 5 Balance hídrico estandarizado adaptado por la AWWA

Volumen de agua captada en fuentes propias	Volumen inyectado al sistema	Agua exportada	Consumo autorizado	Consumo Autorizado facturado	Agua exportada facturada	Agua Facturada
		Volumen suministrado		Consumo autorizado no facturado	Consumo facturado medido	
Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes		Consumo no-facturado medido	Consumo no autorizado	Consumo no-facturado no-medido	
			Consumo no-facturado no-medido			
			Imprecisiones de medida			
Pérdidas reales	Pérdidas reales		Errores sistemáticos en el manejo de datos	Fugas en tuberías de transporte y distribución	Fugas y reboses en depósitos de almacenamiento	
			Fugas en tuberías de transporte y distribución			
		Fugas en acometidas hasta el punto de medida				
Volumen de agua Importada						Agua No Facturada

(Fuente: Kunkel, 2003; AWWA, 2009)

El balance hídrico de la IWA/AWWA busca cuantificar los volúmenes totales entregados a la red de distribución, es decir, los consumos autorizados facturados, no facturados, medidos y no medidos. Por lo que en ausencia de contadores el balance hídrico requerirá realizar estimaciones del agua consumida, basada en los datos disponibles. Sin embargo, se puede generalizar que todos los cálculos realizados son aproximados, y tendrán un grado de incertidumbre asociado a la dificultad para evaluar cada componente (Lambert y Hirner, 2000; Mckenzei y Lambert, 2010). Por lo tanto los resultados del balance hídrico deben ser acompañados del grado de fiabilidad y exactitud de los datos utilizados para su cálculo (Alegre et al., 2006).

En el aspecto más amplio el balance hídrico considera los términos correspondientes a volumen captado, volumen producido, volumen de agua importada, y volumen de agua exportada. Sin embargo, estos no fueron incluidos dentro de la terminología del balance hídrico estandarizado propuesto por la IWA, pues, no son aplicables a todos los abastecimientos.

Lambert y Hirner (2000) recomiendan que para el cálculo del balance se debe considerar un período de 12 meses, y de este modo representar los valores de cada componente como un promedio anual. Esto busca reducir los efectos de las variaciones estacionales en el consumo y las diferencias de tiempo entre los ciclos de lectura de los medidores de los abonados (Alegre y Covas, 2005). Adicionalmente se sugiere utilizar unidades de medida que sean compatibles con las unidades utilizadas para registrar el volumen suministrado y el volumen consumido por los abonados (EPA, 2010).

2.4.3 Técnicas para la gestión de pérdidas de agua

La American Water Works Association (AWWA) publica en 1957 el artículo “Revenue Producing vs. Unaccounted-for Water” (Wallace, 1987) y presenta el término ‘Agua No Contabilizada’ para definir al porcentaje del volumen de agua que siendo suministrada a la red de abastecimiento no se refleja en el volumen contabilizado o facturado a los abonados. El término es rápidamente adoptado por las empresas de abastecimiento y utilizado como un indicador porcentual de la eficiencia en la gestión de la red de distribución. A esta publicación le siguieron muchas otras enfocadas en analizar el origen de las pérdidas (Hudson, 1964), presentar datos estadísticos relativos a pérdidas en varios abastecimientos de EE.UU. (Keller, 1976), entender los efectos financieros que éstas tienen en el abastecimiento (Simmons, 1966), proponer métodos de detección de fugas (Cole, 1983), dar sugerencias para realizar auditorías hídricas (Wheadon, 1987), y revisar metodologías para la reducción de pérdidas (AWWA, 1996; Buie, 2000). Los artículos coinciden en proponer intervenciones enfocadas a remediar las inexactitudes de medición de los contadores domésticos e industriales y macromedidores, usos no autorizados en hidrantes, consumos no medidos, y fugas.

La Water Authorities Association del Reino Unido en colaboración con el Water Research Centre publica el documento “Report 26. Leakage Control: Policy and Practice” (Technical Group of Waste of Water, 1985) y conocido como STC26, enfocado en la gestión técnica de las fugas. El reporte es resultado de un importante proceso de investigación y que incluyó pruebas de campo de gran magnitud para tratar de entender el origen de las fugas y controlarlas, además de presentar una primera aproximación a la relación fugas-presión. El manual presenta varias técnicas desarrolladas para la gestión de fugas tales como la subdivisión de la red, la evaluación del nivel de fugas a través del análisis del caudal nocturno, e introduce el concepto de Distrito de Medición (Parker, 2011). Este último concepto fue ampliado en los documentos “Report ER180E District Metering Part 1: System Design and Installation” (Farley, 1985) y “Report ER210E District Metering Part 2: System Operation” (Farley y Merrifield, 1987).

La serie de reportes “Managing Leakage Series”, publicada en 1994 por el National Leakage Initiative de Reino Unido, busca reemplazar el Reporte 26, e igual que éste último parte del supuesto que las fugas constituyen el componente más importante de las pérdidas. Cada

uno de los reportes que conforman esta serie está enfocada en un área especializada de la gestión de pérdidas a través del control de fugas, y que conforman la base del trabajo desarrollado posteriormente por la IWA.

May (1994) propone la teoría de patrones de descarga de área fija y variable (Fix And Variable Area Discharge - FAVAD), y plantea la ecuación 24 para predecir la variación del caudal de fuga en función de la variación de la presión. En esta ecuación Q_1 es el caudal esperado de fugas luego de la reducción de presiones, Q_0 es el caudal estimado de fugas actual, P_1 es la presión promedio de servicio a alcanzar luego de la reducción de presión, P_0 es la presión promedio de servicio actual, $N1$ es el exponente de fugas.

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N1} \quad (24)$$

Lambert et al (1999) recomienda de manera general utilizar indicadores de desempeño relativos a la longitud de red o el número de conexiones domiciliarias (acometidas) en reemplazo de los indicadores porcentuales como el 'Agua No Contabilizada'. Sugiere el uso del índice de Fugas Estructurales para representar el nivel de pérdidas reales en un abastecimiento; calculado a partir del volumen anual de fugas existentes y el Nivel Inevitable de Fugas. Lambert y Hirner (2000) presentan la metodología, terminología, y definiciones necesarias para un balance hídrico estandarizado propuesto para auditorías de redes de distribución. Lambert (2001) revisa el estado del arte en el área de la gestión de presiones para la reducción de pérdidas y presenta los resultados de las pruebas de campo y laboratorio que soportan su base teórica. Se discute la aptitud del exponente de la ecuación básica del flujo a través de un orificio (Ec. 2) para representar las fugas en una red de distribución, y propone valores para este exponente entre 0.5 y 1.5 en función del material de las tuberías y el tipo de fuga existentes en la red.

El concepto de Distritos de Medición fue actualizado y complementado con el documento "Report No. 99/WM/08/23: A manual of DMA practice" (UKWIR, 1999), que proporciona una guía detallada para la implementación de los Distritos de Medición como método para la gestión de pérdidas referente a: implementación y mantenimiento del DMA, monitoreo de fugas, selección de equipos para localización de fugas, solución de posibles problemas y gestión de datos e información.

Basada en el trabajo del Grupo de Trabajo en Pérdidas de Agua, la IWA presenta un nuevo enfoque para la gestión de pérdidas de agua que es presentada en el documento "International Report on Water Losses Management and Techniques" (Lambert, 2002) y que incluye:

- El balance hídrico estandarizado.
- Metodología para calcular el Nivel de Pérdidas Inevitables para una red de distribución adecuadamente gestionada y con infraestructura en buenas condiciones.
- Índice de Fugas Estructurales como indicador de desempeño para evaluar la gestión operacional y el nivel de pérdidas.

- Estrategias para la gestión de pérdidas reales, basadas en el control activo de fugas, la gestión de la presión, y la gestión de la infraestructura.

Alegre et al (2006) proporciona las guías necesarias para adaptar los conceptos en auditoría de redes, y presenta una serie de indicadores de desempeño para evaluar objetivos específicos en las empresas de abastecimiento, tales como: recursos hídricos, recursos humanos, infraestructuras, operación técnica, calidad de servicio, finanzas. Por otro lado, Kunkel (2003) sugiere a los operadores de servicios y reguladores de abastecimiento en EE.UU. y Canadá discontinuar el uso de indicadores porcentuales para medir el nivel de pérdidas, y recomienda adoptar el balance hídrico de la IWA junto con la terminología y definiciones estandarizadas asociadas a éste.

Son varias las publicaciones académicas enfocadas en revisar las bases científicas de los métodos propuestos por la IWA. Greyvenstein y Van Zyl (2007) realizan ensayos experimentales para verificar la relación presión-caudal de fuga propuesta en la teoría FAVAD. Cassa et al (2010) utiliza modelos matemáticos para comprobar la validez de los valores propuestos para el exponente de fugas. Van Zyl y Cassa (2011) demuestran que el exponente de fugas N1 no proporciona una adecuada caracterización del caudal de fugas. Por otro lado, García et al (2006) analizan la precisión del método de caudales nocturnos para estimar el volumen de fugas, comparando sus resultados con los obtenidos mediante un modelo hidráulico calibrado, e identifica los parámetros que generan mayor incertidumbre en el proceso de cálculo. García et al (2007) analiza la precisión del método propuesto por la IWA para estimar la reducción del caudal de fugas, comparando sus resultados con los obtenidos mediante modelación hidráulica. Escobar (2012) realiza un análisis de sensibilidad a los parámetros involucrados en el método de caudales nocturnos.

A continuación se revisarán los conceptos relacionados con la aplicación de los Distritos de Medición en la gestión de pérdidas en una red de distribución. Y de manera específica se presentarán los enfoques existentes para la detección de fugas, que serán utilizados en la metodología propuesta para el cálculo del parámetro a ser utilizado en la distribución espacial de las fugas.

2.4.4 Distritos de Medición aplicados a la gestión de pérdidas

La gestión de pérdidas está apoyada en la medición del caudal suministrado a zonas discretas de la red de distribución, denominadas 'Distritos de Medición'. Se define como Distrito de Medición (DMA) a una zona discreta de la red de distribución con fronteras definidas mediante el cierre permanente de válvulas (Farley, 2001) y equipos de medición de caudal (Di Nardo y Di Natale, 2011) instalados en su(s) puntos de entrada(s) y/o salida(s) con el fin de conocer la cantidad de agua que entra o sale del 'Distrito' en todo momento (Morrison, 2004).

Dependiendo de las características de la red, un DMA puede abastecerse desde: un único punto de inyección o múltiples entradas, desde un DMA adyacente, o estar dentro de un DMA de mayor tamaño (Farley, 2001; Di Nardo y Di Natale, 2011). El tamaño del DMA puede ser expresado en términos del número de conexiones de servicio o viviendas, siendo posible extraer esta información desde un Sistema de Información Geográfica, registros de facturación, información catastral del gobierno local o mediante una inspección en campo (Fanner et al, 2007a). Farley (2001) sugiere un tamaño típico entre 500 y 3.000 conexiones, el reporte STC26 sugiere tamaños entre 1000 a 3000 conexiones; mientras que Butler (2009) manifiesta que un DMA puede tener entre 2.500 a 12.500 o una longitud de red entre 5 y 30 Km de longitud. UKWIR (1999) recomienda tres categorías de DMA en función de la densidad poblacional del área asociada a éste (Tabla 6). Sin embargo, señala que en sectores mayores a 1000 conexiones puede ser más difícil discriminar entre fugas y usos nocturnos; y sugiere que los distritos de gran tamaño sean divididos temporalmente para realizar tareas de control de fugas.

Tabla 6 Tamaño DMA en función de la población servida

Tamaño de Distrito de Medición	No. de conexiones	Población servida
Pequeño	< 1000	Zona rural
Medio	1000 – 3000	Zona urbana
Grande	3000 - 5000	Zona urbana densamente poblada

(Fuente: UKWIR, 1999)

La literatura revisada sugiere que la división de la red de distribución para conformar los Distritos de Medición está determinado por: factores geográficos (área servida o tipo de zona urbana, rural, industrial), factores demográficos (número de conexiones servidas y tipos de vivienda existentes), requerimientos de calidad del agua, nivel económico o frecuencia de localización de fugas definidos por el abastecimiento, estado de la red de distribución, condiciones hidráulicas de operación requeridas (presión mínima, caudal de incendio), limitaciones económicas del abastecimiento (número de caudalímetros y válvulas instalar), fronteras naturales, restricciones físicas existentes en la red de distribución, requerimientos de mallado y redundancia de la red (UKWIR, 1999; Farley, 2001; Morrison et al, 2007). La Figura 5 presenta un esquema que nos da una idea de la subdivisión de la red para conformar distritos de medición en una red de distribución.

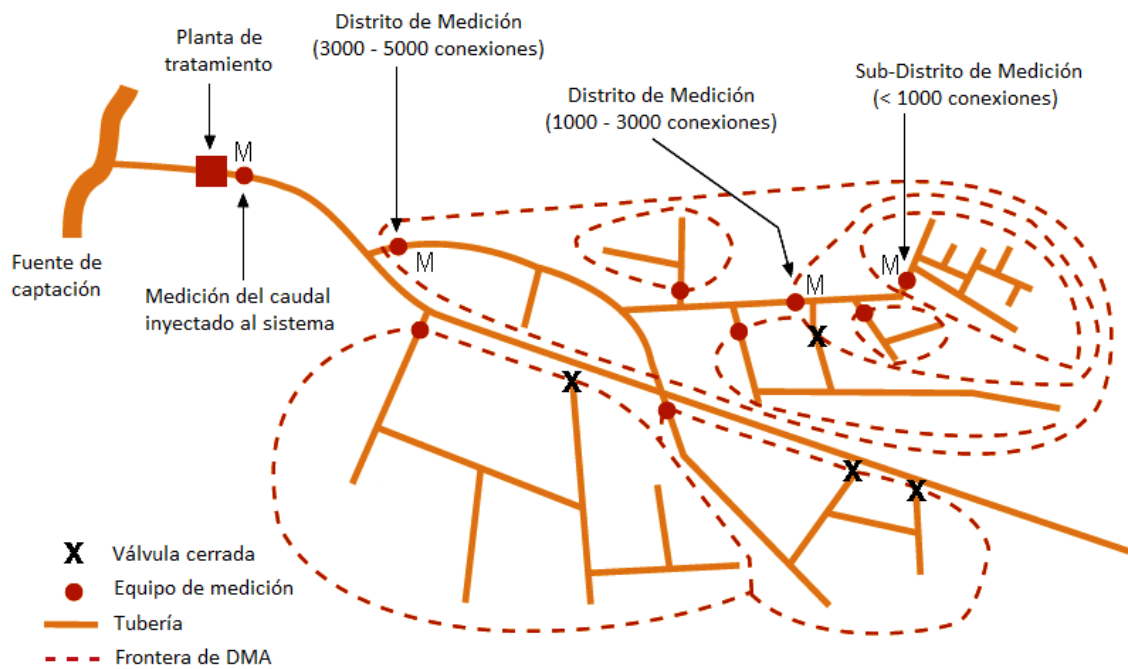


Figura 5 Esquema de una red de distribución dividida en Distritos de Medición (Fuente: Farley, 2001)

La implementación de la medición del caudal por zonas o ‘distritos’ en una red de distribución tiene como objetivo principal el análisis del caudal nocturno inyectado para determinar el nivel de fugas existente en el ‘distrito’ (Farley, 2001; Farley y Trow, 2003). El nivel de fugas en cada distrito se obtiene aplicando el método de caudales nocturnos, que como ya se revisó anteriormente, consiste en sustraer el caudal de uso nocturno estimado del caudal mínimo nocturno inyectado al DMA (Fanner et al, 2007a). Durante este período de tiempo el caudal consumido por los abonados es mínimo, las presiones en la red son altas, y el caudal asociado a las fugas es máximo, tal como se muestra en la Figura 6.

También posible identificar la presencia de nuevas fugas que son reportadas al personal de mantenimiento de redes para su reparación (Fanner et al, 2007a), apoyar la detección de fugas comparando niveles de fuga entre varios ‘distritos’ o ‘sub-distritos’ para direccionar las inspecciones rutinarias de los equipos de localización de fugas (Molina, 2009; De Paola, 2014).

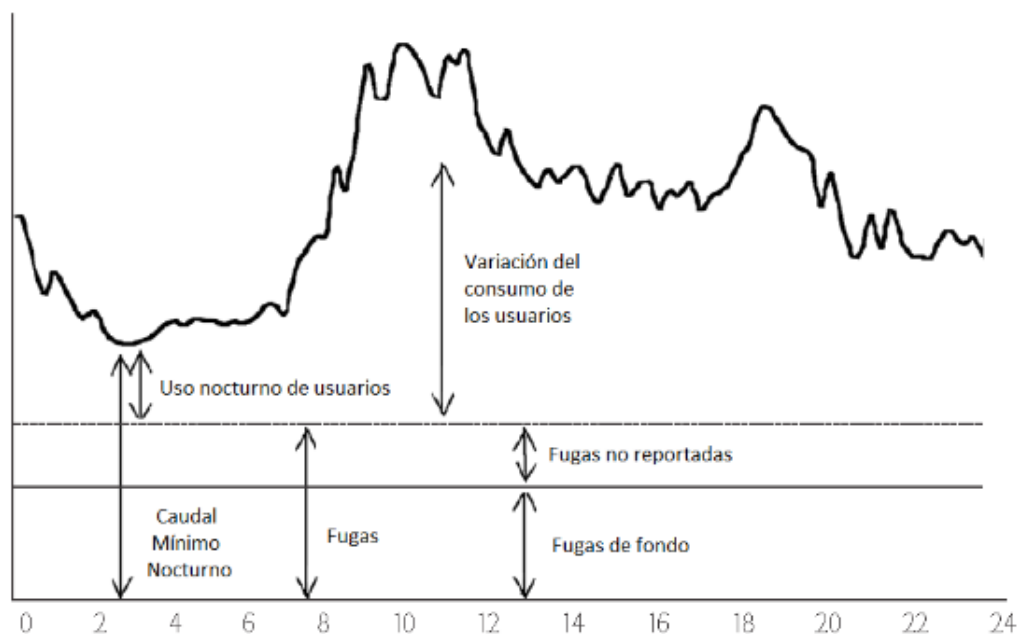


Figura 6 Curva de modulación para 24 horas, del caudal inyectado a un DMA (Fuente: Morrison, 2004)

2.4.4.1 Detección de fugas apoyada en Distritos de Medición

Es necesario realizar una diferenciación entre la simple ‘detección’ de la fuga y la ‘localización’ de la misma. La *detección* es la ubicación de una fuga o fugas en una sección o zona de la red, siendo una actividad que se lleva a cabo de manera rutinaria en toda la red de distribución. La *localización* es la identificación de la ubicación exacta de la fuga en la red de distribución (utilizando equipos acústicos), para su posterior reparación, actividad que se puede realizar independientemente de una previa detección de fugas (Molina, 2009).

Farley (2001) menciona varios métodos para realizar detección de fugas en una red de distribución, entre las cuales se incluyen:

- El cierre nocturno escalonado de tramos de la red, o prueba de ‘Step-Test’.
- La subdivisión del Distrito de Medición en sectores de menor tamaño.

Ambos métodos pueden ser catalogados como pruebas tipo ‘Step-Testing’. Dependiendo de la topología de la red de distribución es posible disponer de más de una alternativa para subdividir un DMA o secuencia de cierre de válvulas, por lo cual el modelo hidráulico de la red puede ayudar a identificar la opción más adecuada (Boulos, 2006).

La prueba de ‘Step-Test’ consiste en la reducción sistemática del área de un DMA mediante el aislamiento de tramos de tubería, acompañado del registro de caudal inyectado al DMA. La prueba tradicional consiste en el aislamiento progresivo de tramos de tuberías mediante el cierre de válvulas empezando por aquellos tramos más alejados del punto de medición de caudal hasta llegar a los tramos próximos al caudalímetro, tras lo cual se procede a la apertura de las válvulas en el orden inverso al seguido durante su cierre (Farley, 2001), y realizando las maniobras de apertura lentamente para evitar transitorios que puedan ocasionar roturas (Boulos, 2006). Durante la prueba se registra la variación del caudal

medido con el cierre de cada tramo de red; de tal forma que el valor de cada disminución de caudal (o ‘escalón’) estará asociado a la demanda total (usos nocturnos + fugas) de un tramo de tubería aislada durante la prueba. De tal forma que una disminución significativa del caudal indica la posible existencia de fugas en el tramo aislado asociado (Farley y Trow, 2003). La Figura 7 presenta un esquema que muestra la subdivisión de la red en tramos de tuberías, necesaria para la ejecución de una prueba de ‘Step Test’. Boulos et al (2006) resalta que para este tipo de prueba, la red de distribución a ser analizada debe estar abastecida desde un único punto de inyección, y en lo posible debe estar ramificada temporalmente a través de válvulas en caso de tener una configuración mallada.

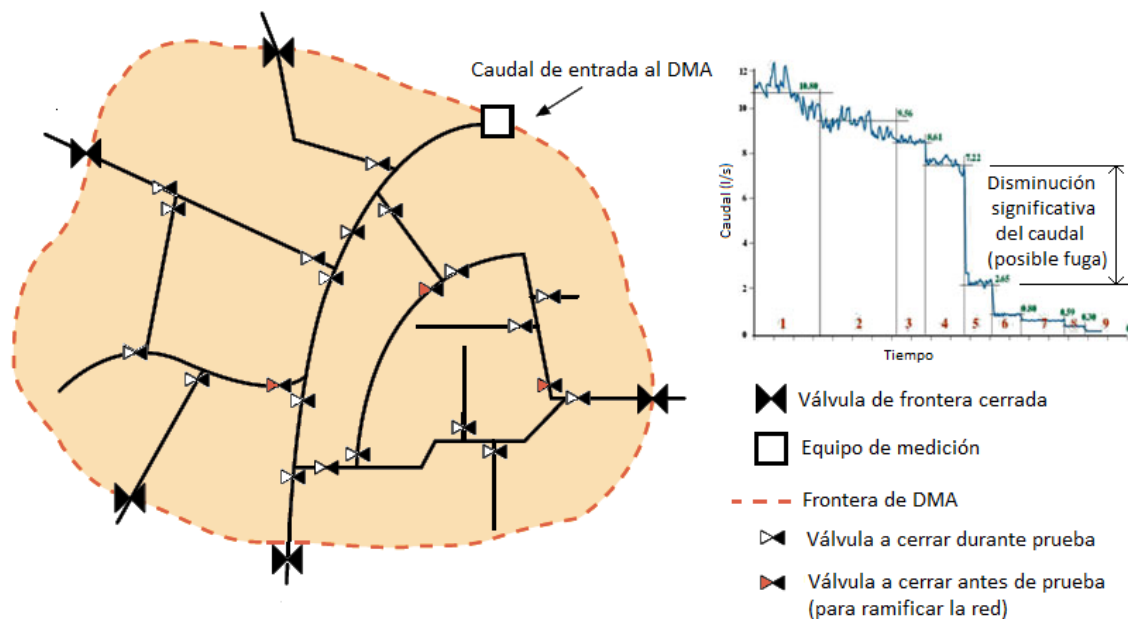


Figura 7 Prueba de ‘Step Test’ del DMA para detección de fugas (Fuente:Farley, 2001)

La *subdivisión del DMA* se realiza mediante el cierre temporal de las válvulas internas del distrito. El cierre de las válvulas se realiza durante la noche, y éstas vuelven a ser abiertas nuevamente antes de la hora de inicio de la demanda. La prueba de subdivisión es monitoreada utilizando el(los) propio(s) caudalímetro(s) instalado(s) en el(los) punto(s) de inyección al DMA, junto con equipos de medición de presión (data-logger) instalados en cada subdivisión. Al final el caudal registrado es comparado con la secuencia de subdivisión del DMA, luego de lo cual las subdivisiones con mayor caudal asociado a fugas serán inspeccionadas con equipos acústicos para su localización (Farley, 2001). La Figura 8 presenta el esquema de las válvulas a cerrar para realizar una prueba de subdivisión del Distrito de Medición.

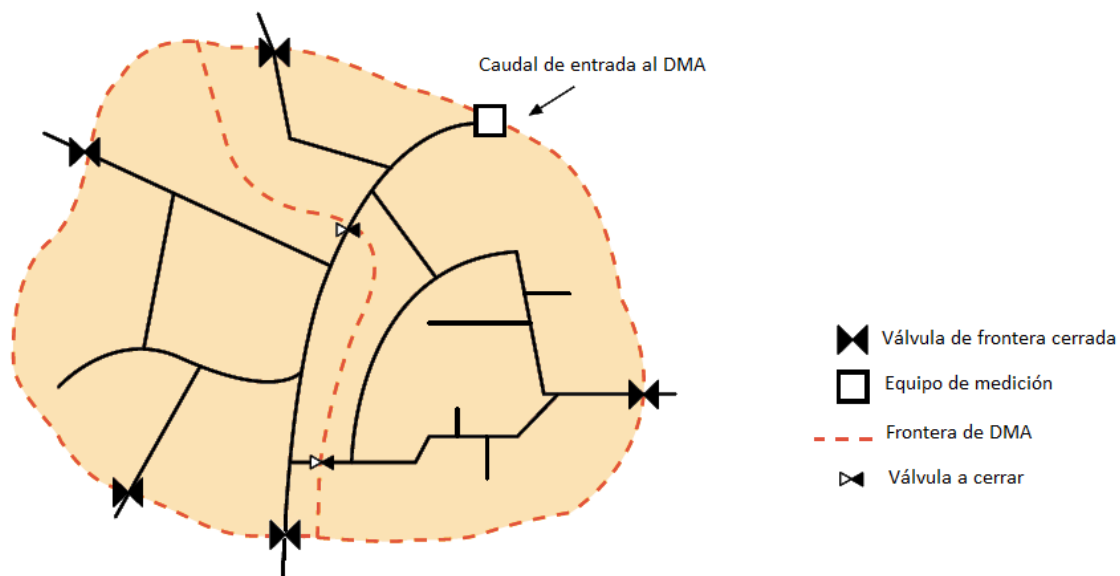


Figura 8 Prueba de subdivisión del DMA para detección de fugas (Fuente: Farley, 2001)

3 PROPUESTA METODOLOGICA

En el estado del arte se identificaron las principales fuentes de error en los modelos de análisis de simulación hidráulica, entre las que se destacan los errores asociados al diámetro y rugosidad de las tuberías, el coeficiente de pérdida de carga en válvulas, y los errores en la distribución espacial y temporal de la demanda. El desarrollo de las técnicas de calibración apoyadas en algoritmos genéticos (AG) ha hecho posible el ajuste simultáneo de los parámetros mencionados. Sin embargo, la implementación de una técnica basada en AG para asistir en el proceso de calibración no siempre es inmediato. Pues, el proceso de calibración puede estar limitado factores como disponibilidad de información relativa a mediciones de caudal y presión, imposibilidad de realizar pruebas de campo para estimar los valores iniciales de los coeficientes de pérdida de carga, y falta de información fiable de la posición de operación de las válvulas.

Es así que se propone una metodología práctica para la calibración preliminar de modelos hidráulicos, fundamentada en varias de las hipótesis utilizadas como formulaciones teóricas para las técnicas de calibración avanzada; capaz de proporcionar una solución al problema de la calibración para redes de distribución con pocas mediciones disponibles y que presenten incertidumbre asociada a la posición de operación de las válvulas existentes.

La propuesta metodológica está estructurada como un proceso iterativo para el ajuste de los emisores de fugas asignados a los nudos del modelo, los coeficientes del patrón de consumo, y las pérdidas de carga en válvulas. De manera específica el método busca obtener los coeficientes del patrón de consumo para la demanda independiente de la presión, estimar el valor del emisor global de fugas y distribuirlo espacialmente, y representar las pérdidas de carga en la red de distribución. Siendo los supuestos de partida, utilizados para la formulación de la metodología, los siguientes:

- Es posible vincular cada abonado con un nudo del modelo hidráulico. Por lo que se sugiere un proceso para la asignación de las cargas del modelo, que es revisado en el apartado 3.1.
- La demanda base es independiente de la presión en la red, y se corresponde con el volumen suministrado a los abonados, y no diferencia entre categorías de consumo; por lo tanto se asume un único patrón de consumo.
- Se supone conocido, o posible de estimar, el volumen no facturado asociado a consumos no registrados autorizados.
- El volumen de agua no registrada estará compuesto por las fugas en la red, y el volumen asociado a errores de medición del contador y consumos no autorizados.
- Las fugas son el mayor componente del caudal de agua no registrada.
- La magnitud de las fugas es sensible al valor de la presión de servicio.
- El efecto de la rugosidad y la reducción del diámetro interno de las tuberías se pueden representar simulando una restricción del flujo mediante pérdidas de carga en puntos específicos de la red. Por lo tanto, el coeficiente de rugosidad en las tuberías no estará

incluido en el proceso de calibración propuesto, y se asumirá la rugosidad de las tuberías constante para toda la red de distribución

- Es posible realizar agrupaciones de tuberías a partir de los límites de la sectorización hidráulica existente.

3.1 Carga del modelo hidráulico

El método propuesto para la asignación de cargas dependerá de la información disponible por el abastecimiento y la forma en cómo está estructurada. Sin embargo, de manera general se siguen los pasos propuestos por Cesario (1995) y Fuertes et al (2002):

- Determinar la curva de patrones de consumo para la demanda base.
- Calcular el caudal medio consumido por cada abonado.
- Ubicar espacialmente a cada abonado y asignarlo a un nudo del modelo.
- Sumar en cada nudo de demanda los caudales correspondientes a todos los abonados que han sido asignados al mismo.
- Asignar el resultado anterior como demanda del nudo correspondiente.
- Asignar a cada nudo de demanda la curva de patrones de consumo.

Se propone cumplir un procedimiento compuesto por las seis etapas siguientes: verificación de la información disponible, estimación del volumen suministrado, definición de los nudos de demanda, cálculo de los caudales de modelación, asignación espacial de los consumos, y estimación inicial del patrón de consumo para la demanda base.

- 1) La *verificación de la información disponible* se realiza comparando los registros de facturación y la base de datos de predios. Esta tarea busca verificar que las bases de datos sean semejantes respecto al número, ubicación espacial y codificación de los abonados pertenecientes a la zona de estudio. En caso de existir errores de omisión o duplicidad en alguna de las bases de datos, éstos deben ser identificados y de ser posible corregidos.
- 2) La *estimación del volumen suministrado* (V_S) parte de la identificación de aquellos abonados que por algún motivo no presentan consumo facturado en el período de cálculo; ya sea porque la cuenta de facturación haya sido dada de baja provisionalmente, exista sospecha de fraude de medición, o exista un posible error en la base de datos de facturación. Para los casos de abonados no facturados o predios incluidos en la base de datos de predios, pero omitidos en la base de datos de facturación (identificados en la etapa previa), se deberá asignar como consumo el volumen consumido promedio del sector, calculado con los registros del volumen facturado a partir de lecturas del consumo.

$$V_S = V_{Fact} + (CC)\bar{V}_C \quad (25)$$

$$\bar{V}_C = \frac{\sum_{k=1}^{DL} V_{Fact_DL}}{DL} \quad (26)$$

En la ecuación 25 V_S es el volumen suministrado estimado, V_{Fact} es el volumen facturado del sector, CC es el número de cuentas con consumo cero o anomalías de facturación, \bar{V}_C es el volumen consumido promedio del sector. En la ecuación 26 DL es el número de abonados facturados a partir de lecturas de consumo, V_{Fact_DL} es el volumen facturado a partir de lecturas de consumo para el abonado k .

- 3) La *definición de los nudos de demanda* en el modelo hidráulico incluye la selección de los nudos del modelo en los cuales se asignará una demanda base, y la representación espacial de éstos. La selección de los nudos de demanda se debe realizar considerando su aptitud para representar la distribución de la demanda en la red de distribución real de manera simplificada.
- 4) El *cálculo de los caudales de modelación* se realiza a partir del balance hídrico técnico, y busca estimar el valor del suministrado y el caudal de fugas, a partir del caudal inyectado a la red de distribución y el volumen suministrado a los abonados. El procedimiento parte de la medición del caudal inyectado a la red de distribución de manera continua entre 24 horas y 7 días. El caudal suministrado se calcula a partir del volumen suministrado a los abonados (estimado anteriormente) y la base de tiempo utilizado para la facturación. El caudal de agua no registrada se estima mediante la diferencia entre el caudal inyectado y el caudal suministrado a los abonados.

$$\bar{Q}_{iny} = \bar{Q}_S + \bar{Q}_{ANR} \quad (27)$$

Donde \bar{Q}_{iny} es el caudal medio de inyección a la red, \bar{Q}_S es el caudal suministrado a los abonados, \bar{Q}_{ANR} es el caudal medio de agua no registrada. Una vez obtenido y validado el caudal de fugas, se procederá a dar por válido el caudal de consumos para cada abonado; y se los asignará en los elementos respectivos de la base de datos del SIG. Para esta tarea, se deberá utilizar una función de enlace entre la capa de predios del SIG y una tabla con los consumos.

- 5) La *asignación espacial de los consumos* incluye la creación de un punto de demanda para cada predio, la construcción de 'polígonos de servicio', el cálculo de la demanda base por cada polígono, y la asignación de la demanda base en los nudos del modelo hidráulico. La creación del punto de demanda de cada predio permitirá representar espacialmente el consumo de cada abonado. Por otro lado, se deben construir tantos polígonos como nudos de demanda existan. Es así que cada nudo de demanda estará contenido en el interior de un polígono, cuyos límites definirán su área de servicio (ver Figura 9).

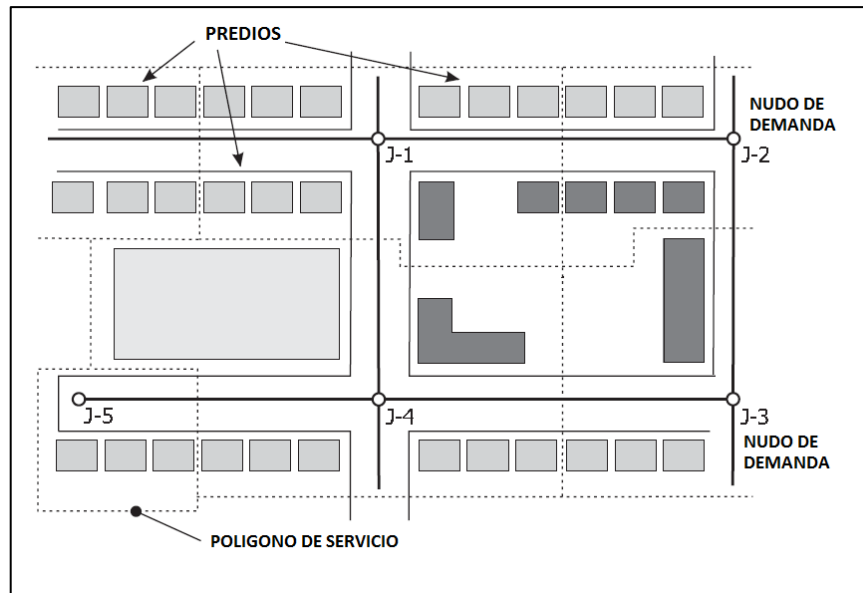


Figura 9 Esquema de polígonos de servicio y nudos de demanda (Fuente: Walski et al, 2007)

El cálculo de la demanda base para cada polígono consistirá en la sumatoria de los consumos cuyos puntos de demanda se encuentren en el interior de éstos. Finalmente, la demanda base de cada polígono debe ser asignada al nudo correspondiente del modelo hidráulico. Al finalizar este proceso el caudal medio suministrado debe ser igual a la sumatoria de los caudales asignados como demanda base a los nudos de demanda.

$$\sum_{j=1}^{ND} q_{ab,j} = \bar{Q}_S \quad (28)$$

Donde $q_{ab,j}$ es la demanda base asignada al nudo de demanda j , ND es el número de nudos de demanda en el modelo hidráulico, \bar{Q}_S es el caudal medio suministrado a los abonados

- 6) Para la *estimación inicial del patrón de consumo* se utiliza la serie de medida del caudal inyectado y el valor del caudal promedio inyectado. La serie de medida debe ser continua y tener un intervalo de tiempo de por lo menos una hora entre cada registro de caudal. Es así que los factores multiplicadores de la demanda base para cada instante t serán calculados como el cociente entre el caudal en el instante t y el valor del caudal medio inyectado (Ec. 29).

$$C_m(t) = \frac{Q_{iny}(t)}{\bar{Q}_{iny}} \quad (29)$$

Donde $C_m(t)$ es el coeficiente de modulación de la demanda base para el instante t , $Q_{iny}(t)$ es el caudal inyectado para el instante t , \bar{Q}_{iny} es el caudal medio de inyección a la red. La curva de coeficientes de consumo obtenida será definida en el simulador hidráulico como primera aproximación del patrón de consumo para la demanda base asignada en los nudos de demanda del modelo hidráulico.

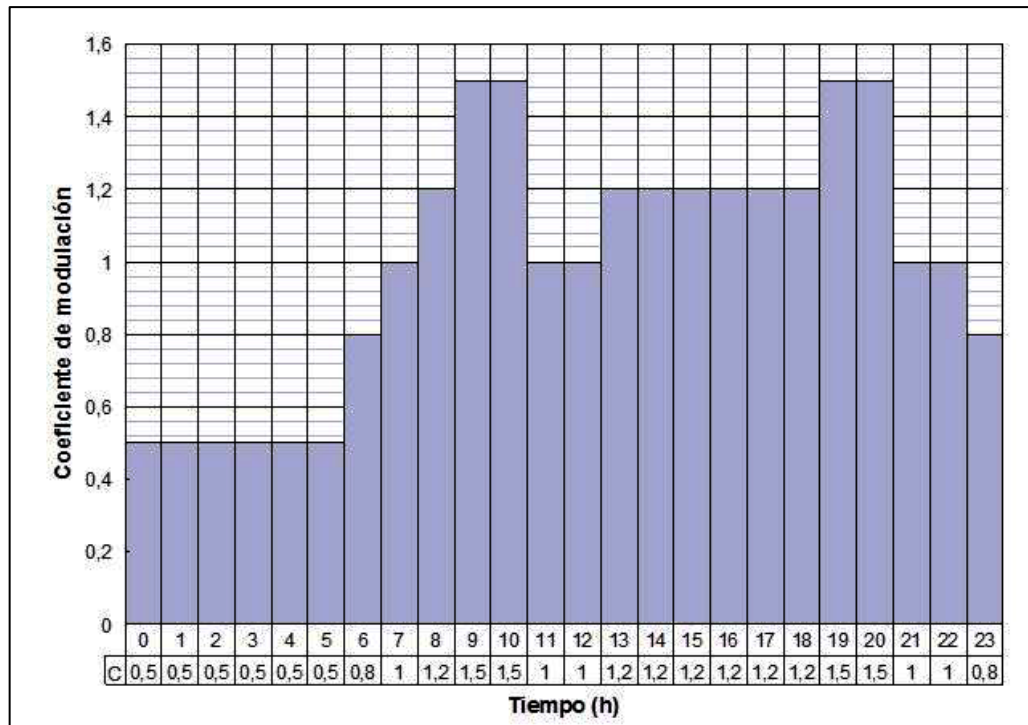


Figura 10 Ejemplo gráfico de coeficientes del patrón de consumo para la demanda base (Fuente: Iglesias y Martínez, 2012)

3.2 Ajuste de los parámetros de calibración del modelo

Tal como se mencionó anteriormente, la metodología propuesta para la calibración del modelo, considera como objetivos de la calibración determinar un coeficiente emisor de fugas en cada nudo del modelo a partir de un emisor global para toda la red de distribución, realizar el ajuste de los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base, y representar las pérdidas de carga en válvulas. En los párrafos siguientes se revisarán las ecuaciones de partida para la formulación del método propuesto, y utilizadas en el proceso de calibración de cada uno de los objetivos mencionados.

Para modelar las fugas en los nudos del modelo hidráulico se utilizará la ecuación de emisores de flujo definida en EPANET (Ec. 30); la cual considera que éstas pueden ser representadas como válvulas de descarga libre a la atmósfera, tal como se muestra en la Figura 11.

$$q_{F,i}(t) = C_{e,i}[P_i(t)]^N \quad (30)$$

Donde $q_{F,i}(t)$ es el caudal de fuga en el nudo i para el instante t , $C_{e,i}$ es el coeficiente emisor de fugas en el nudo i , $P_i(t)$ es la presión en el nudo i para el instante t , y N es el exponente de fugas.

En este trabajo, N es igual a 0.5, que corresponde al valor teórico del exponente de fugas.

Para cualquier instante t , la demanda total en el nudo i puede ser expresada como la sumatoria de la demanda independiente de la presión (consumo) y la demanda dependiente de la presión (fugas).

$$q_{T,i}(t) = q_{C,i}(t) + q_{F,i}(t) \quad (31)$$

$$q_{T,i}(t) = C_{c,i}(t)q_{ab,i} + C_{e,i}[P_i(t)]^{0.5} \quad (32)$$

En la ecuación 31 $q_{C,i}(t)$ es el caudal de consumo en el nudo i para el instante t , $q_{F,i}$ es el caudal de fugas en el nudo i para el instante t . En la ecuación 32 $C_{c,i}$ es el coeficiente de consumo del nudo i para el instante t , $q_{ab,i}$ es la demanda base del nudo i , $C_{e,i}$ y $P_i(t)$ ya han sido definidas anteriormente. Por último, $q_{T,i}(t)$ es la demanda total del nudo i para el instante t en ambas ecuaciones. La Figura 11 representa gráficamente el consumo y el caudal de fugas en el nudo i para el instante t .

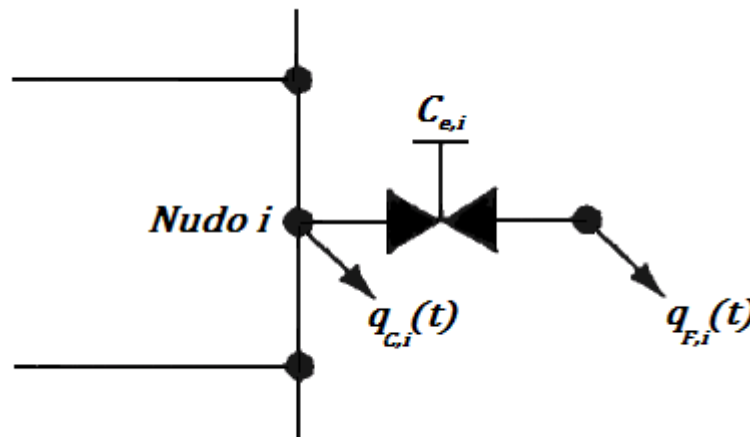


Figura 11 Esquema de demandas en los nudos del modelo hidráulico (Adaptado de Vela et al, 1994)

Para obtener una expresión que permita estimar el valor del coeficiente emisor de fugas para toda la red de distribución tomamos como base la ecuación 32, la cual es posible escribir la ecuación para el balance hídrico en términos volumen; donde T es el número total de instantes de simulación, ND es el número total de nudos del modelo, y Δt es el intervalo de tiempo t entre cada instante de cálculo.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) \Delta t = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} C_{c,i}(t)q_{ab,i} \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} C_{e,i}[P_i(t)]^{0.5} \Delta t \quad (33)$$

Si el emisor de fugas es igual para todos los nudos del modelo (o un sector del modelo) podemos definir un emisor global de fugas repartido equitativamente entre los nudos de demanda ND :

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global}}{ND} \quad (34)$$

De igual manera podemos considerar un único coeficiente de consumo $C_c(t)$ para todos los nudos del modelo hidráulico:

$$C_c(t) = C_{c,i}(t) \quad (35)$$

Para realizar el balance de volúmenes en la red de distribución podemos partir de la ecuación 33, sin incluir Δt ; la cual es posible reescribir considerando las ecuaciones 34 y 35.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) = C_c(t) \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} q_{db,i} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} \frac{C_{e,global}}{ND} [P_i(t)]^{0.5} \quad (36)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) = C_c(t) \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} q_{db,i} + C_{e,global} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} \frac{[P_i(t)]^{0.5}}{ND} \quad (37)$$

$$\sum_{t=1}^T Q_{T,sim}(t) = C_c(t) \sum_{t=1}^T Q_C + C_{e,global} \sum_{t=1}^T [\bar{P}(t)]^{0.5} \quad (38)$$

En la ecuación 38 $Q_{T,sim}(t)$ es el caudal total simulado para el instante t , Q_C es el caudal consumido por todos los nudos del modelo, $C_c(t)$ es el coeficiente de consumo para el instante t , $\bar{P}(t)$ la presión promedio para toda la red en el instante t , T es el número total de instantes de simulación.

Finalmente, es posible realizar el balance considerando todos los instantes de simulación, con lo cual tendríamos:

$$\bar{Q}_{T,sim} = Q_C + C_{e,global}(\bar{P})^{0.5} \quad (39)$$

Donde $\bar{Q}_{T,sim}$ es el caudal promedio total simulado, Q_C es el caudal consumido por todos los nudos del modelo, $C_{e,global}$ es el emisor global de fugas, \bar{P} es la presión promedio en la red para todos los instantes de simulación. Despejando la ecuación 36 tenemos:

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{iny} - \bar{Q}_S}{(\bar{P})^{0.5}} \quad (40)$$

Y considerando que el numerador de esta expresión es equivalente al caudal medio de fugas estimado para la red de distribución, obtenemos la ecuación requerida para estimar el valor del coeficiente emisor de fugas para toda la red de distribución:

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{ANR}}{(\bar{P})^{0.5}} \quad (41)$$

Por otro lado, tomando como base la ecuación 32 también es posible escribir una ecuación para el balance hídrico en términos de caudal.

$$\sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) = \sum_{i=1}^{ND} C_{c,i}(t) q_{db,i} + \sum_{i=1}^{ND} C_{e,i} [P_i(t)]^{0.5} \quad (42)$$

La ecuación 42 puede ser reescrita considerando las ecuaciones 34 y 35, para un emisor global de fugas repartido equitativamente entre los nudos de demanda ND y un único coeficiente de consumo para todos los nudos del modelo hidráulico.

$$\sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) = C_c(t) \sum_{i=1}^{ND} q_{db,i} + \sum_{i=1}^{ND} \frac{C_{e,global}}{ND} [P_i(t)]^{0.5} \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^{ND} q_{T,i}(t) = C_c(t) \sum_{i=1}^{ND} q_{ab,i} + C_{e,global} \sum_{i=1}^{ND} \frac{[P_i(t)]^{0.5}}{ND} \quad (44)$$

$$Q_{T,sim}(t) = C_c(t) Q_C + C_{e,global} [\bar{P}(t)]^{0.5} \quad (45)$$

Los términos $Q_{T,sim}(t)$, Q_C , $C_c(t)$ y $\bar{P}(t)$ tienen la misma definición que para la ecuación 38.

3.2.1 Calibración del emisor global de fugas.

El proceso para la calibración del emisor de fugas consiste en realizar una primera aproximación del valor, obtenida a partir del balance de los volúmenes de entrada y salida del sistema; y posteriormente un proceso iterativo hasta alcanzar los criterios de calibración definidos. Para la primera aproximación del emisor global de fugas se utiliza la ecuación 40 considerando las siguientes hipótesis de partida:

- i) El caudal medio total simulado ($\bar{Q}_{T,sim}$) es equivalente al caudal medio inyectado (\bar{Q}_{iny}).
- ii) El caudal consumido (Q_C) es conocido y corresponde al caudal medio suministrado a los abonados (\bar{Q}_S).
- iii) La presión promedio de la red para todos los instantes de tiempo t puede ser obtenida mediante simulación hidráulica.

En la primera simulación, el modelo debe estar cargado únicamente con las demandas independientes de la presión y el patrón de consumos inicialmente estimado [$C_m(t)$]. Conocidos el caudal estimado de fugas y la presión promedio en la red se calcula el coeficiente emisor global y se distribuye equitativamente a cada nudo del modelo utilizando la ecuación 34. Los emisores de fugas calculados son incorporados a los nudos del modelo, y una nueva simulación es realizada para obtener el caudal de fugas.

A partir de la tercera simulación el emisor de fugas de la iteración n es ajustado mediante un factor corrector que ajusta el valor del emisor de fugas de la iteración anterior (ver Ec. 46). El factor de corrección es calculado mediante la ecuación 47.

$$C_{e,global}^n = FC \cdot C_{e,global}^{n-1} \quad (46)$$

$$FC = \frac{\bar{Q}_{ANR}}{\bar{Q}_{F,sim}} \quad (47)$$

En la ecuación 46 $C_{e,global}^n$ es el coeficiente emisor de fugas del instante j , y $C_{e,global}^{n-1}$ es el coeficiente emisor de fugas del instante anterior a j . En la ecuación 47 \bar{Q}_{ANR} es el caudal teórico de fugas (caudal de agua no registrada) y $\bar{Q}_{F,sim}$ es el caudal medio de fugas obtenido mediante simulación. En ambas ecuaciones FC es el factor de corrección del emisor global de fugas.

Este proceso se repite hasta que la presión promedio en los nudos de demanda sea considerada constante para dos iteraciones sucesivas y el caudal medio de fugas simulado se aproxime al caudal medio de fugas teórico con un nivel de precisión previamente definida en función del propósito del modelo.

$$|\bar{P}_i^n - \bar{P}_i^{n-1}| \leq \varepsilon \quad (48)$$

$$\left| \left(\bar{Q}_{T,sim} - \sum_{i=1}^{ND} q_{db,i} \right) - \bar{Q}_{ANR} \right| \leq \varepsilon \quad (49)$$

Donde $\bar{P}_i^{(n)}$ es la presión promedio en el nudo i para la simulación n , $\bar{P}_i^{(n-1)}$ es la presión promedio en el nudo i en la simulación anterior a n , $\bar{Q}_{T,sim}$ es el caudal medio total simulado, ND es el número de nudos de demanda en el modelo, $q_{db,i}$ es la demanda base en el nudo i , \bar{Q}_F es el caudal medio de fugas estimado, ε es el margen de error admisible en función del nivel de precisión deseado en el modelo.

3.2.2 Calibración del patrón de consumo de la demanda base

El enfoque para la calibración del patrón de consumo involucra el cálculo de los coeficientes de consumo de la demanda base para todos los instantes t de simulación; tomando como punto de partida el resultado del proceso de calibración del emisor global de fugas. El método considera que el consumo para el tiempo t está restringido por el caudal de fuga simulado y el caudal inyectado medido (ver Figura 12). Esta hipótesis permitirá ajustar la demanda total del modelo, en cada instante de tiempo t , a la distribución temporal del volumen de fugas, obtenida en el proceso de calibración del emisor de fugas.

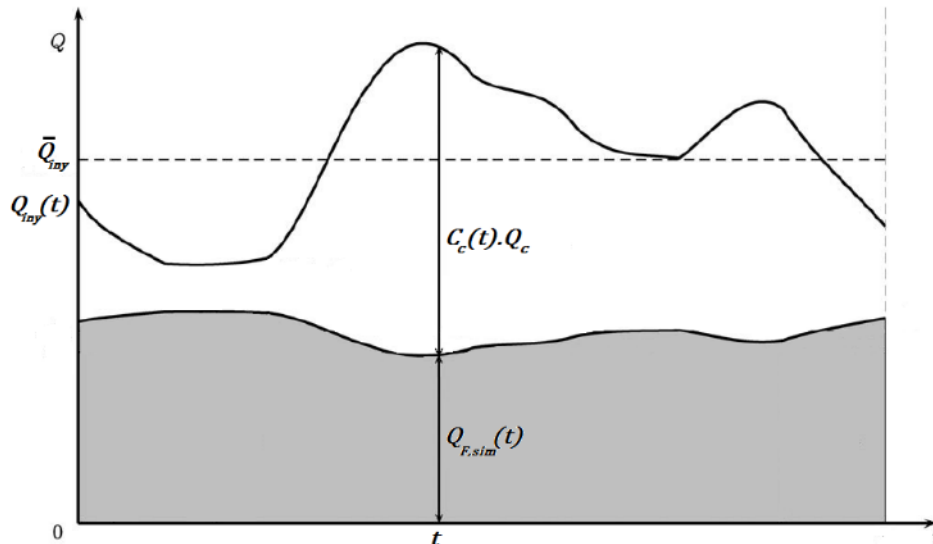


Figura 12 Representación gráfica de la hipótesis utilizada para la calibración de los coeficientes del patrón de consumo (Adaptado de Nicolini et al, 2011)

Es así que para el cálculo de los coeficientes se utilizará la ecuación 50 (obtenida a partir de la ecuación 45), en donde el término correspondiente al caudal de fugas debe ser obtenido indirectamente de los resultados de simulación del modelo (Ec. 51).

$$C_c(t) = \frac{Q_{iny}(t) - Q_{F,sim}(t)}{Q_C} \quad (50)$$

$$Q_{F,sim}(t) = Q_{T,sim}(t) - C_m(t)Q_C \quad (51)$$

En la ecuación 50 $C_c(t)$ es el coeficiente del patrón de consumo para el instante t , $Q_{iny}(t)$ es el caudal inyectado medido en el tiempo t , Q_C es el caudal de consumo. En la ecuación 51 $Q_{T,sim}(t)$ es el caudal total simulado para el instante t , $C_m(t)$ es el coeficiente de modulación estimado inicialmente, y utilizado en el proceso de calibración del emisor global de fugas. En ambas ecuaciones $Q_{F,sim}(t)$ es el caudal simulado de fugas para el tiempo t .

Con este proceso se espera alcanzar un error cuadrático medio, entre el caudal inyectado medido y el caudal total simulado sea mínimo, tal que la precisión de los resultados simulados sea de $\pm 5\%$ o $\pm 10\%$ según el criterio de ECAC-AWWA (1999). Finalmente se deberá realizar una nueva comprobación del criterio de calibración para el emisor global de fugas, y en caso de necesitarlo, se realizará un nuevo ajuste.

3.2.3 Calibración de las pérdidas de carga en la red

La pérdida de carga que tiene lugar en una red de distribución representa la pérdida de energía del flujo hidráulico a lo largo de la misma por efecto del rozamiento en las tuberías (pérdidas continuas), y aquellas debidas al fenómeno de turbulencia provocada por elementos de unión o control instalados en la red (pérdidas localizadas).

Si se supone un tramo de red de distribución sin cambios de diámetro en las tuberías ni variaciones en la elevación, el único tipo de energía que puede perderse por el movimiento del fluido es la energía de presión. Esta pérdida de carga puede ser calculada a partir de la ecuación:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (52)$$

donde h_f es la energía por unidad de peso perdida por fricción, f es el factor de fricción de Darcy, L es la longitud del tramo de la tubería en cual se pierde carga, D es el diámetro de la tubería, v es la velocidad media en el tramo de tubería analizado. Y en donde el factor de fricción es función compleja del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad (k_s). Sin embargo, en ocasiones el ajuste de la rugosidad como parámetro característico de la resistencia hidráulica de la conducción no es suficiente (Fuertes et al, 2002). Pues, en las tuberías pueden existir rugosidades cuya magnitud no se corresponden con lo que se puede entender por rugosidad superficial de la tubería.

La pérdida de carga en válvulas puede obtenerse mediante la ecuación:

$$h_v = k(\theta) \frac{v^2}{2g} \quad (53)$$

donde h_v es la pérdida de carga debido a la válvula, $k(\theta)$ es el coeficiente de pérdidas adimensional, v es la velocidad de flujo a través de la válvula. Iglesias y Martínez (2012) presentan una curva que muestra la relación entre el grado de apertura de una válvula y el coeficiente adimensional de pérdidas (Figura 13). Éste proporciona una idea del orden de magnitud del coeficiente de pérdidas para distintos grados de apertura.

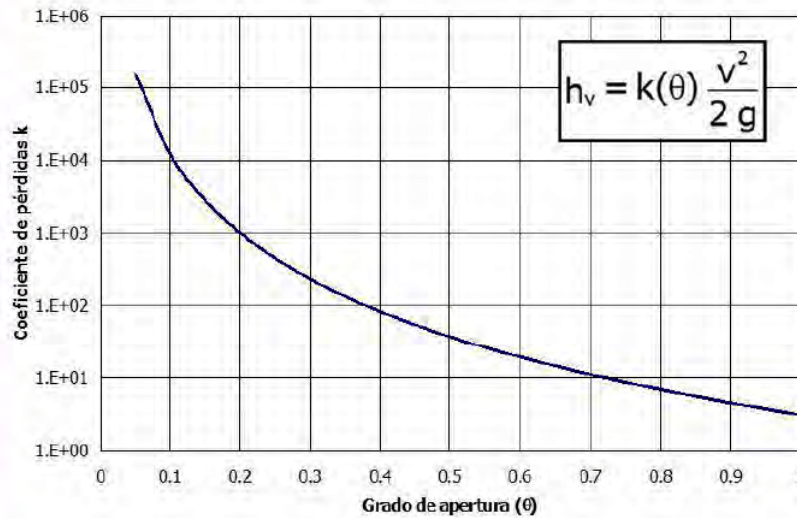


Figura 13 Curva coeficiente de pérdidas adimensional vs. Grado de apertura de válvula (Fuente: Iglesias y Martínez, 2012)

Es posible expresar las ecuaciones para pérdidas de carga en tuberías (Ec. 52) y válvulas (Ec. 53) en términos de caudal trasegado (Q) y diámetro (D):

$$h_f = \frac{8fL}{\pi^2 D^5 g} Q^2 \quad (54)$$

$$h_v = \frac{8k(\theta)}{\pi^2 D^4 g} Q^2 \quad (55)$$

A su vez, estas ecuaciones pueden ser expresadas en función de coeficientes de resistencia:

$$h_f = K_f Q^2 \quad (56)$$

$$h_v = K(\theta) Q^2 \quad (57)$$

Donde K_f es el coeficiente de resistencia de la instalación, $K(\theta)$ es el coeficiente de resistencia de la válvula en función del grado de apertura θ , Q es el caudal trasegado.

A partir de lo expuesto en los párrafos anteriores, es posible suponer que en una red de distribución pueden existir válvulas que generen una pérdida de carga significativa, y determinen su comportamiento hidráulico por sobre el efecto de la fricción en las tuberías. Es decir, es posible que el coeficiente de resistencia de la válvula $K(\theta)$ sea significativamente mayor que el coeficiente de resistencia de la instalación K_f . Este sería el caso de las válvulas restringidas o parcialmente cerradas. En relación a lo expuesto Larado (2012) señala su importancia, pues una pequeña diferencia en la apertura puede hacer una gran diferencia en la pérdida de carga a través de la válvula. Es así que considerando el desconocimiento del

abastecimiento respecto al grado de apertura de las válvulas de paso instaladas en la red de distribución, se propone utilizar los coeficientes de pérdidas de carga para representar las válvulas parcialmente cerradas.

El proceso de calibración de las pérdidas de carga en el modelo hidráulico parte del escenario obtenido luego de la calibración del emisor global de fugas y del patrón de consumo de la demanda base. Y consiste en el ajuste del coeficiente de pérdidas adimensional (k) en aquellas tuberías del modelo correspondientes a abastecimientos de los sectores o válvulas de paso que se consideren relevantes para el desempeño hidráulico de la red.

El criterio de calibración de este parámetro está asociado a la diferencia entre los valores de las presiones observadas (medidas en campo) y las presiones simuladas correspondientes a puntos de calibración definidos previamente. De manera específica se debe minimizar el error cuadrático medio entre los valores simulados y observados, de tal forma que la precisión de los datos de presión simulados tenga un orden de magnitud de $\pm 1.4mca$ o $\pm 3.5mca$; según sea el caso en función del propósito del modelo hidráulico de acuerdo a los criterios de ECAC-AWWA (1999).

3.2.4 Calibración de los emisores de fugas distribuidos espacialmente.

Para distribuir espacialmente las fugas en los nudos del modelo hidráulico se utiliza un coeficiente de fuga por unidad de longitud de red. El caudal de fuga para cada nudo del modelo será calculado utilizando la expresión basada en la propuesta por Germanopoulos (1985):

$$q_{F,i}(t) = \sum_{j=1}^{NT} \beta_{k,j} \frac{L_{j,i}}{2} [P_i(t)]^N \quad (58)$$

donde $q_{F,i}(t)$ es el caudal de fugas en el nudo i para el instante t , $\beta_{k,j}$ es el coeficiente de fuga por unidad de longitud de red para el sector k asignado a la tubería j , $L_{j,i}$ es la longitud de tubería j conectada al nudo i , $P_i(t)$ es la presión en el nudo i para el instante t , N es el exponente de fugas que para la metodología propuesta corresponderá al valor teórico 0.5, NT es el número de tuberías conectadas al nudo i .

Es así luego de la distribución espacial de las fugas en el modelo hidráulico cada nudo i tendrá asignado un emisor de fugas ($C_{e,i}$) que dependerá del 50% de longitud de las tuberías conectadas al nudo i , y del coeficiente de fuga por unidad de longitud de red correspondiente al sector k al que pertenezca.

$$C_{e,i} = \beta_{k,j} \sum_{j=1}^{NT} \frac{L_{j,i}}{2} \quad (59)$$

El proceso de calibración para los emisores distribuidos espacialmente es similar al utilizado para calibrar el coeficiente global de fugas. En este caso, se realiza el ajuste de la sumatoria de los emisores en todos los nudos del modelo mediante un factor de corrección que modifica el valor de la sumatoria de los emisores de fugas para la iteración anterior.

$$\sum_{i=1}^{ND} C_{e,i}^n = FC \cdot \sum_{i=1}^{ND} C_{e,i}^{n-1} \quad (60)$$

En la ecuación 46 $C_{e,i}^n$ es el coeficiente emisor de fugas del nudo i en la iteración n , y $C_{e,i}^{n-1}$ es el coeficiente emisor de fugas del nudo i en la iteración anterior, FC es el factor de corrección del emisor global de fugas presentado en la ecuación 47.

Al igual que en el proceso de calibración del coeficiente emisor global de fugas, este proceso se repite hasta que la presión promedio en los nudos de demanda sea considerada constante para dos iteraciones sucesivas y el caudal medio de fugas simulado se aproxime al caudal medio de fugas teórico.

El valor del coeficiente de fuga $\beta_{k,j}$ se calcula multiplicando el emisor global de fugas calibrado por un factor de ponderación obtenido a partir de los resultados de pruebas de detección de fugas. El factor de ponderación para el sector k corresponderá al peso porcentual del indicador de fugas obtenido para el sector k respecto a la sumatoria de indicadores de fugas de cada sector definido en la red.

$$\beta_k = \frac{W_k C_{e,global}}{L_k} \quad (61)$$

$$W_k = \frac{IF_k}{\sum_{k=1}^{NS} IF_k} \quad (62)$$

donde β_k es el coeficiente de fuga por unidad de longitud de tubería para el sector k , W_k es el factor de ponderación del emisor global de fugas para el sector k , $C_{e,global}$ es el emisor global de fugas, L_k es la longitud total de red existente en el sector k , IF_k es el indicador de fugas para el sector k , NS es el número de sectores definidos en la red de distribución.

El cálculo del indicador de fugas para los sectores definidos en la zona de estudio se basa en el método de caudales nocturnos, que fue revisado en el apartado 2.4.2. Este método parte del supuesto que el caudal nocturno está compuesto por los usos nocturnos y las fugas en la red de distribución, y que se muestra a través de la Figura 14.

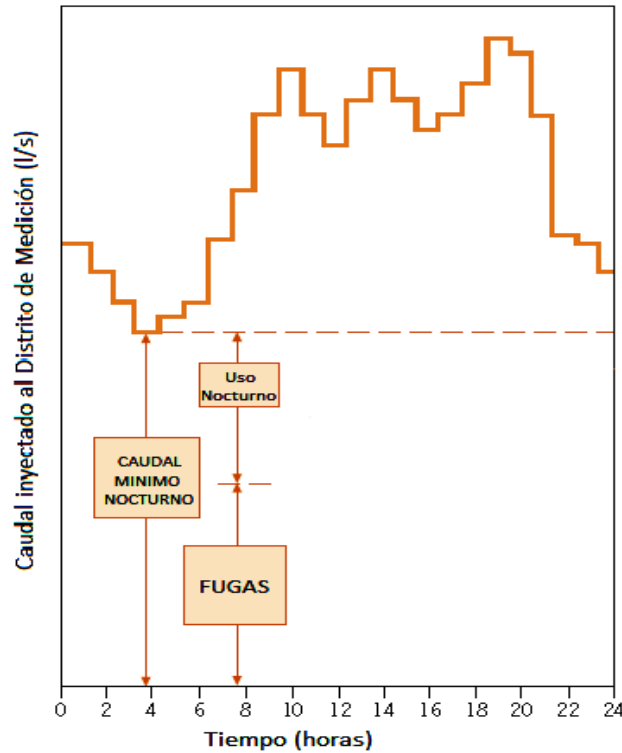


Figura 14 Componentes del caudal mínimo nocturno (Adaptado de Farley, 2001)

El uso nocturno se estima a través del producto entre el consumo promedio del sector y el valor promedio de los coeficientes del patrón de consumo calibrado pertenecientes al intervalo de tiempo en que se presenta el caudal mínimo nocturno. Para el caso de la red de distribución de Guayaquil el caudal mínimo nocturno ocurre entre las 02h00 y 04h00. El proceso descrito puede expresarse matemáticamente como:

$$IF_k = \frac{Q_{CMN,k} - \bar{C}_c Q_{C,k}}{(P_{CMN,k})^{0.5}} \quad (63)$$

donde, IF_k es el indicador de fugas del sector k , $Q_{CMN,k}$ es el caudal mínimo nocturno del sector k , \bar{C}_c es el coeficiente de consumo promedio en el intervalo del caudal mínimo nocturno, $Q_{C,k}$ es el caudal de consumo del sector k , $P_{CMN,k}$ es la presión en la red del sector k instantes antes del cierre del sector k .

Un método para obtener el indicador de fugas para las subdivisiones de red definidas en un Distrito de Medición es a través de pruebas de detección de fugas. Las pruebas de detección de fugas a realizar consisten en la subdivisión del Distrito de Medición (zona de estudio) mediante el cierre temporal de las válvulas de abastecimiento a cada sector de la red. El cierre de cada sector es asociado con la variación del caudal registrado en el punto de inyección. La diferencia de caudal para cada sector se considera como la demanda total del sector (usos nocturnos + fugas).

3.3 Resumen del procedimiento de calibración

Una vez revisados los procesos unitarios de la metodología propuesta, se presenta un resumen del procedimiento recomendado para su aplicación y un diagrama de flujo asociado a este (ver Figura 15).

1. Preparar los datos de calibración, asegurando la mayor precisión posible. Realizar la carga del modelo asignando a cada nudo la demanda independiente de la presión, y el patrón de consumos, estimado a partir de la serie de datos del caudal inyectado.
2. Realizar la estimación inicial del emisor global de fugas. Se realiza una primera simulación del modelo para obtener el valor de la presión promedio para toda la red y todos los instantes de simulación. Este valor se utiliza conjuntamente con el valor teórico de agua no registrada (ANR) para calcular el coeficiente emisor global de fugas. Éste último se distribuye equitativamente a cada nudo del modelo. Realizar una nueva simulación.
3. Evaluar la precisión de la estimación del caudal de fugas simulado, comparándolo con el caudal teórico de agua no registrada. En caso de no cumplimiento se debe ajustar el valor del coeficiente emisor mediante un factor de corrección. Incorporar los emisores de fugas corregidos a los nudos del modelo, y realizar una nueva simulación.
(Repetir este proceso hasta el cumplimiento de los criterios mencionados)
4. Determinar los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base. Asignar el patrón calculado a los nudos del modelo hidráulico, y realizar una nueva simulación.
5. Repetir el paso 3.
6. Distribuir espacialmente el coeficiente global de fugas entre los nudos del modelo hidráulico, en función del coeficiente de fuga por unidad de longitud de tuberías, calculado para cada sector de la red. Realizar una nueva simulación.
7. Evaluar la precisión de la estimación del caudal de fugas simulado, comparándolo con el caudal teórico de agua no registrada. En caso de no cumplimiento se debe ajustar el valor de la sumatoria de los coeficientes emisores de fugas mediante un factor de corrección. Incorporar los emisores de fugas corregidos a los nudos del modelo, y realizar una nueva simulación.
8. Evaluar la precisión de las presiones simuladas, comparándolas con las presiones medidas. Ajustar el valor del coeficiente de pérdidas de carga para las líneas seleccionadas previamente hasta alcanzar el margen de error admisible definido previamente.
9. Repetir el paso 7.
10. Determinar nuevamente los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base. Asignar el nuevo patrón calculado a los nudos del modelo hidráulico, y realizar una nueva simulación.
11. Repetir el paso 7.

La validación de este proceso se aborda en el capítulo siguiente.

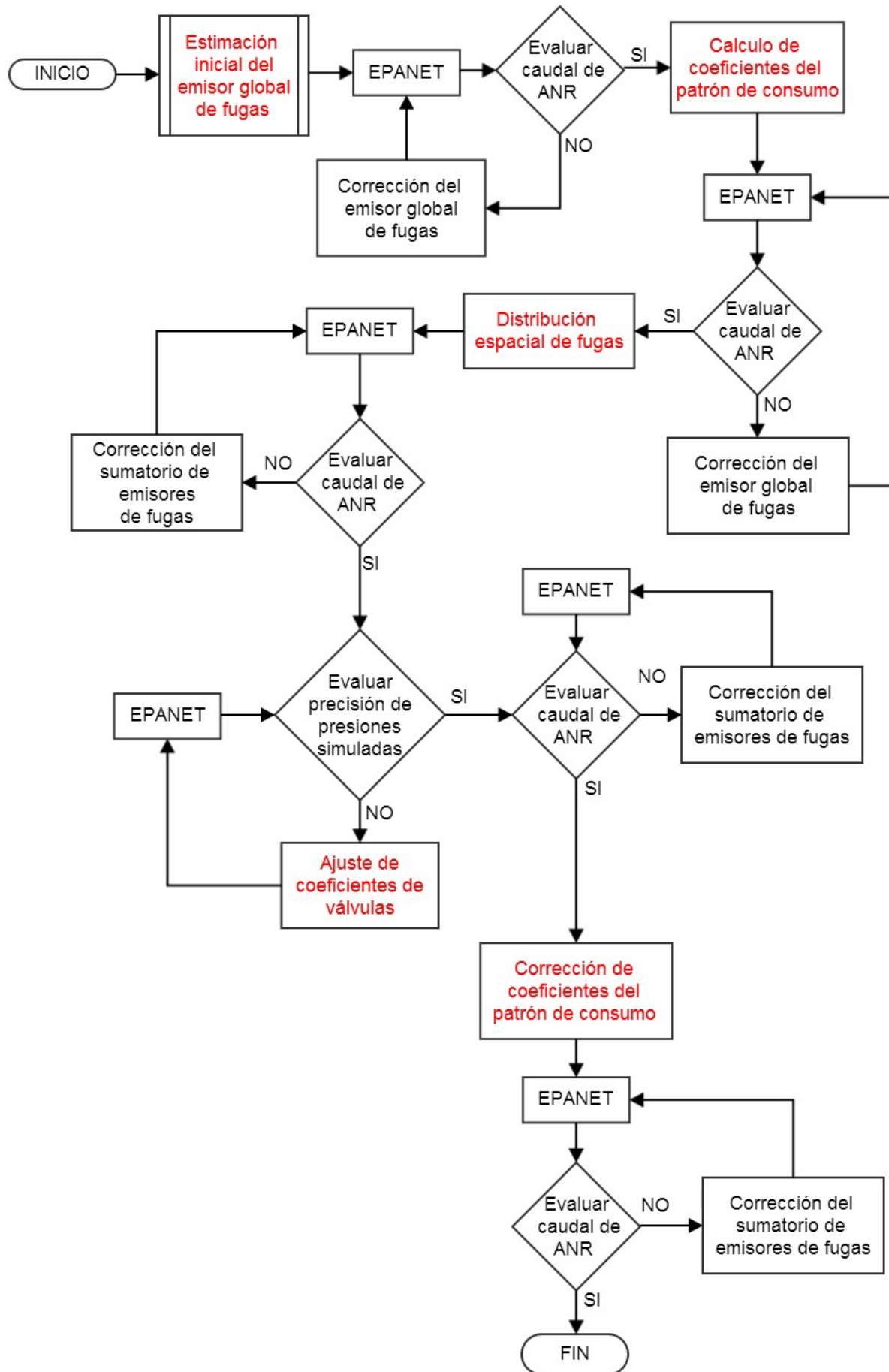


Figura 15 Diagrama de flujo de la metodología propuesta

4 CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan tres casos de aplicación directa de la metodología propuesta en este Trabajo de Fin de Máster (TFM). Los casos de estudio corresponden a distritos de medición definidos en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil (Ecuador).

La ciudad de Guayaquil, localizada en la margen derecha del río Guayas, es la ciudad con mayor población y el principal puerto comercial de la República del Ecuador. Con una población estimada de 2'500.000 habitantes, la ciudad ocupa una superficie aproximada de 345 km² a una altitud media de 4 msnm. El sistema de distribución de agua que abastece a la ciudad es gestionado desde 2001 por la empresa International Water Services Guayaquil (Interagua C. Ltda). Desde 2004 se han implementado estrategias orientadas a mejorar la operación y control del sistema de distribución; entre las que se destacan la sectorización de redes, la macromedición de caudales y presiones, y la implementación de un sistema SCADA. Como resultado de estas estrategias el sistema de distribución, compuesto por 5.000 Km de tuberías y 487.000 conexiones, está dividido operacionalmente en 603 sectores hidráulicos, agrupados en 14 macrosectores abastecidos por gravedad a través de acueductos independientes entre sí. Para la gestión técnica la red de distribución se han conformado 80 distritos de medición, en los que es posible conocer la presión y caudal de entrada en tiempo real.

La información técnica de los distritos de medición conformados en el sistema de distribución de Guayaquil muestra zonas con niveles porcentuales de pérdidas que alcanzan valores cercanos al 80%; cuyo mayor componente son las fugas originadas principalmente por el envejecimiento de la infraestructura. Por otro lado, la revisión detallada de las redes de distribución permite identificar válvulas de la misma edad que la red, de las cuales se desconoce su posición de operación actual o sus características geométricas actuales (diámetro interno efectivo). Adicionalmente, el abastecimiento no dispone de estudios orientados a definir los coeficientes para la modulación de la demanda base en sus modelos hidráulicos. Por lo tanto resulta atractivo probar en éstos la propuesta de calibración para ajustar el coeficiente emisor de fugas y los coeficientes de demanda.

4.1 Información técnica de los sectores de estudio.

Los Distritos de Medición seleccionados como casos de estudio presentan diferentes rendimientos volumétricos, y son representativos de las condiciones de operación técnica y comercial de los 80 Distritos de Medición existentes en el sistema de distribución. Es así que, se ha incluido el distrito N72-M132 por ser uno de los distritos con rendimiento volumétrico más alto en el sistema. El distrito CTC-M44 es uno de los distritos con mayor nivel de pérdidas; y el distrito N50-M31 tiene un rendimiento similar al rendimiento global del sistema de distribución. Las Tabla 7 y Tabla 8 presentan información referente a la operación

y gestión técnica de los distritos, y las características físicas de la red; tal como: longitud de red, número de conexiones de servicio (acometidas), rendimiento volumétrico, nivel de pérdidas, rango de caudales y presiones registradas en el punto de inyección.

Tabla 7 Datos técnicos generales de los sectores a desarrollar como caso de estudio

Distrito de Medición	Area (Ha)	Longitud de red [Km]	No. de conexiones	Caudal promedio inyectado [l/s]	Volumen suministrado [m ³ /mês]	Rendimiento [%]	Indicador relativo de pérdidas [l/s/Km]
N72-M132	95.9	34.83	5,672	44.50	89,580	77.7	8.57
N50-M31	180.8	39.94	3,312	144.55	154,631	41.3	63.83
CTC-M44	157.0	60.50	5,157	225.08	150,385	25.8	84.76

Tabla 8 Caudal y presión medida en el punto de inyección

Distrito de Medición	Caudal inyectado [l/s]			Presión (en el punto de inyección) [mca]		
	Q_min	Q_med	Q_máx	P_min	P_med	P_máx
N72-M132	16.7	44.5	74.1	44.5	51.2	56.5
N50-M31	115.0	144.6	168.0	34.5	41.3	50.5
CTC-M44	195.6	225.1	255.6	20.0	23.3	28.5

Una de las hipótesis para la aplicación del método supone la posibilidad de agrupar tuberías en función del tipo y/o edad de la tubería, a partir de los límites de la sectorización hidráulica existente. Por lo tanto resulta relevante conocer la distribución porcentual del material de las tuberías en cada distrito. La red del distrito N72-M132 está compuesta por tuberías de PVC. El distrito N50-M31 presenta un 71% de tuberías de cemento asbesto, y el 29% restante corresponde a tuberías plásticas de PVC y polietileno de alta densidad (PEAD). El distrito CTC-M44 posee 23% de tuberías de cemento asbesto, 47% de tuberías metálicas (hierro dúctil, HD y fundición, HF), y 30% corresponde a tuberías plásticas. La Tabla 9 presenta la longitud de tuberías por diámetros en cada distrito, y la Tabla 10 la distribución porcentual de cada material por sector hidráulico.

Tabla 9 Matriz de diámetro, material de tuberías, y longitud de red (expresada en Km) por distrito de medición

Distrito de Medición	Material	63 mm	80-90 mm	100-110 mm	150-160 mm	200 mm	250 mm	300 mm	350 mm	400 mm	500 mm
N72-M132	PVC	29.64	0.99	0.36	2.36	-	1.06	-	-	-	-
	Acero	-	-	-	-	0.42	-	-	-	-	-
N50-M31	Asbesto	-	15.69	7.82	2.10	-	1.22	1.67	-	-	-
	PVC & PEAD	-	6.75	2.04	0.74	0.94	-	-	-	0.97	-
CTC-M44	Asbesto	-	8.70	2.00	0.50	0.46	1.64	-	0.37	-	-
	HD & HF	-	22.97	0.77	1.67	1.17	-	-	-	-	0.53
	PVC & PEAD	-	11.94	5.05	0.27	0.72	0.28	-	-	-	-

Tabla 10 Distribución porcentual del material de las tuberías en distritos de medición por cada sector hidráulico

Distrito de Medición	Sector hidráulico	L_red [Km]	% de tuberías de cemento asbesto	% de tuberías metálicas (HD & HF)	% de tuberías plásticas (PVC & PEAD)	% de tuberías de otros materiales
N72-M132	N72-390	8.02	-	-	95 %	5 %
	N72-391	8.27	-	-	100 %	-
	N72-392	8.65	-	-	100 %	-
	N72-393	9.89	-	-	100 %	-
N50-M31	N50-305	2.98	69 %	-	31 %	-
	N50-306	3.67	35 %	-	65 %	-
	N50-308	3.06	13 %	-	87 %	-
	N50-309	4.12	86 %	-	14 %	-
	N50-311	0.60	96 %	-	4 %	-
	N50-312	8.38	94 %	-	6 %	-
	N50-313	7.52	96 %	-	4 %	-
	N50-314	2.77	16 %	-	84 %	-
CTC-M44	CTC-032	16.21	2 %	82 %	7 %	9 %
	CTC-033	9.90	72 %	10 %	11 %	7%
	CTC-034	8.59	-	71 %	28 %	-
	CTC-052	5.55	-	-	100 %	-
	CTC-053	6.81	-	-	100 %	-
	CTC-093	6.76	70 %	11 %	19 %	-
	CTC-094	6.68	2 %	92 %	7 %	-

4.2 Información comercial de los sectores de estudio

La información comercial disponible para los distritos de medición a ser estudiados está compuesta por una base de datos con registros de facturación mensual, planos del catastro comercial, y ficheros en el SIG con información de los abonados catastrados. La información disponible en el SIG corresponde a la ubicación espacial de las parcelas, con sus respectivos números de cuenta. La base de datos proporciona información referente a:

- Número o código de cuenta del abonado.
- Nombre del abonado y dirección del predio.
- Código de catastro comercial (Ciclo-Sector-Ruta-Manzana-Secuencia-Piso-Departamento)
- Consumo mensual facturado
- Categoría de consumo (residencial, comercial, oficial, e industrial)
- Tipo de facturación (DL=diferencia de lectura, PH=promedio histórico, C0=consumo cero, NF=no facturable).

La información de facturación contenida en la base de datos corresponde al período comprendido entre enero y diciembre de 2012. La literatura revisada sugiere obtener el caudal base del modelo hidráulico a partir del promedio anual de facturación; sin embargo los registros de facturación de los 3 casos de estudio presentan variabilidad mensual en el número de abonados activos. Para solventar esta particularidad asociada a la gestión

comercial del abastecimiento, se procedió a seleccionar el mes con mayor número de cuentas activas y cuyo valor mensual de facturación sea mayor al volumen anual medio. El autor supone con este criterio de selección que el efecto de la estacionalidad del consumo es menos importante que la variación mensual del número de cuentas activas. Por otro lado se busca minimizar el número de predios definidos en la base del SIG, pero no incluidos en la base de datos de facturación; reduciendo así el número de casos en los que se deberá utilizar un consumo mensual estimado. A continuación se han incluido las figuras 20, 21 y 22 que muestran la evolución del volumen mensual facturado, y el número de cuentas activas para los 3 casos de estudio, extraídos de la base de datos disponible para el desarrollo de este trabajo de investigación.

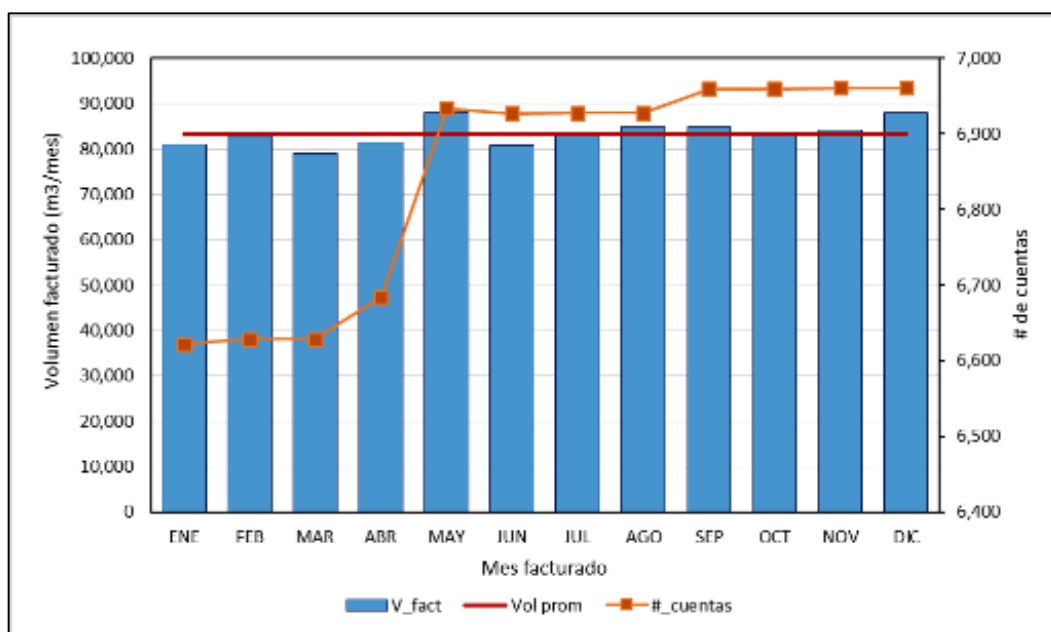


Figura 16 Volumen facturado y No. de cuentas activas (ene-2012 a dic-2012), N72-M132.

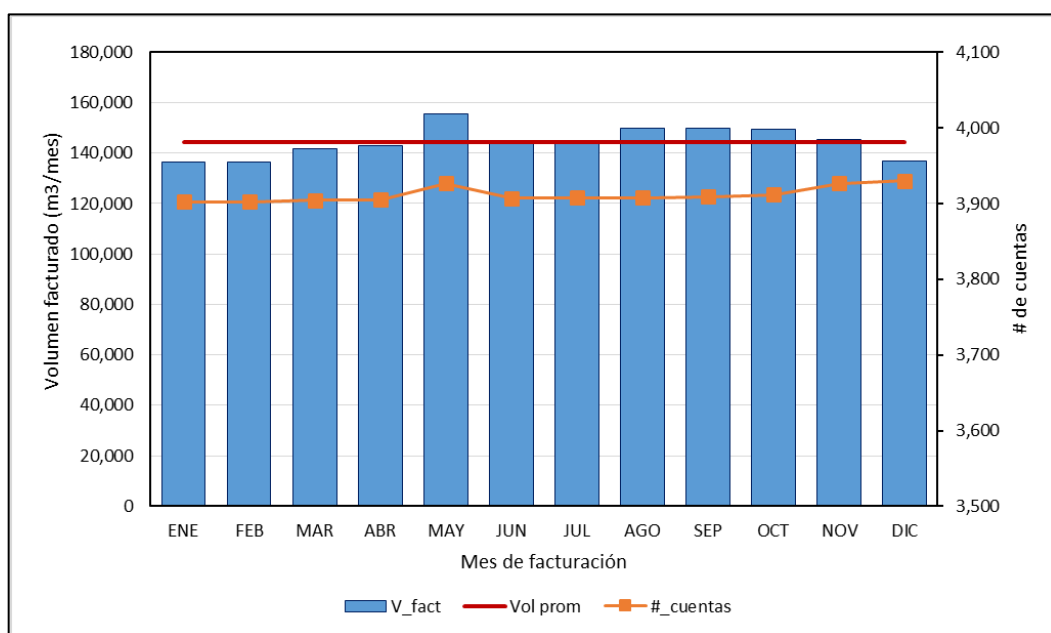


Figura 17 Volumen facturado y No. de cuentas activas (ene-2012 a dic-2012), N50-M31.

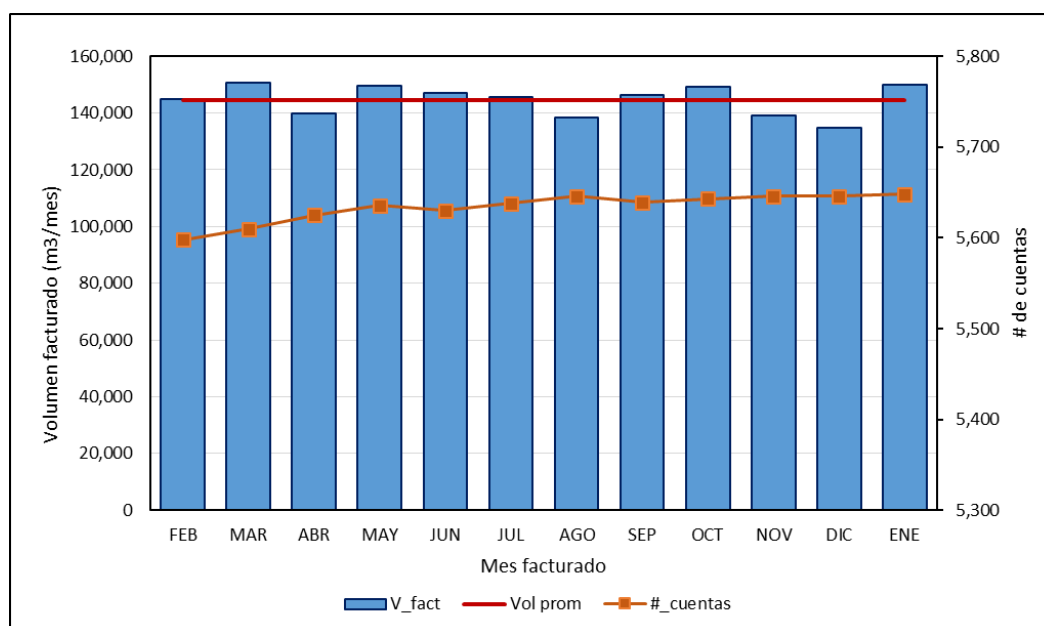


Figura 18 Volumen facturado y No. de cuentas activas (feb-2012 a ene-2013), CTC-M44.

Los meses elegidos para calcular la demanda base de los modelos hidráulicos corresponden diciembre de 2012 para el distrito N72-M132, mayo de 2012 para N50-M31, y enero de 2013 para CTC-M44. La Tabla 11 presenta el volumen mensual facturado por categoría de consumo y tipo de facturación, y número de cuentas activas para cada distrito en estudio.

Tabla 11 Volumen de facturación mensual por categoría de uso y tipo de facturación

Distrito de Medición	Categoría de uso	No. cuentas activas	Volumen facturado por categoría [m ³ /mes]	Volumen por tipo de facturación [m ³ /mes]			
				CO	DL	NF	PH
N72-M132	Residencial	6,916	88,008	2,957	81,351	555	3,145
	Comercial	29	478	58	320	32	68
	Oficial	16	229	0	78	95	56
	Industrial	0	0	0	0	0	0
	Sub-totales N72-M132	6,961	88,715	3,015	81,749	682	3,269
	<i>Porcentaje</i>			<i>3 %</i>	<i>92 %</i>	<i>1 %</i>	<i>4 %</i>
N50-M31	Residencial	3,358	84,828	3,912	74,548	1,985	4,383
	Comercial	413	20,777	1,454	18,368	838	1,170
	Oficial	137	46,061	3,639	41,455	856	111
	Industrial	1	1,051		1,051	0	0
	Sub-totales N50-M31	3,909	153,770	9,005	135,422	3,679	5,664
	<i>Porcentaje</i>			<i>6 %</i>	<i>88 %</i>	<i>2 %</i>	<i>4 %</i>
CTC-M44	Residencial	5,136	127,137	4,520	120,463	0	6,222
	Comercial	473	2,845	416	14,660	0	963
	Oficial	37	544	141	2,210	0	182
	Industrial	3	69	1	68	0	0
	Sub-totales CTC-M44	5,648	149,846	5,078	137,401	0	7,367
	<i>Porcentaje</i>			<i>3%</i>	<i>92%</i>	<i>0%</i>	<i>5%</i>

En los tres casos de estudio, aproximadamente el 90% del volumen se factura por diferencia de lecturas de dos meses consecutivos. El 10% del volumen restante es obtenido mediante estimaciones para la facturación por consumo cero, promedio histórico y cuentas no facturables. Esto nos da un orden de magnitud de la incertidumbre asociada a los consumos asignados a los nudos del modelo.

4.3 Descripción general de los modelos hidráulicos construidos

La construcción de los modelos hidráulicos se realizó a partir de ficheros SIG (ShapeFile tipo línea), con información del diámetro, longitud y material de la tubería; mediante el programa LectorSHP v1.1 (Martínez Solano,2008), el cual es un conversor de archivo SHP a INP. Es necesario mencionar el trabajo de depuración de errores realizado sobre los ficheros SHP, principalmente relacionados con el proceso de migración de la información desde el formato CAD y simplificaciones de la configuración de la red en casos de esquineros con conexiones próximas entre sí.

La Tabla 12 incluye información referente al número de tuberías y nudos en cada modelo hidráulico, así como el rango de la elevación de sus nudos. Las válvulas existentes han sido representadas como líneas, pues no cumplen funciones de regulación y sólo operan como válvulas de corte de flujo.

Tabla 12 Información general de los modelos hidráulicos construidos

Distrito de Medición	No. líneas	Longitud tuberías [m]	No. nudos	No. nudos consumo	Cota Pto. Iny. [msnm]	Cota media [msnm]	Cota_min [msnm]	Cota_máx [msnm]
N72-M132	391	34,834	252	241	4.53	5.82	4.45	14.79
N50-M31	531	39,975	374	341	4.50	3.86	2.94	6.02
CTC-M44	1,022	60,469	700	657	4.00	3.17	2.51	3.95

En la información referente a la operación de los casos de estudio se identificaron aquellas válvulas posición de operación en la red de distribución es 'cerrada'. Estas válvulas corresponden a válvulas de frontera entre los sectores hidráulicos definidos dentro de cada Distrito de Medición. Por lo tanto, en los modelos hidráulicos de los casos de estudio se procedió a definir las como tal. En el caso N72-M132 no fue cerrada ninguna línea, en el distrito N50-M31 se cerraron 7 válvulas, y en el caso CTC-M44 se cerraron 12 válvulas.

La Figura 19, Figura 20 y Figura 21 presentan los modelos hidráulicos de los 3 casos de estudio, donde es posible visualizar la sectorización hidráulica, los puntos de medida de presión para la calibración del modelo, y el punto de inyección de cada uno de ellos. Este último representado por un depósito al que se le asignará un patrón para simular la variación de la presión en el punto de inyección.

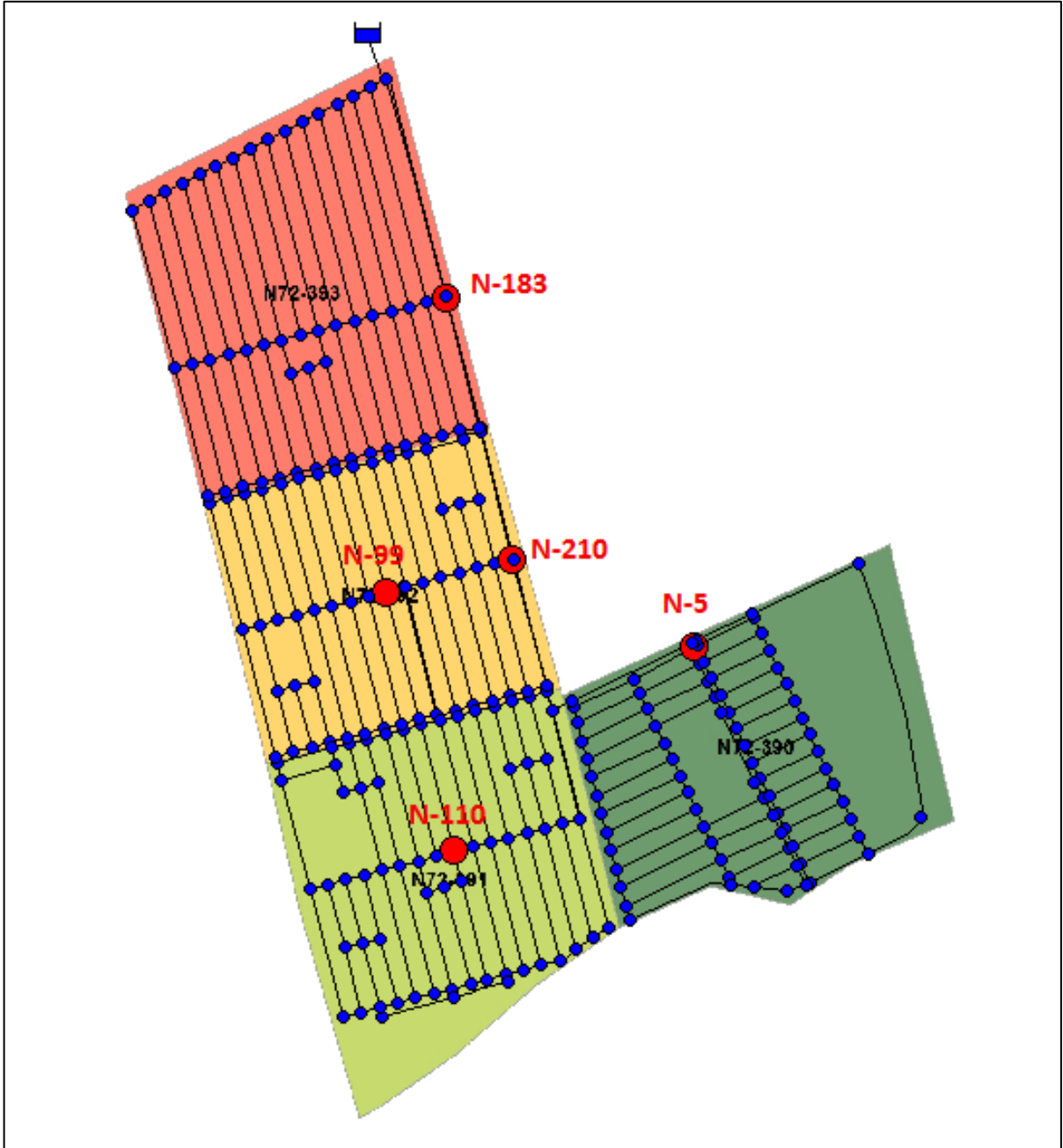


Figura 19 Modelo hidráulico del distrito de medición N72-M132

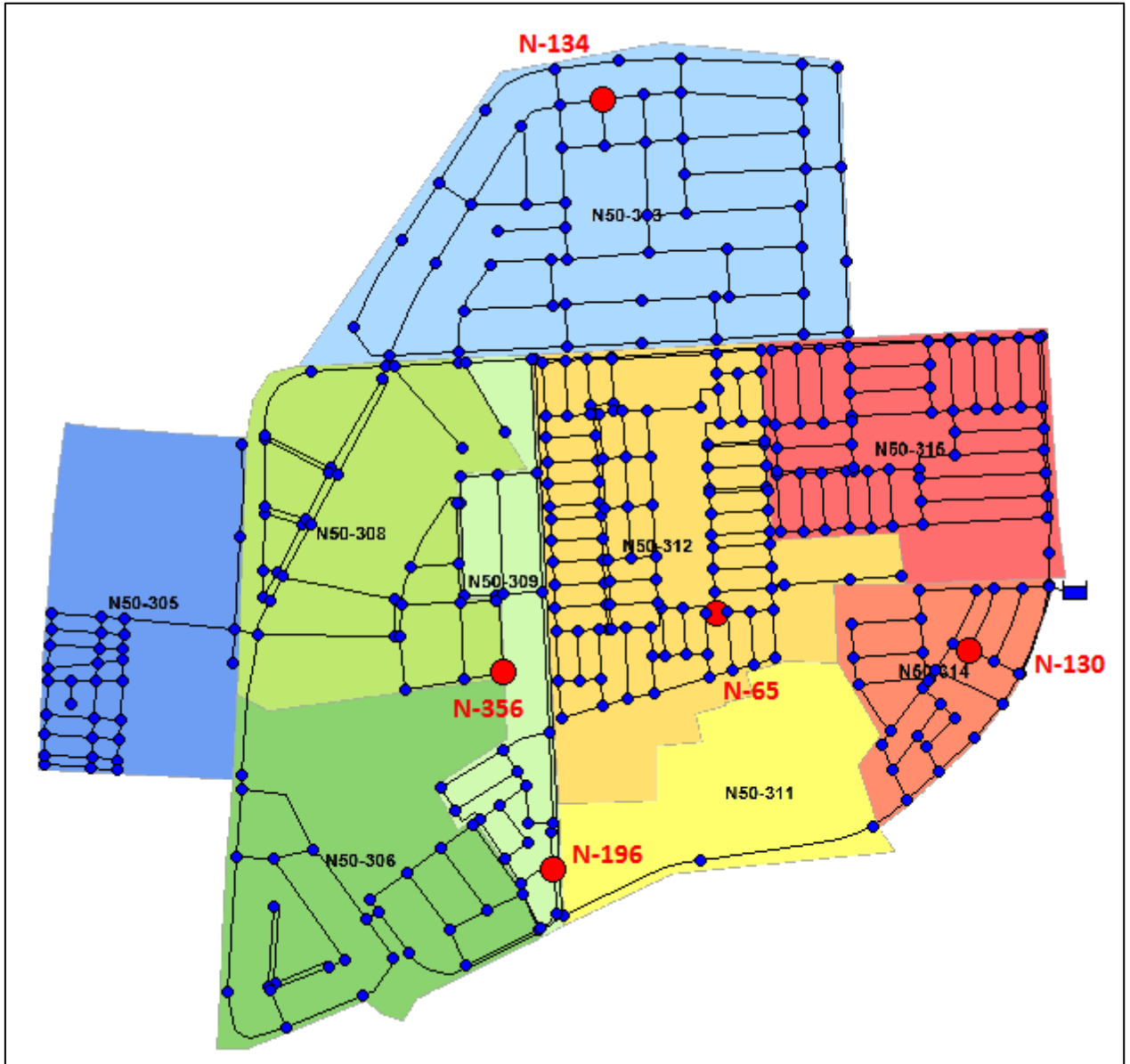


Figura 20 Modelo hidráulico del distrito de medición N50-M31

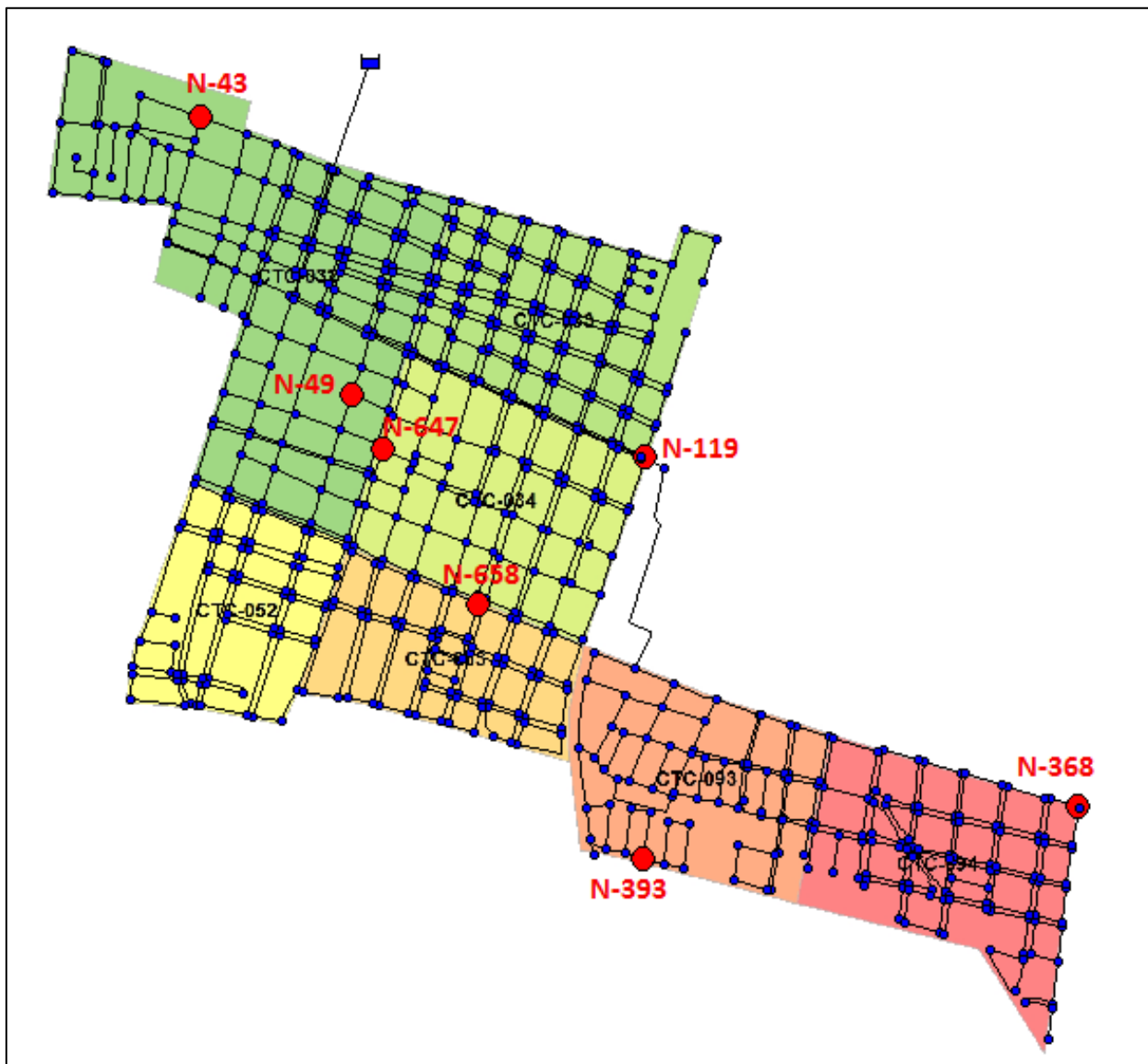


Figura 21 Modelo hidráulico del distrito de medición CTC-M44

4.4 Datos de calibración

El registro de caudal y presión a ser utilizados para la calibración del modelo se realizó en el punto de inyección de cada distrito, y en puntos de aforo disponibles en la red de distribución, respectivamente. Los registros para cada distrito fueron obtenidos simultáneamente a través de campañas de mediciones durante 7 días (168 horas) cada 15 minutos. Los equipos utilizados para la medición del caudal corresponden a caudalímetros ultrasónicos de sonda externa (N50-M31), ultrasónicos de inserción (CTC-M44), y electromagnético de carrete (N72-M132). Para todos los casos, el registro de presiones se obtuvo utilizando data-loggers con transductores internos de presión. La Tabla 13 presenta valores mínimos, promedios y máximos para los datos de calibración medidos en campo, y su ubicación referida según el nudo del modelo hidráulico correspondiente.

Tabla 13 Resumen de datos de calibración

Distrito de Medición	Nudo EPANET	Parámetro medido	Valor Mínimo	Valor Medio	Valor Máximo
N72-M132	L-157	Caudal	16.7	44.5	74.1
	Embalse	Presión	44.5	51.2	56.5
	N-5	Presión	18.0	35.8	52.5
	N-99	Presión	37.0	45.9	55.0
	N-110	Presión	36.0	46.2	55.5
	N-183	Presión	47.0	48.7	56.5
	N-210	Presión	38.5	47.1	55.5
N50-M31	L-1	Caudal	115.0	144.6	168.0
	Embalse	Presión	34.5	41.3	50.5
	N-65	Presión	6.0	13.7	25.5
	N-130	Presión	32.5	38.6	47.5
	N-163	Presión	15.5	23.3	35.0
	N-196	Presión	22.5	29.5	40.0
	N-356	Presión	20.0	28.0	39.5
CTC-M44	L-312	Caudal	195.6	225.1	255.6
	Embalse	Presión	20.0	23.3	28.5
	N-43	Presión	8.5	12.5	18.0
	N-49	Presión	15.0	19.0	24.5
	N-119	Presión	13.0	17.8	22.5
	N-368	Presión	17.5	21.3	26.5
	N-393	Presión	8.5	15.9	22.5
	N-647	Presión	9.5	14.6	20.0
	N-658	Presión	11.5	19.1	27.5
Los valores asociados a mediciones de caudal están expresadas en l/s					
Los valores asociados a mediciones de presión están expresadas en mca					

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a las mediciones realizadas para la calibración de los modelos hidráulicos de los casos de estudio.

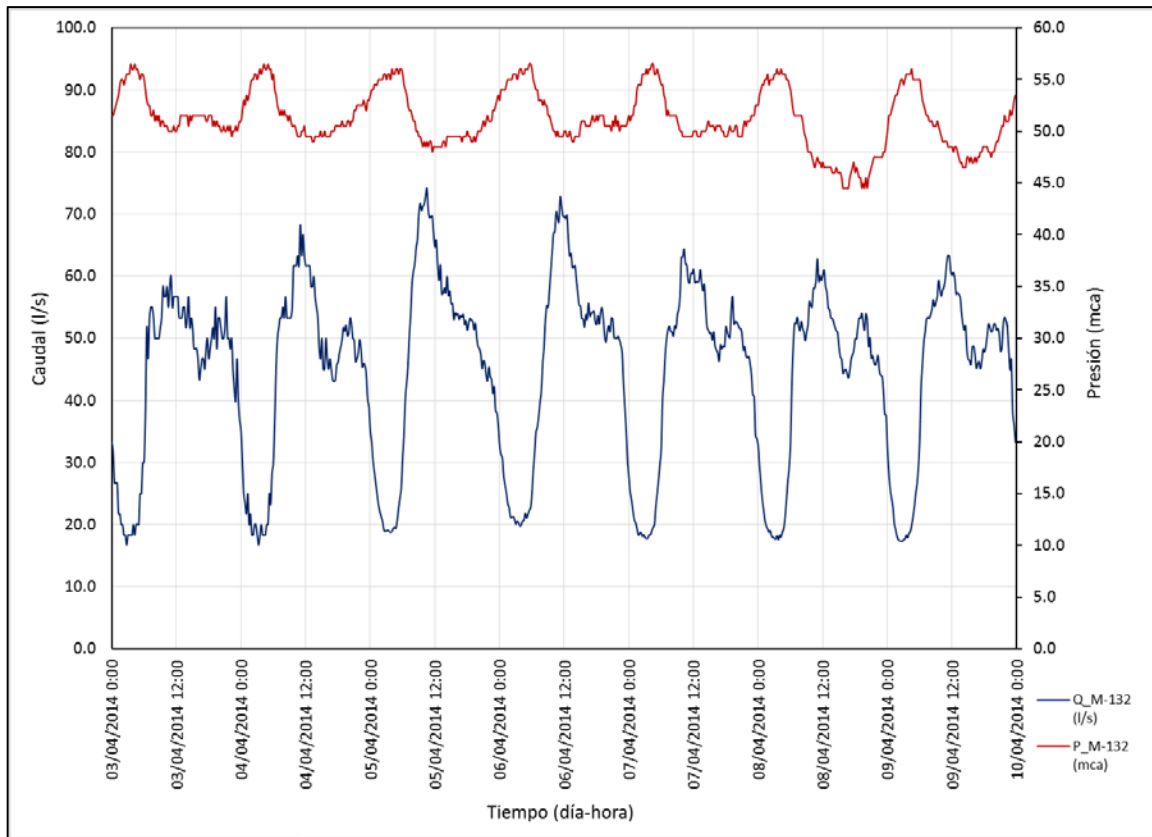


Figura 22 Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N72-M132

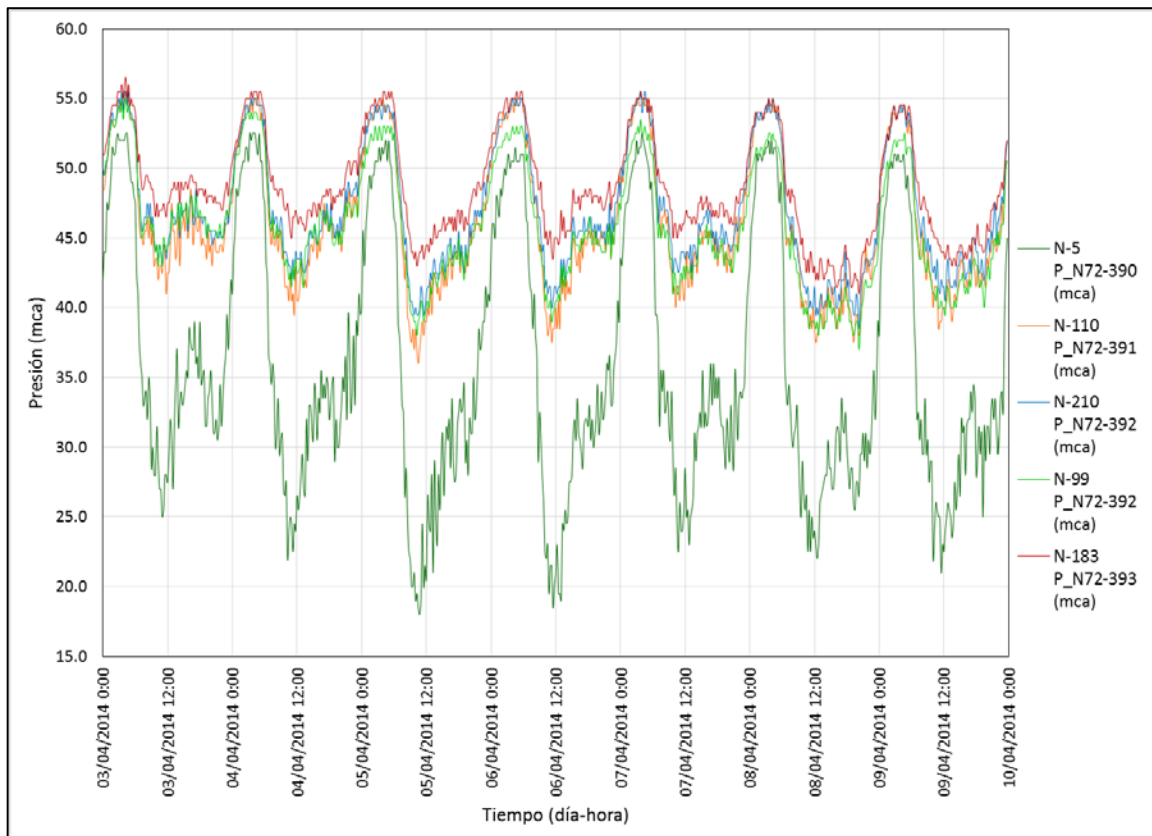


Figura 23 Presión registrada en la red del Distrito de Medición N72-M132

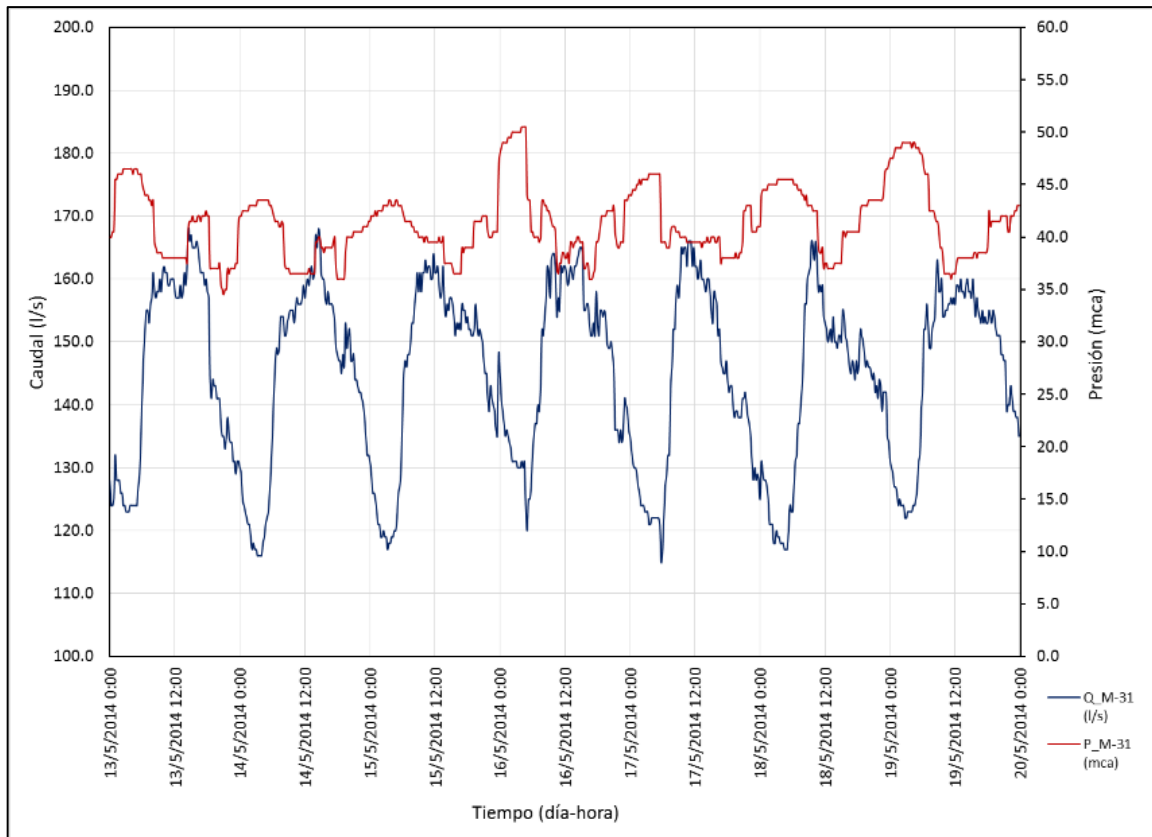


Figura 24 Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N50-M31

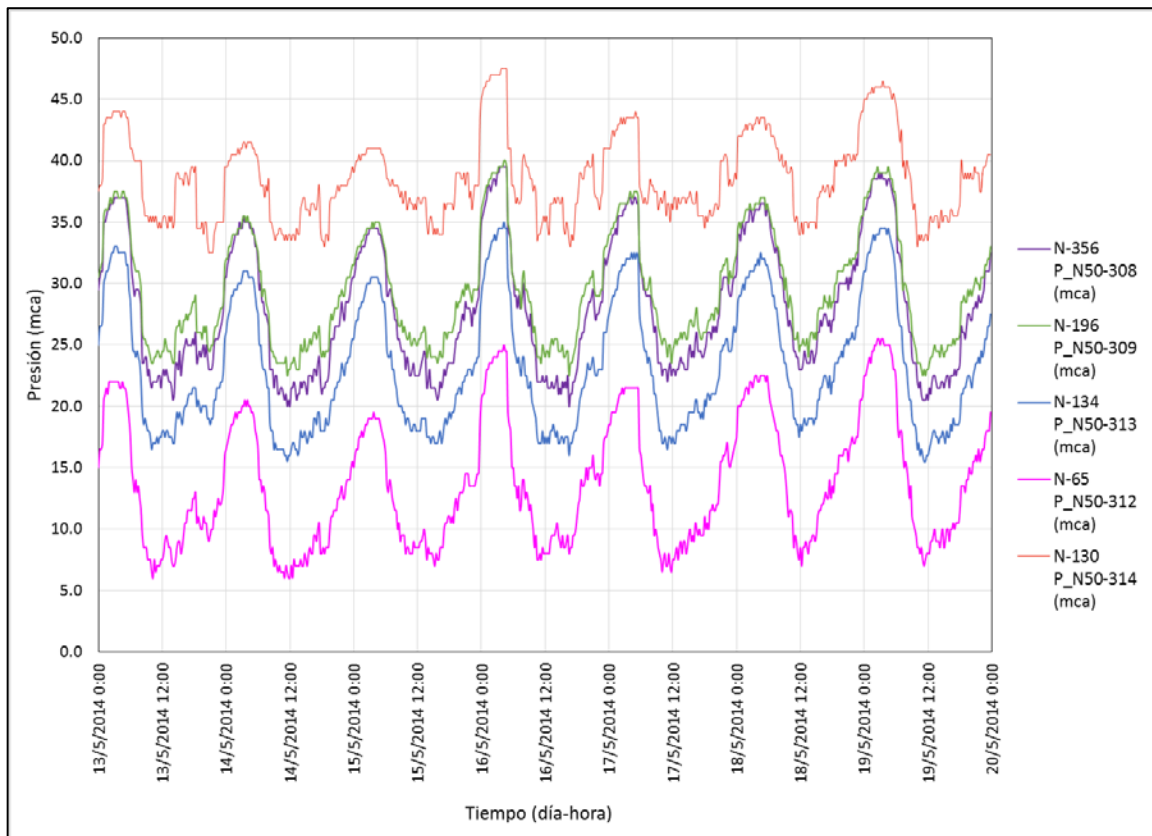


Figura 25 Presión registrada en la red del Distrito de Medición N50-M31

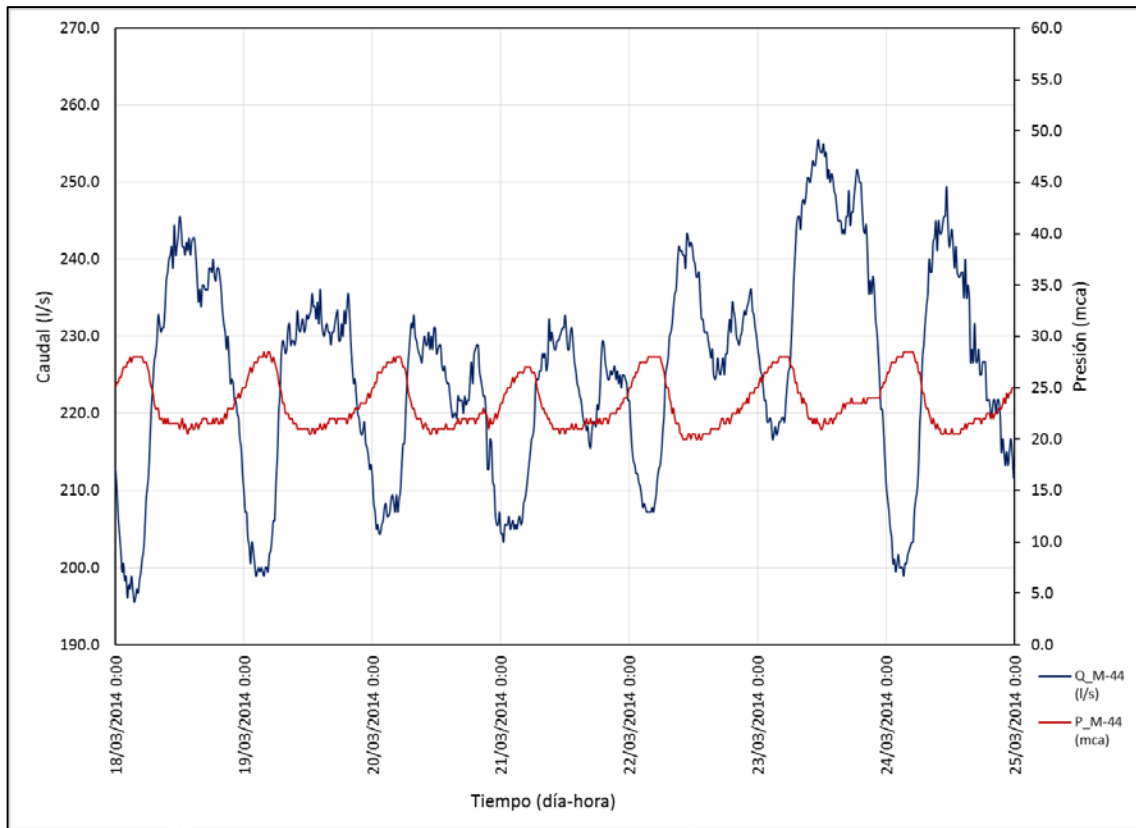


Figura 26 Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición CTC-M44

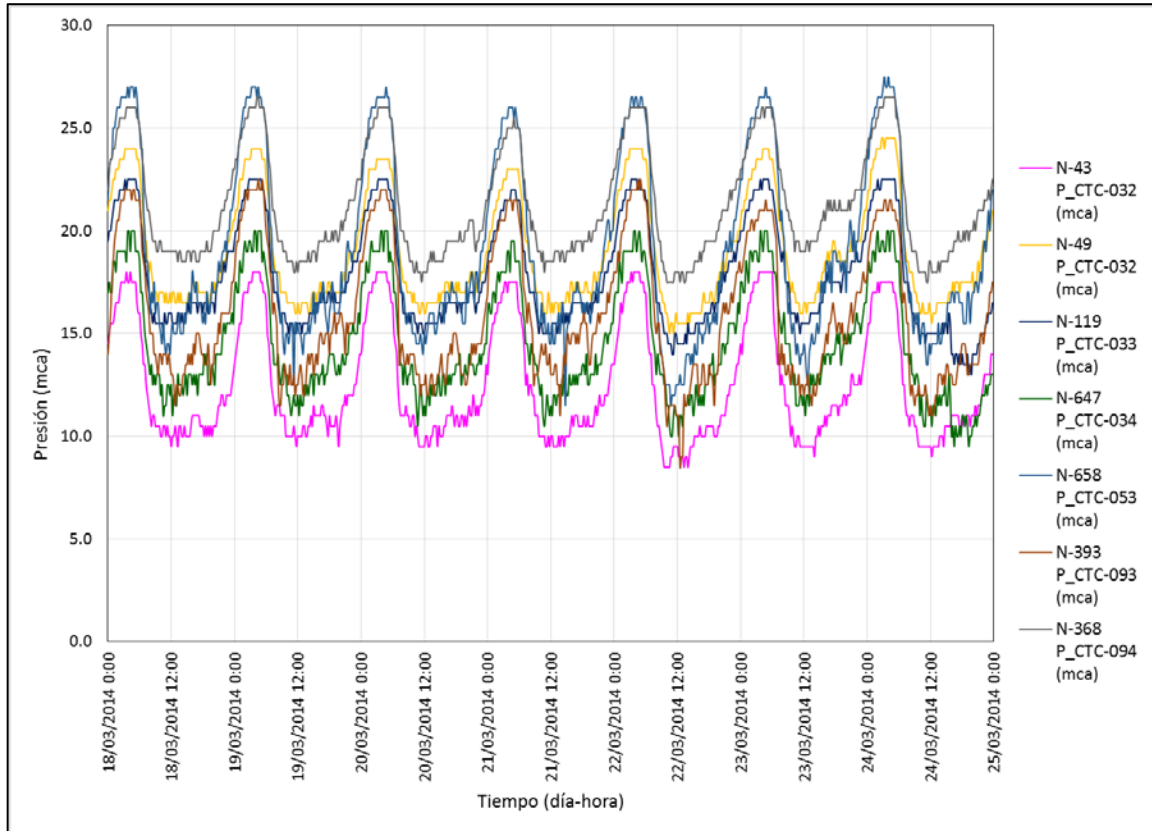


Figura 27 Presión registrada en la red del Distrito de Medición CTC-M44

4.5 Carga de los modelos hidráulicos

La carga de los modelos hidráulicos de los casos de estudio se realizó en base al procedimiento propuesto en el apartado 3.1. Para reducir la incertidumbre de la distribución espacial de la demanda base en los casos de estudio desarrollados, se ha optado por apoyar el proceso de asignación de cargas en el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta decisión parte de la disponibilidad de la representación gráfica de los predios (también llamadas parcelas) de los abonados y de las tuberías y nudos de la red de distribución en el SIG.

La primera tarea realizada consistió en revisar la concordancia de las bases de datos de facturación (del mes seleccionado) con la información contenida en el fichero de SIG correspondiente a las parcelas de los abonados. En el fichero de SIG se identificaron aquellos predios que no tenían asignado ningún código de cuenta. Para la identificación del número de cuenta de éstos predios se utilizaron los planos de catastro comercial suministrados por el abastecimiento; obteniéndose el código de catastro comercial, con el que fueron buscados en la base de datos de facturación respectiva. Por otro lado, en la base de datos de facturación se identificaron cuentas asociadas a una misma parcela, y cuyo número de cuenta no estaba asociado a ningún polígono del fichero de parcelas del SIG. En este caso se partió de la información del código de catastro comercial para identificar la ubicación espacial del abonado, y poder enlazarlo a la cuenta que sí estaba representada espacialmente en el fichero de SIG.

Adicionalmente existieron polígonos del SIG que no pudieron ser asociados a ningún número de cuenta de la base de datos comercial. En este último caso el consumo asignado correspondió al promedio anual del volumen facturado por diferencia de lecturas (DL). Los valores calculados para éste último valor son los siguientes: 15.83 m³/mes para el distrito N72-M132, 25.9 m³/mes para el distrito N50-M31, y 27.7 m³/mes para el distrito CTC-M44.

Es necesario mencionar que en los distritos N72-M132 y N50-M31 se identificaron polígonos que corresponden a hidrantes, a los cuales se asignó un consumo de cero. Por otro lado, en el distrito N72-M132 se identificaron 3 macrolotes asociados a instituciones educativas y un supermercado. Por sugerencia de la empresa de abastecimiento se asignaron valores de 150 m³/mes a las primeras, y 101 m³/mes para el supermercado.

Finalmente, se obtuvo para cada caso de estudio el volumen suministrado a los abonados. Este volumen corresponde a la suma del volumen facturado que pudo ser relacionado a los polígonos definidos en el fichero de SIG, y el volumen estimado según lo mencionado en el párrafo anterior. La

Tabla 14 muestra los valores globales del volumen suministrado por distrito de medición, y de sus componentes; así como la cantidad de cuentas activas asociadas a cada tipo.

Tabla 14 Volumen total suministrado a ser asignado a los nudos de demanda de los modelos hidráulicos

Distrito de Medición	Volumen por facturación mensual [m3/mes]	No. Cuentas por facturación. mensual	Volumen estimado de consumo [m3/mes]	No. Cuentas por estimación del consumo	Volumen suministrado [m3/mes]	No. Cuentas total
N72-M132	88,565	6,537	939	29	89,504	6,566
N50-M31	153,686	3,276	906	35	154,592.5	3,311
CTC-M44	149,619	5,131	609	24	150,228.4	5,155

La asignación espacial de la demanda base en los nudos de modelo hidráulico se realizó en dos etapas. La primera etapa consistió en asignar a cada parcela el consumo (expresado en l/s); tarea que se realizó mediante el enlace (o 'join') entre un atributo común de la base de datos CUENTAS y la base de datos gráfica PREDIOS, en este caso a través del campo común ID_PREDIO.

Una vez asignados los consumos a cada polígono de la base de datos orientada a objetos (SIG) se procedió a representar espacialmente el punto de demanda de cada parcela, para lo cual se realizó el cálculo de centroide de cada parcela. Por otro lado, se crearon 'polígonos de Thiessen' asociados a los nudos de consumo, definidos previamente en el modelo hidráulico. Finalmente se realizó un enlace espacial para obtener una relación entre los nudos del modelo hidráulico y los abonados. Esto permitió acumular las demandas asociadas a cada nudo de demanda del modelo, y posteriormente realizar la carga de la demanda base en el modelo hidráulico. Este proceso es representado en la Figura 28 presentada a continuación.

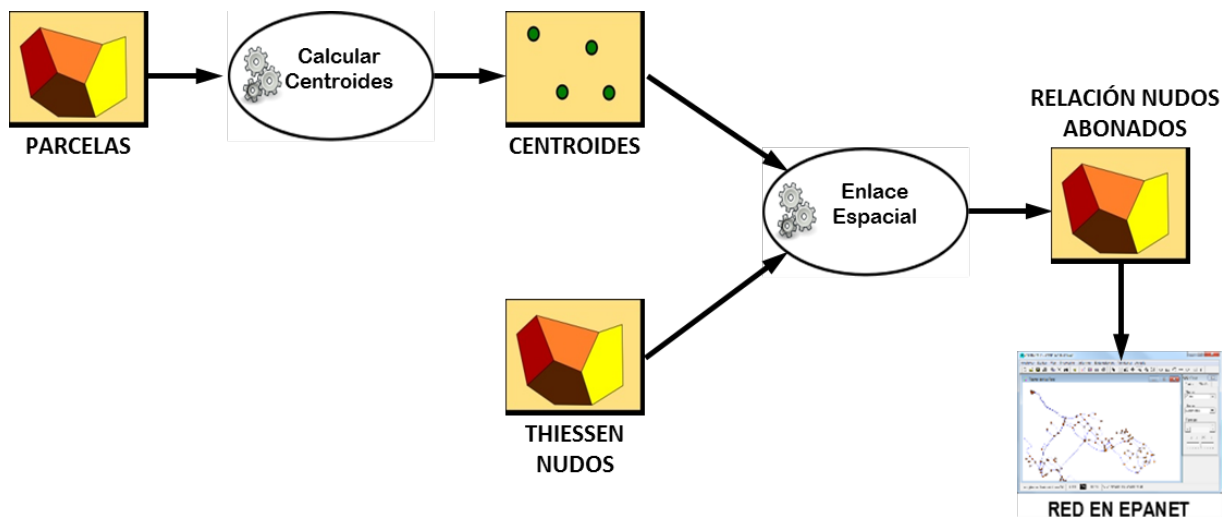


Figura 28 Geoproceso para asignar espacialmente la demanda base a los nudos del modelo hidráulico. (Fuente: Martínez Solano et al, 2013)

4.6 Aplicación de la metodología de calibración.

4.6.1 Caso 1: distrito de medición N72-M132

El caso 1 corresponde a la red de mayor rendimiento volumétrico entre los tres casos de estudio (77.7%). Para la calibración de este caso fueron suficientes diez iteraciones, de las cuales tres correspondieron al primer ajuste del coeficiente emisor de fugas; no siendo necesario realizar la segunda calibración del patrón de consumos luego del ajuste de las pérdidas de carga en la red. La Tabla 15 resume la evolución de las desviaciones entre los 672 valores medidos (observados) y simulados del caudal inyectado para todo el proceso de calibración. Para este caso de estudio el valor medio del caudal observado es de 44.50 mca.

Tabla 15 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados del caudal inyectado, caso N72-M132

Simulación	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	34.56	9.942	10.479	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	44.41	3.065	3.629	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	44.50	3.038	3.631	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	44.50	3.038	3.631	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	44.49	0.026	0.031	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 5	44.50	0.024	0.030	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 6	44.52	0.027	0.034	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 7	44.50	0.025	0.031	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 8	43.85	0.648	0.072	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 9	44.47	0.346	0.417	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 10	44.50	0.341	0.419	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

La simulación 0 corresponde a la primera simulación del problema de calibración, en la cual no se incluye emisor de fugas, y que es utilizada para obtener el valor de presión media de la red. La primera estimación del coeficiente emisor de fugas fue de $1.4274 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, valor que repartido proporcionalmente entre los 251 nudos existentes resulta $0.0056871 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ en cada nudo. En la simulación 4 se define en el modelo hidráulico el patrón de consumos calibrado, la simulación 6 corresponde a la primera distribución espacial de las fugas, y en la simulación 8 se realizó la calibración de las pérdidas de carga de la red. Finalmente la simulación 10 corresponde al ajuste definitivo del valor global de emisor de fugas, cuyo valor fue de $1.5458 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$. Entre cada una de las simulaciones mencionadas fue necesario ajustar el emisor global de fugas o la sumatoria de los emisores de fugas en los nudos del modelo (según sea el caso), pues, la diferencia entre los valores simulados y observados del caudal aumentó, especialmente después del ajuste de los coeficientes de pérdidas en válvulas.

La Figura 29 permite comparar la curva de modulación de la demanda base inicialmente asumida y calculada a partir del caudal inyectado, y el patrón de consumos calibrado.

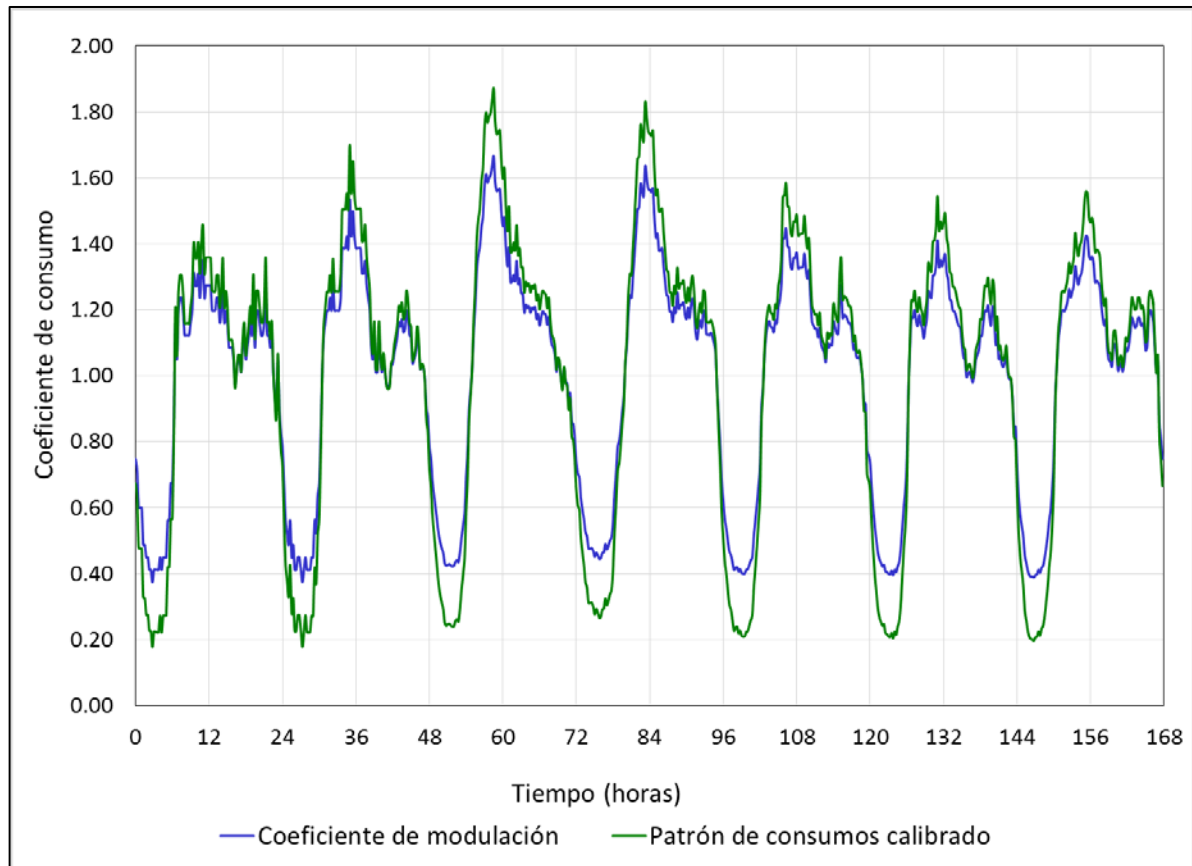


Figura 29 Curva de modulación estimada inicialmente (azul) y patrón de consumo calibrado (verde), caso N72-M132

La Tabla 16 presenta los valores de caudal nocturno, y presión de servicio obtenidos en la prueba de subdivisión del distrito de medición en estudio. Adicionalmente se muestran los factores de ponderación para la distribución espacial de las fugas calculados a partir del caudal de fugas estimado para cada sector hidráulico. El factor para estimar el consumo nocturno de los abonados del distrito de medición N72-M132 fue de 0.2442.

Tabla 16 Factores de ponderación para la distribución espacial del emisor global de fugas, caso N72-M132

Sector Hidráulico	Caudal Nocturno [l/s]	Presión [mca]	Uso Nocturno Estimado [l/s]	Caudal de fugas [l/s]	Indicador de fugas [l/s(mca) ^{0.5}]	Factor de Ponderación [%]
N72-390	9.70	40.0	2.37	7.33	1.1591	42.02%
N72-391	6.30	52.0	1.54	4.76	0.6603	23.94%
N72-392	4.20	54.0	1.03	3.17	0.4319	15.66%
N72-393	4.30	53.0	1.05	3.25	0.4464	16.18%
ACUEDUCTO	0.45	56.0	0.00	0.45	0.0606	2.20%
					2.7585	100%

La Figura 30 muestra gráficamente los resultados de la prueba de subdivisión del Distrito de Medición N72-M132, realizada para obtener el caudal nocturno correspondiente a cada uno de los cuatro sectores hidráulicos definidos para distribuir espacialmente las fugas.

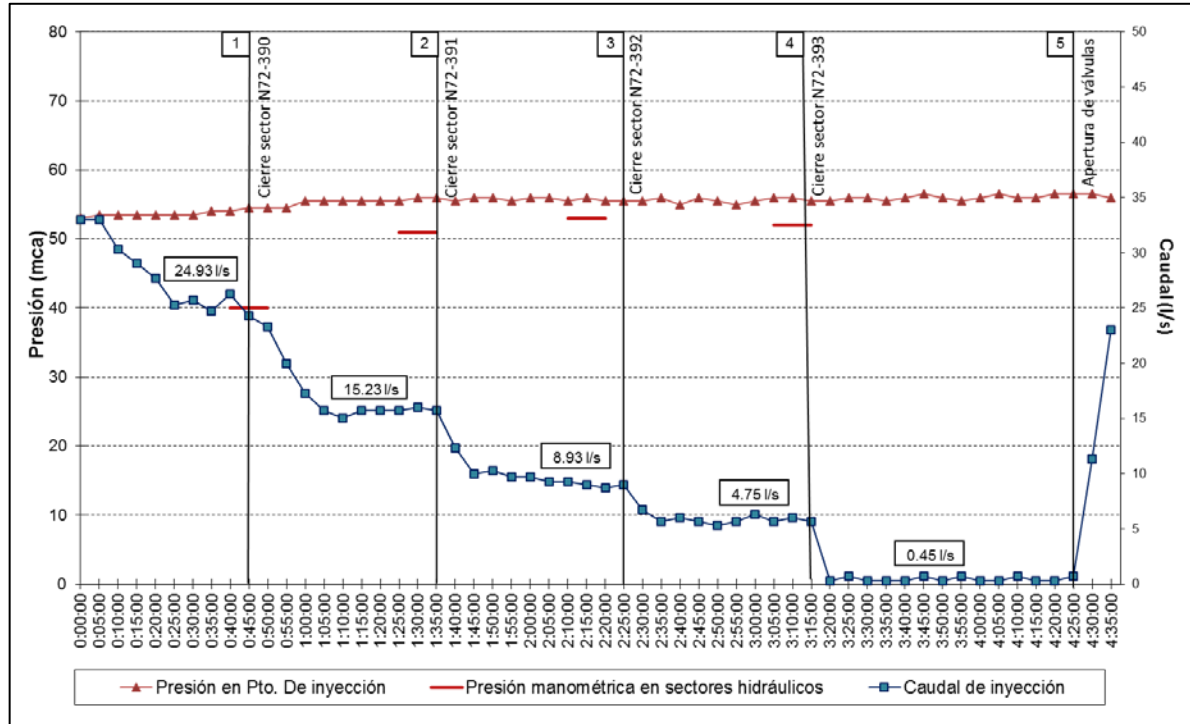


Figura 30 Prueba de subdivisión del distrito de medición N72-M132

Para la calibración de las pérdidas de carga en la red se ajustaron los coeficientes de pérdidas de carga de 6 tuberías, y se definió como ‘cerrada’ una válvula próxima al nudo N-5 (sector N72-390).

Tabla 17 Ajuste de coeficientes de pérdidas en líneas del modelo hidráulico, caso N72-M132

Línea	Diámetro [mm]	Coefficiente de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-141	160	625	N72-390	abastecimiento
L-91	110	600	N72-390	abastecimiento
L-296	160	150	N72-392	abastecimiento
L-390	160	150	N72-391	abastecimiento
L388	160	25	N72-393	abastecimiento
L-56	160	cerrada	N72-390	interna

La Tabla 17 presenta los valores de ajuste para los coeficientes de pérdidas asignados a líneas del modelo. La Tabla 18 presenta las estadísticas de las desviaciones entre las presiones simuladas y observadas antes y después del ajuste de válvulas, correspondientes a las simulaciones 7 y 8 respectivamente.

Tabla 18 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados de presión, antes y después del ajuste de los coeficientes de pérdida de carga en válvulas, caso N72-M132

Simulación	Nudo	Valor medio observaciones	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio
Simulación 7	N-5	35.77	48.03	12.257	13.593
	N-110	46.16	47.81	1.718	2.120
	N-210	47.05	48.62	1.598	1.896
	N-99	45.91	48.03	2.129	2.337
	N183	48.73	49.34	0.743	0.912
Simulación 8	N-5	35.77	35.75	1.407	1.818
	N-110	46.16	45.92	0.590	0.748
	N-210	47.05	46.80	0.499	0.630
	N-99	45.91	46.21	0.789	0.970
	N183	48.73	48.76	0.412	0.508

A continuación se incluyen los gráficos de correlación entre el caudal simulado y observado para la primera (Figura 31) y décima simulación (Figura 32), y los correspondientes a los valores de presión simulados antes (Figura 33) y después de realizar la calibración de las pérdidas de carga en la red (Figura 34).

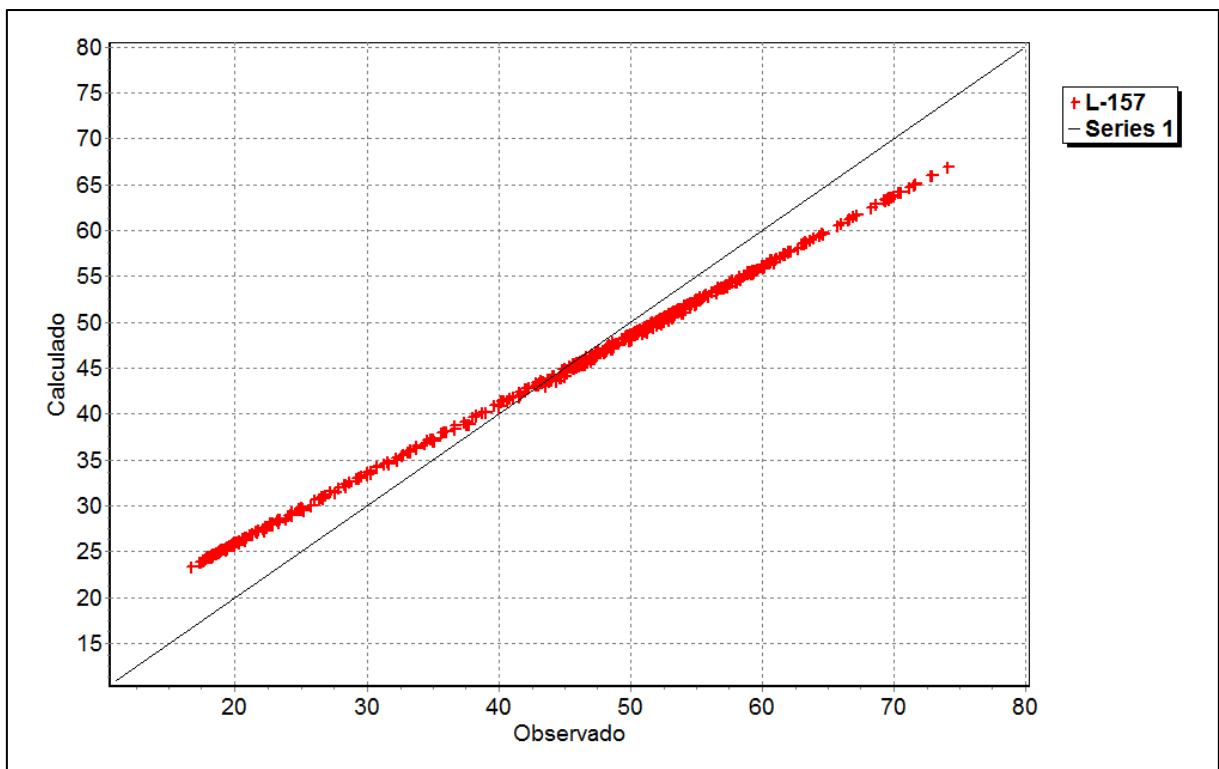


Figura 31 Gráfico de correlación entre valores observados y simulados correspondiente a la simulación 1 con la primera estimación del emisor global de fugas. Caso N72-M132

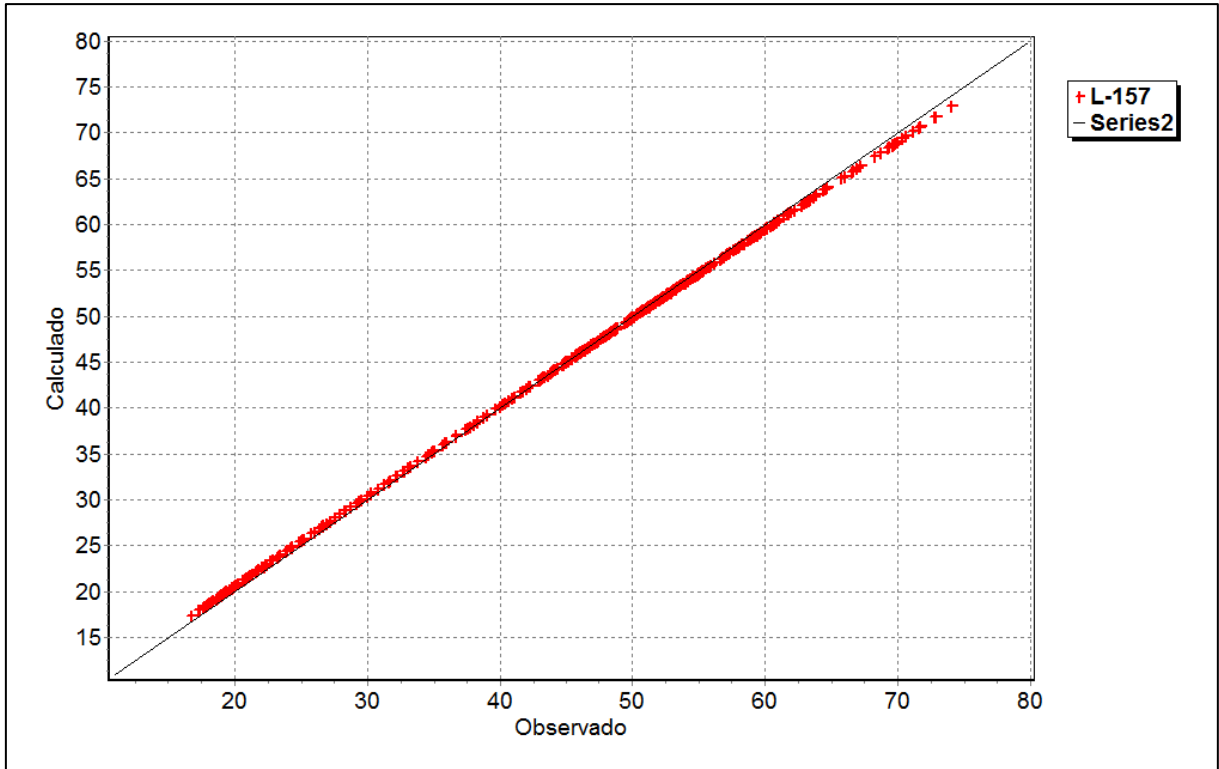


Figura 32 Gráfico de correlación para la simulación final del proceso de calibración. Caso N72-M132

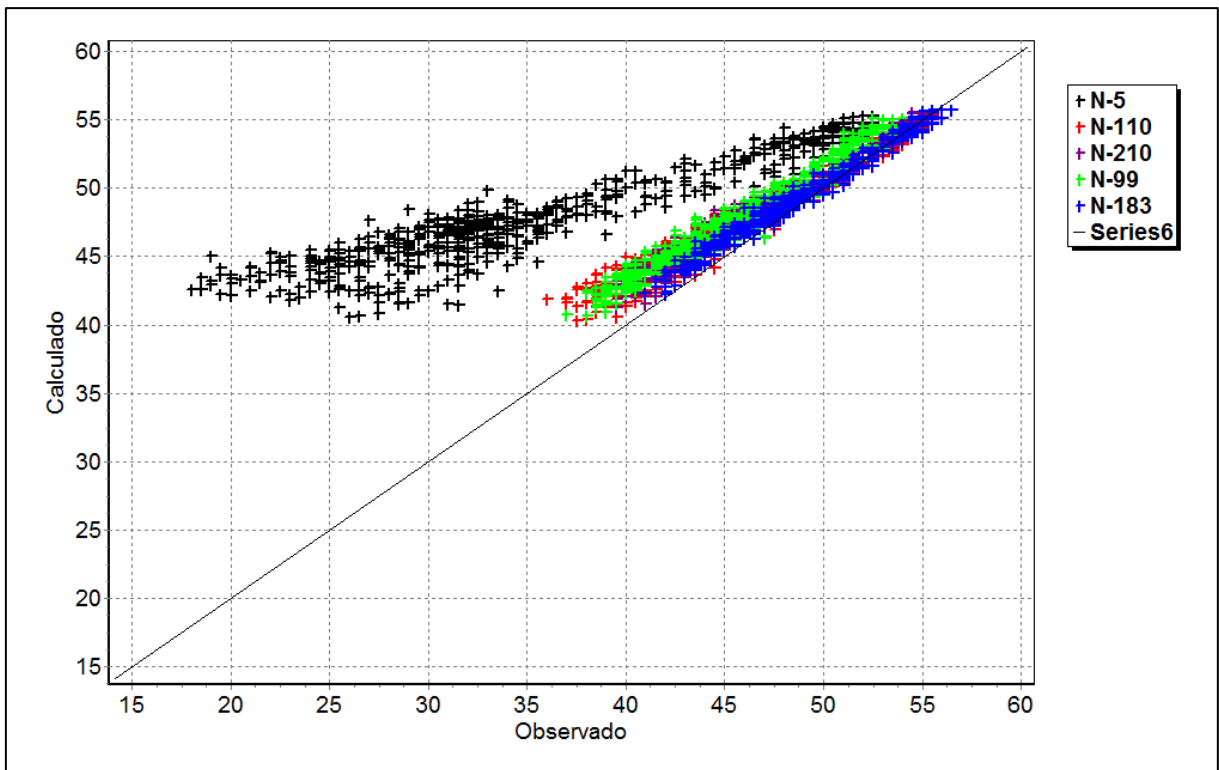


Figura 33 Gráfico de correlación entre presiones simuladas y observadas antes de realizar el ajuste de los coeficientes de pérdidas de carga en válvulas (simulación 7). Caso N72-M132

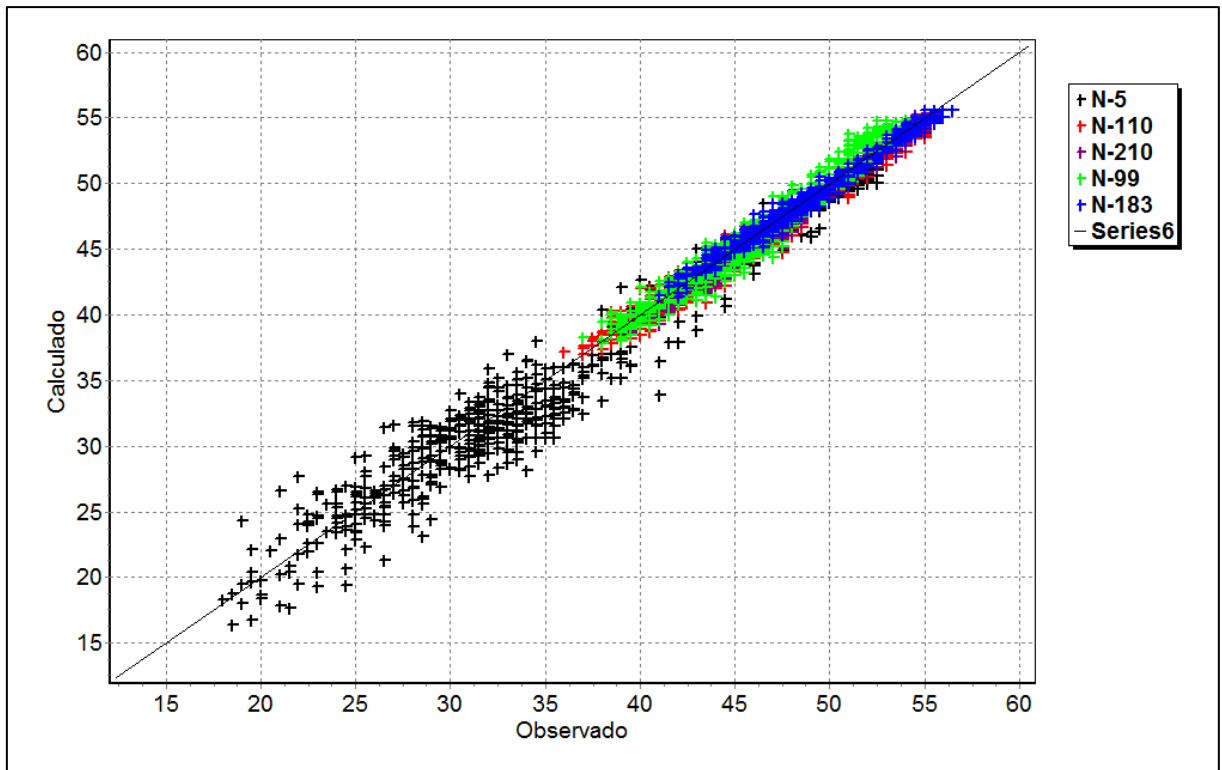


Figura 34 Gráfico de correlación para el modelo hidráulico calibrado (simulación 10). Caso N72-M132

La Figura 35 presenta los caudales observados y las curvas de caudal para la primera simulación (simulación 0), la simulación con la primera estimación del emisor global de fugas (simulación 1) y la simulación correspondiente al modelo calibrado (simulación 10).

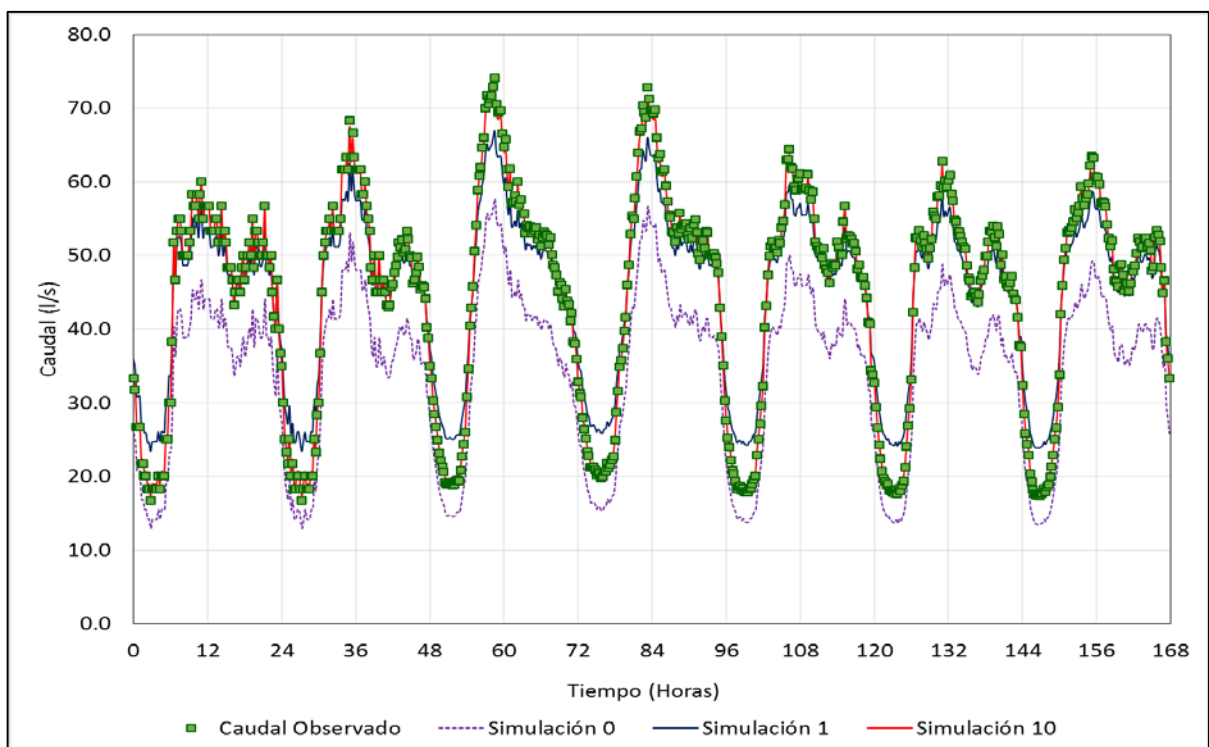


Figura 35 Caudales observados y simulados, correspondiente a las simulaciones 0, 1, y 10. Caso N72-M132

A manera de ejemplo se incluye la Figura 36, en la cual es posible comparar los resultados del ajuste de los coeficientes de pérdidas en líneas para el nudo N-5 correspondiente al sector N72-390.

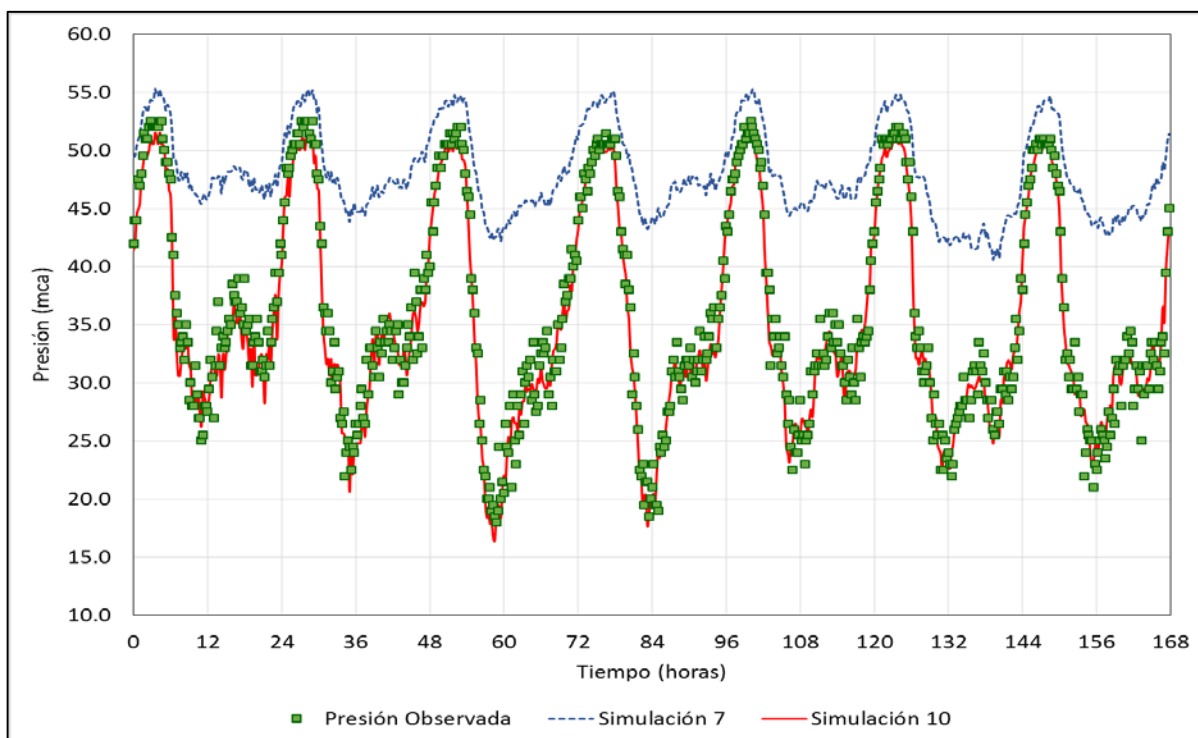


Figura 36 Presión simulada y observada en el nudo N-5, antes del ajuste de coeficientes de pérdidas de carga en válvulas (simulación 7) y para el modelo hidráulico calibrado (simulación 10). Caso N72-M132

En el anexo 1 se han incluido los gráficos correspondientes a la simulación anterior al ajuste de las pérdidas de carga (simulación 7) y la simulación final para los nudos N-99, N-110, N-183 y N-210, en los cuales se registraron medidas de presión utilizados en el proceso de calibración para el caso del distrito N72-M132.

4.6.2 Caso 2: distrito de medición N50-M31

El caso 2 corresponde a la red de rendimiento volumétrico intermedio entre las incluidas como casos de estudio (41.4%); a la que le corresponde un indicador relativo de pérdidas aproximadamente ocho veces mayor que la red revisada en el caso 1, tal como se muestra en la Tabla 7 y con su inclusión se pretende representar las condiciones del sistema de distribución general de la ciudad. La aplicación del método propuesto requirió de diecinueve iteraciones para la calibración del modelo hidráulico, siendo necesario realizar un segundo ajuste del patrón de consumos luego de la calibración de las pérdidas de carga en las líneas del modelo hidráulico.

La primera estimación del coeficiente emisor de fugas fue de $13.2183 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, valor que repartido proporcionalmente entre los 374 nudos existentes resulta $0.03534317 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ en cada nudo. El patrón de consumos calibrado se introduce en la simulación 5, la simulación

7 corresponde a la primera distribución espacial de las fugas; y en la simulación 10 se realizó la calibración de las pérdidas de carga de la red. Debido a la diferencia significativa entre el caudal observado y el simulado, introducida por el ajuste de los coeficientes de pérdidas en líneas, fue necesario realizar un segundo ajuste del patrón de consumos en la simulación 17. Finalmente la simulación 19 corresponde a la calibración de modelo, con un valor global de emisor de fugas de $16.2981 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$. Entre cada una de las simulaciones mencionadas fue necesario calibrar nuevamente el emisor global de fugas, pues, la diferencia entre los valores simulados y observados del caudal aumentó significativamente luego del ajuste de cada parámetro. La Tabla 19 resume la evolución de las desviaciones entre los 672 valores medidos (observados) y simulados del caudal inyectado para todo el proceso de calibración, siendo el valor de caudal medio observado de 144.50 l/s.

Tabla 19 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados del caudal inyectado, caso N50-M31

Simulación	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	59.68	84.872	85.291	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	141.18	10.402	11.590	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	144.36	9.751	11.213	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	144.54	9.730	11.219	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 4	144.55	9.729	11.219	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	144.50	0.491	0.557	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 6	144.55	0.487	0.557	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 7	144.38	0.533	0.598	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 8	144.54	0.509	0.582	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 9	144.55	0.508	0.582	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 10	134.07	10.479	10.803	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 11	142.49	3.547	4.000	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 12	144.13	3.191	3.615	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 13	144.46	3.167	3.625	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 14	144.53	3.164	3.631	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 15	144.55	3.164	3.632	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 16	144.55	3.164	3.632	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 17	144.45	0.680	0.771	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 18	144.53	0.681	0.774	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 19	144.55	0.682	0.776	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

La Figura 37 muestra la curva de modulación de la demanda base inicialmente asumida, los patrones de consumo calibrados.

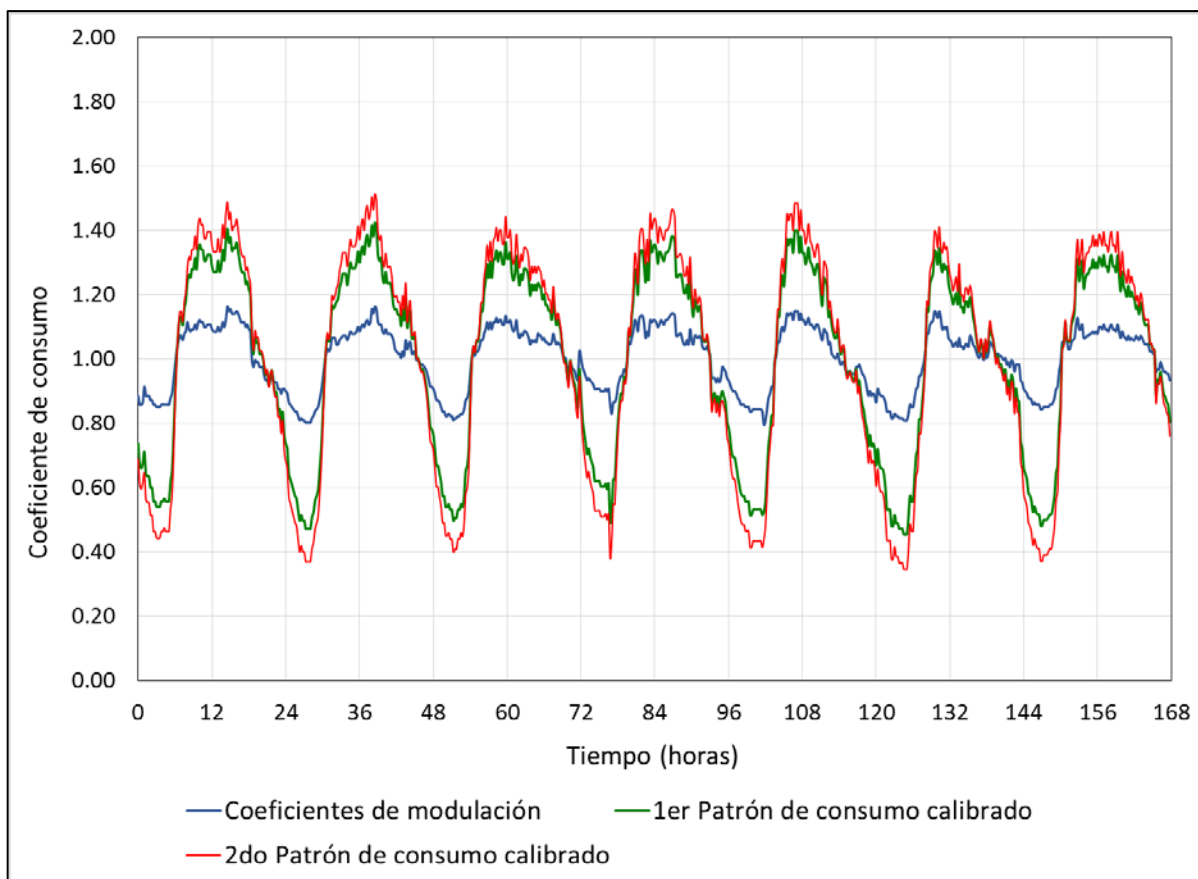


Figura 37 Curva de modulación estimada inicialmente (azul) y patrón de consumos calibrados (verde y rojo). Caso N50-M31

El factor de uso nocturno para estimar el uso nocturno fue de 0.5343. El uso de este factor multiplicador para los caudales nocturnos de la prueba de subdivisión del distrito permitió obtener los factores de ponderación mostrados en la Tabla 20. Para este caso los valores de caudal nocturno para cada sector hidráulico fueron tomados de los registros de pruebas realizadas en el primer semestre del 2014. Por políticas de operación del abastecimiento respecto a la presión máxima suministrada a la red de distribución, estos valores fueron obtenidos en varias pruebas de subdivisión del distrito de medición.

Tabla 20 Factores de ponderación para la distribución espacial del emisor global de fugas, caso N50-M31

Sector Hidráulico	Caudal Nocturno [l/s]	Presión [mca]	Uso Nocturno Estimado [l/s]	Caudal de fugas [l/s]	Indicador de fugas [l/s(mca) ^{0.5}]	Factor de Ponderación [%]
N50-305	6.5	30	3.47	3.03	0.5526	5.4%
N50-306	14.0	33	7.48	6.52	1.1349	11.1%
N50-308	11.0	33	5.88	5.12	0.8917	8.8%
N50-309	10.0	33	5.34	4.66	0.8106	8.0%
N50-312	19.0	38	10.15	8.85	1.4353	14.1%
N50-313	23.4	22	12.50	10.90	2.3233	22.8%
N50-314	9.8	32	5.24	4.56	0.8067	7.9%
N50-315	10.0	23	5.34	4.66	0.9710	9.5%
ACUEDUCTO	17.5	42	9.35	8.15	1.2575	12.3%
					10.1841	100.0%

La Tabla 21 presenta los valores de ajuste para los coeficientes de pérdidas asignados a líneas del modelo. La Tabla 22 muestra las estadísticas de las desviaciones entre las presiones simuladas y observadas antes y después del ajuste de válvulas; correspondientes a las simulaciones 9 y 10 respectivamente, y la última simulación del proceso de calibración.

Tabla 21 Ajuste de coeficientes de pérdidas en líneas del modelo hidráulico, caso N50-M31

Línea	Diámetro [mm]	Coefficiente de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-141	250	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-229	300	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-231	400	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-332	300	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-529	400	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-109	250	350	N50-308	abastecimiento
L-67	250	320	N50-308	interna
L-441	200	320	N50-308	interna
L-371	100	15	N50-309	abastecimiento
L-35	80	250	N50-312	interna
L-42	80	250	N50-312	interna
L-47	80	250	N50-312	interna
L-51	80	250	N50-312	interna
L-53	150	250	N50-312	interna
L-55	100	250	N50-312	interna
L-116	80	250	N50-312	interna
L-126	80	250	N50-312	interna
L-127	100	250	N50-312	interna
L-128	80	250	N50-312	interna
L-133	80	250	N50-312	interna
L-211	100	250	N50-312	interna
L-269	80	250	N50-312	interna
L-272	80	250	N50-312	interna
L-280	80	250	N50-312	interna
L-320	100	250	N50-312	interna
L-322	80	250	N50-312	interna
L-327	100	250	N50-312	interna
L-362	80	250	N50-312	interna
L-363	100	250	N50-312	interna
L-375	100	250	N50-312	interna
L-381	80	250	N50-312	interna
L-384	80	250	N50-312	interna
L-403	100	250	N50-312	interna
L-436	100	250	N50-312	interna
L-57	150	165	N50-312	abastecimiento
L-144	90	170	N50-314	abastecimiento
L-338	110	170	N50-314	abastecimiento
L-147	150	50	N50-315	abastecimiento
L-9	80	200	N50-313	interna
L-23	80	200	N50-313	interna

Línea	Diámetro [mm]	Coficiente de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-34	80	200	N50-313	interna
L-80	80	200	N50-313	interna
L-111	80	200	N50-313	interna
L-179	80	200	N50-313	interna
L-235	80	200	N50-313	interna
L-257	100	200	N50-313	interna
L-354	80	200	N50-313	interna
L-366	80	200	N50-313	interna
L-399	80	200	N50-313	interna
L-502	80	200	N50-313	interna
L-503	100	200	N50-313	interna
L-505	80	200	N50-313	interna
L-39	100	150	N50-313	interna
L-104	80	150	N50-313	interna
L-506	100	150	N50-313	interna
L-310	150	80	N50-313	abastecimiento

Tabla 22 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados de presión, antes y después del ajuste de los coeficientes de pérdida de carga en válvulas, y simulación final del proceso de calibración. Caso N50-M31

Simulación	Nudo	Valor medio observaciones	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio
Simulación 9	N-356	27.98	37.37	9.383	9.551
	N-196	29.51	33.61	4.099	4.209
	N-65	23.25	38.68	15.428	15.569
	N-134	13.65	33.41	19.763	19.826
	N-130	38.54	42.12	3.582	3.611
Simulación 10	N-356	27.98	28.83	0.962	1.122
	N-196	29.51	31.01	1.495	1.644
	N-65	23.25	25.12	1.883	2.005
	N-134	13.65	16.24	2.616	2.844
	N-130	38.54	39.25	0.720	0.825
Simulación 19	N-356	27.98	27.02	1.151	1.433
	N-196	29.51	29.26	0.447	0.559
	N-65	23.25	22.87	1.042	1.232
	N-134	13.65	13.63	1.011	1.283
	N-130	38.54	38.42	0.388	0.483

A continuación se incluyen los gráficos de correlación entre el caudal simulado y observado para la primera (Figura 38) y última simulación (Figura 39), y los correspondientes a los valores de presión simulados antes de realizar la calibración de las pérdidas de carga en la red (Figura 40) y la última simulación del proceso de calibración (Figura 41).

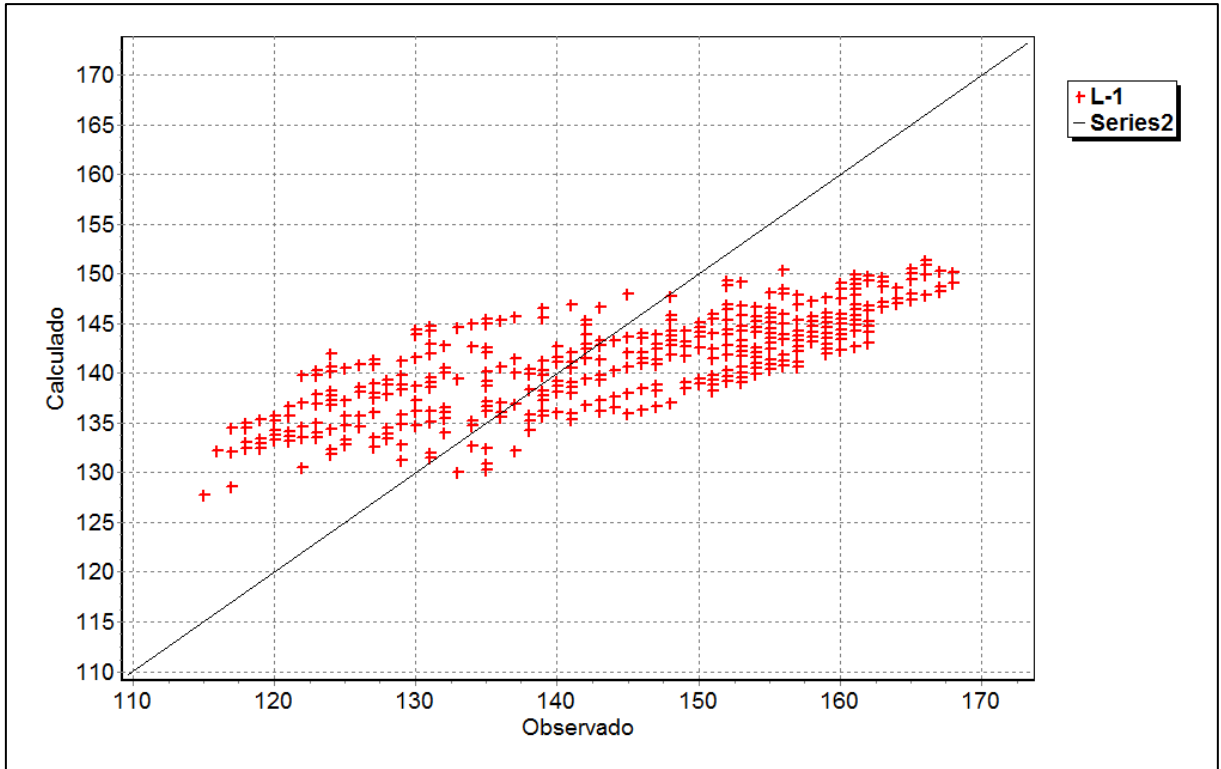


Figura 38 Gráfico de correlación entre valores observados y simulados correspondiente a la simulación con la primera estimación del emisor global de fugas. Caso N50-M31

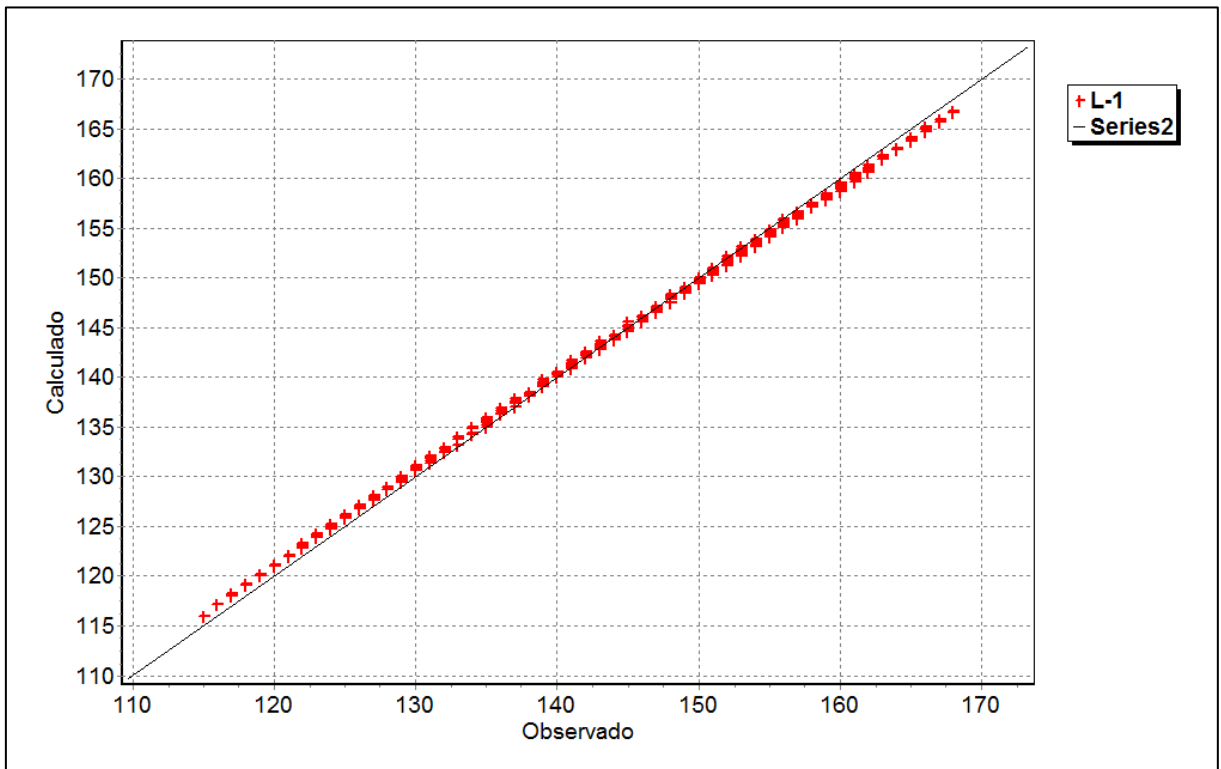


Figura 39 Gráfico de correlación para la simulación final del proceso de calibración. Caso N50-M31

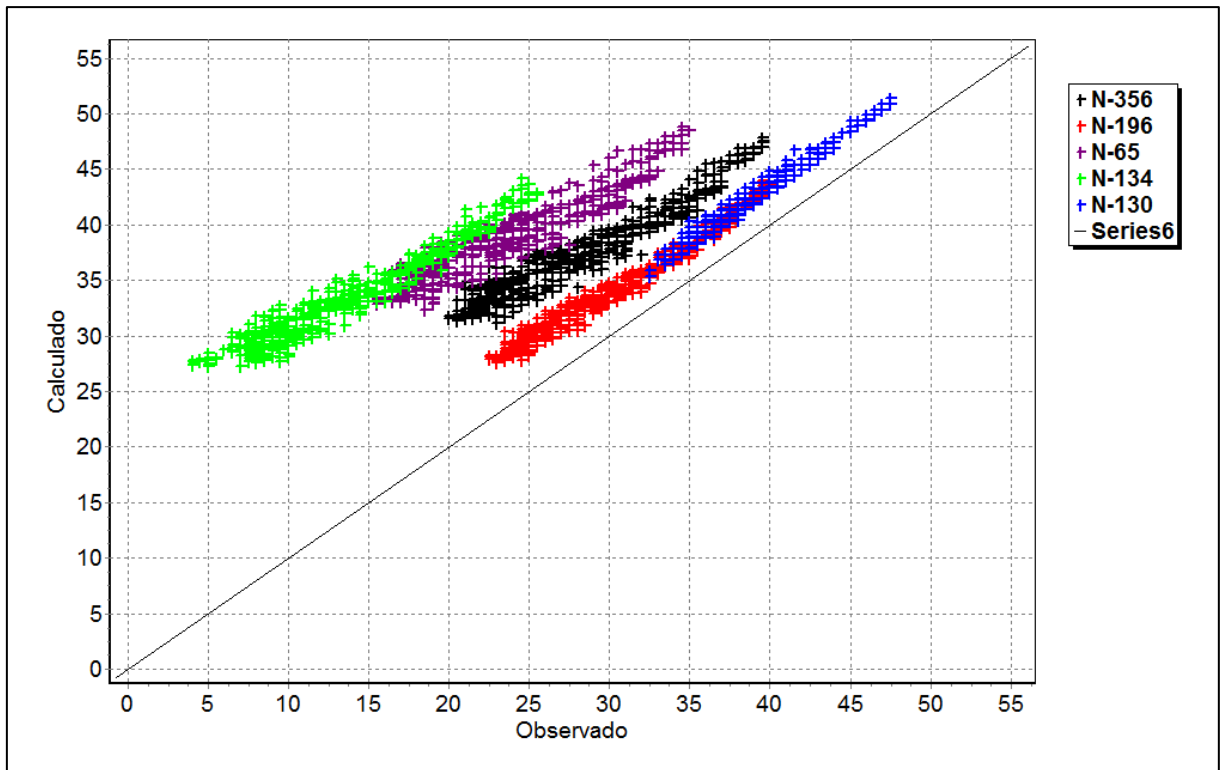


Figura 40 Gráfico de correlación entre presiones simuladas y observadas antes del ajuste de los coeficientes de válvulas (simulación 9). Caso N50-M31

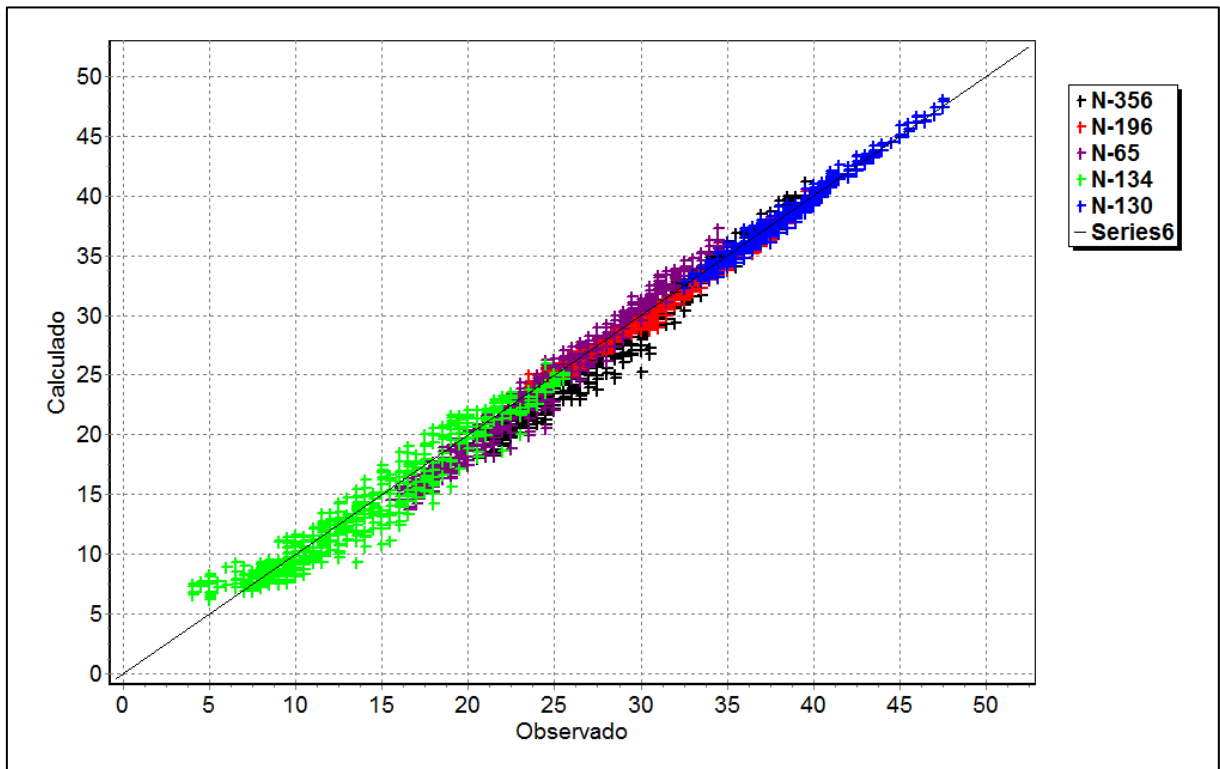


Figura 41 Gráfico de correlación para el modelo hidráulico calibrado (simulación 19). Caso N50-M31

La Figura 42 presenta los caudales observados y las curvas de caudal para la primera simulación (simulación 0), la simulación con el primer valor estimado del emisor global de fugas (simulación 1), la simulación correspondiente al ajuste de los coeficientes de válvulas (simulación 10), y la simulación correspondiente al modelo calibrado (simulación 19).

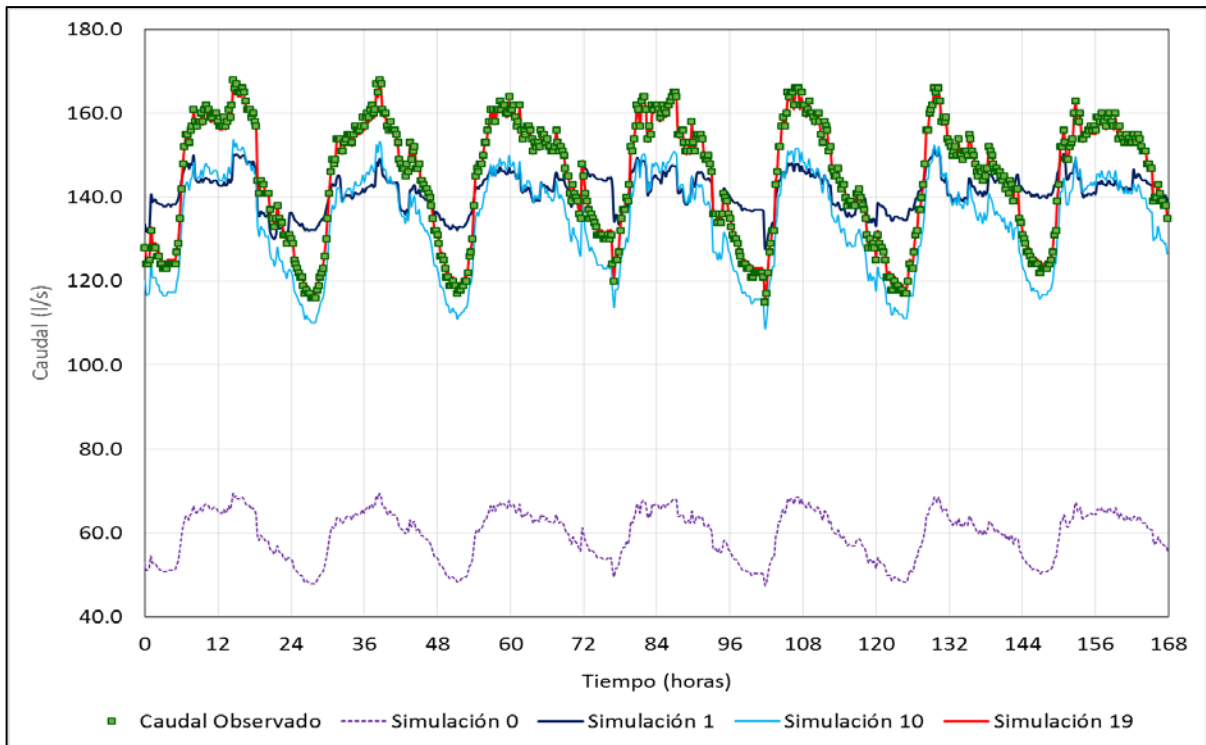


Figura 42 Presión Caudal simulado y observado correspondiente a las principales iteraciones del proceso de calibración del Caso N50-M31

A manera de ejemplo se presenta la Figura 43, en la cual se muestran gráficamente los resultados del ajuste de los coeficientes de pérdidas en válvulas correspondiente al para el nudo N-134.

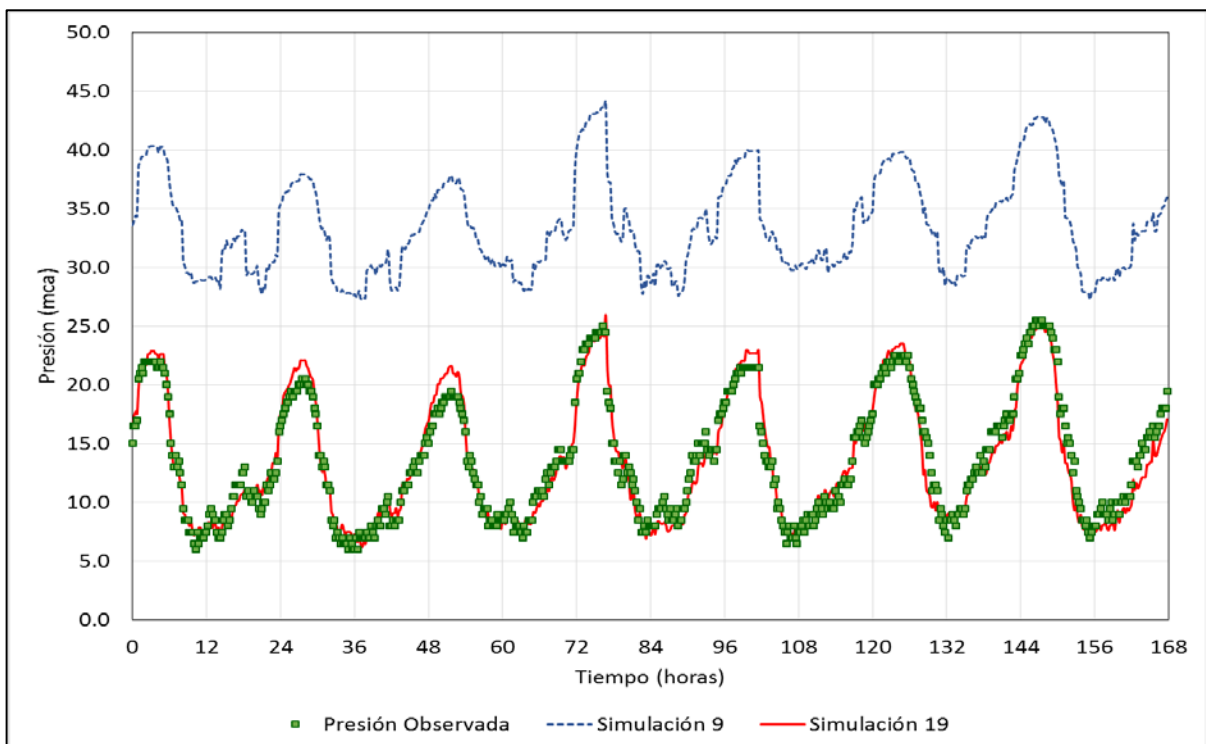


Figura 43 Presión simulada y observada en el nudo N-134, antes del ajuste de coeficientes de pérdidas en líneas (simulación 9) y en la simulación final (simulación 19). Caso N50-M31.

En el anexo 2 se han incluido los gráficos correspondientes a la simulación anterior al ajuste de las pérdidas de carga (simulación 9) y la simulación final para los nudos N-65, N-130, N-196 y N-356, en los cuales se registraron medidas de presión utilizados en el proceso de calibración para este caso de estudio.

4.6.3 Caso 3: distrito de medición CTC-M44

El caso 3 corresponde a la red de rendimiento volumétrico más bajo entre las incluidas como casos de estudio (25.8%). La calibración del modelo hidráulico correspondiente a este caso requirió dieciocho iteraciones, entre las cuales se incluye una segunda calibración del patrón de consumos luego del ajuste de las pérdidas de carga en la red.

La primera estimación del coeficiente emisor de fugas fue de $33.9860 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, valor que repartido proporcionalmente entre los 699 nudos existentes resulta $0.048620 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ en cada nudo. El patrón de consumos calibrado se introduce en la simulación 5, la simulación 7 corresponde a la primera distribución espacial de las fugas, y en la simulación 10 se realizó la calibración de las pérdidas de carga de la red. En la simulación 16 fue necesario realizar un segundo ajuste del patrón de consumos. Finalmente la simulación 18 corresponde a la calibración de modelo, con un valor global de emisor de fugas de $38.9747 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$. La Tabla 23 resume la evolución de las desviaciones entre los valores observados y simulados del caudal para todo el proceso de calibración.

Tabla 23 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados del caudal inyectado, caso CTC-M44

Simulación	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	58.02	167.068	167.378	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	218.01	16.746	18.705	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	224.64	14.988	17.652	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	225.06	11.132	13.734	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	225.08	14.909	17.668	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	225.01	0.962	1.126	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 6	225.08	0.952	1.128	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 7	229.05	3.965	4.018	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 8	225.22	0.363	0.455	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 9	225.09	0.361	0.429	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 10	209.84	15.146	15.489	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 11	222.56	4.042	4.589	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 12	224.65	3.480	4.037	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 13	225.01	3.427	4.046	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 14	225.07	3.419	4.051	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 15	225.08	3.418	4.052	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 16	225.00	0.648	0.761	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 17	225.07	0.643	0.763	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 18	225.08	0.642	0.764	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

La Figura 44 muestra la curva de modulación de la demanda base inicialmente asumida, el primer patrón de consumo calibrado y el segundo ajuste del patrón de consumos realizados durante el proceso de calibración de este caso de estudio.

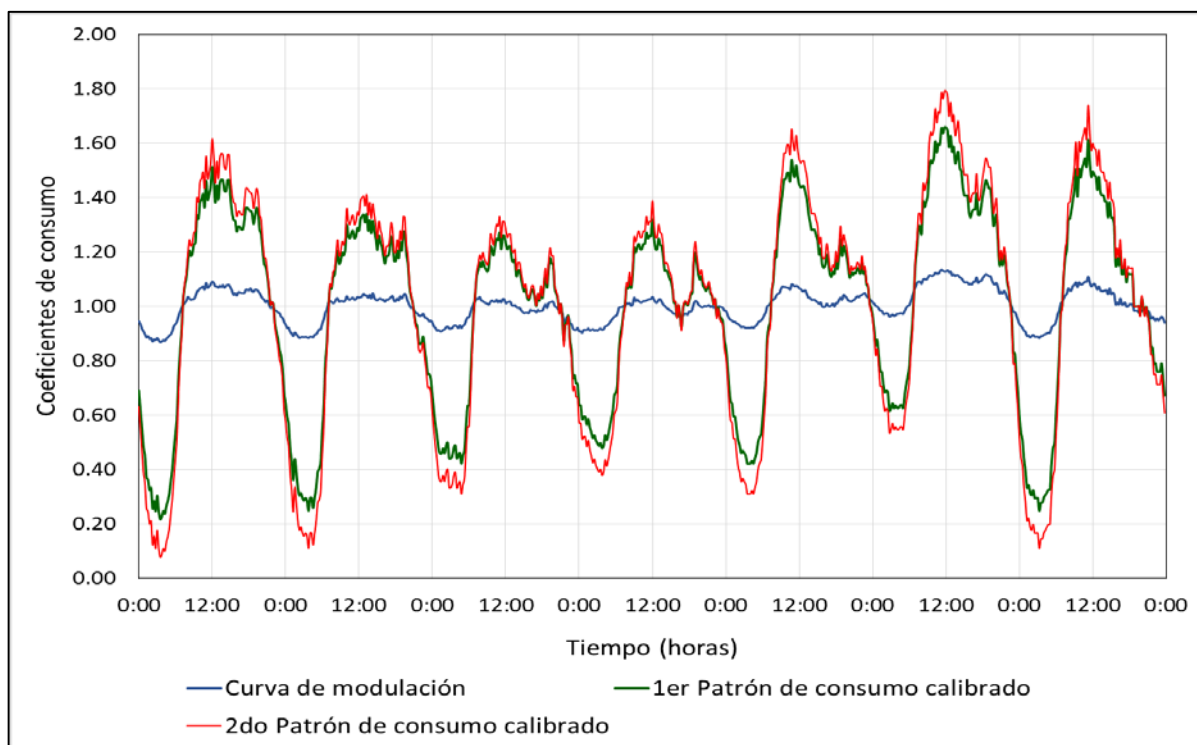


Figura 44 Curva de modulación estimada inicialmente (azul) y patrón de consumos calibrados (verde y rojo). Caso CTC-M44

La Tabla 24 presenta los valores de caudal nocturno, presión de servicio obtenidos en la prueba de subdivisión del distrito de medición en estudio (ver Figura 45). Adicionalmente se muestran los factores de ponderación para la distribución espacial de las fugas calculados a partir del caudal de fugas estimado para cada sector hidráulico. El factor para estimar el consumo nocturno de los abonados del distrito de medición CTC-M44 fue de 0.4165.

Tabla 24 Factores de ponderación para la distribución espacial del emisor global de fugas, caso CTC-M44

Sector Hidráulico	Caudal Nocturno [l/s]	Presión [mca]	Uso Nocturno Estimado [l/s]	Caudal de fugas [l/s]	Indicador de fugas [l/s(mca) ^{0.5}]	Factor de Ponderación [%]
CTC-032-033	95.8	22	39.9007	55.8993	11.9177	48.2%
CTC-053-053	16.7	26	6.95555	9.74445	1.9110	7.7%
CTC-093-094	41.6	28	17.3264	24.2736	4.5872	18.6%
CTC-034	42.2	30	17.5763	24.6237	4.4956	18.2%
ACUEDUCTO	17.2	31	7.1638	10.0362	1.8025	7.3%
					24.7143	100.0%

La Figura 45 muestra gráficamente los resultados de la prueba de subdivisión del Distrito de Medición N72-M132, realizada para obtener el caudal nocturno correspondiente a cada uno de los cuatro sectores hidráulicos definidos para distribuir espacialmente las fugas.

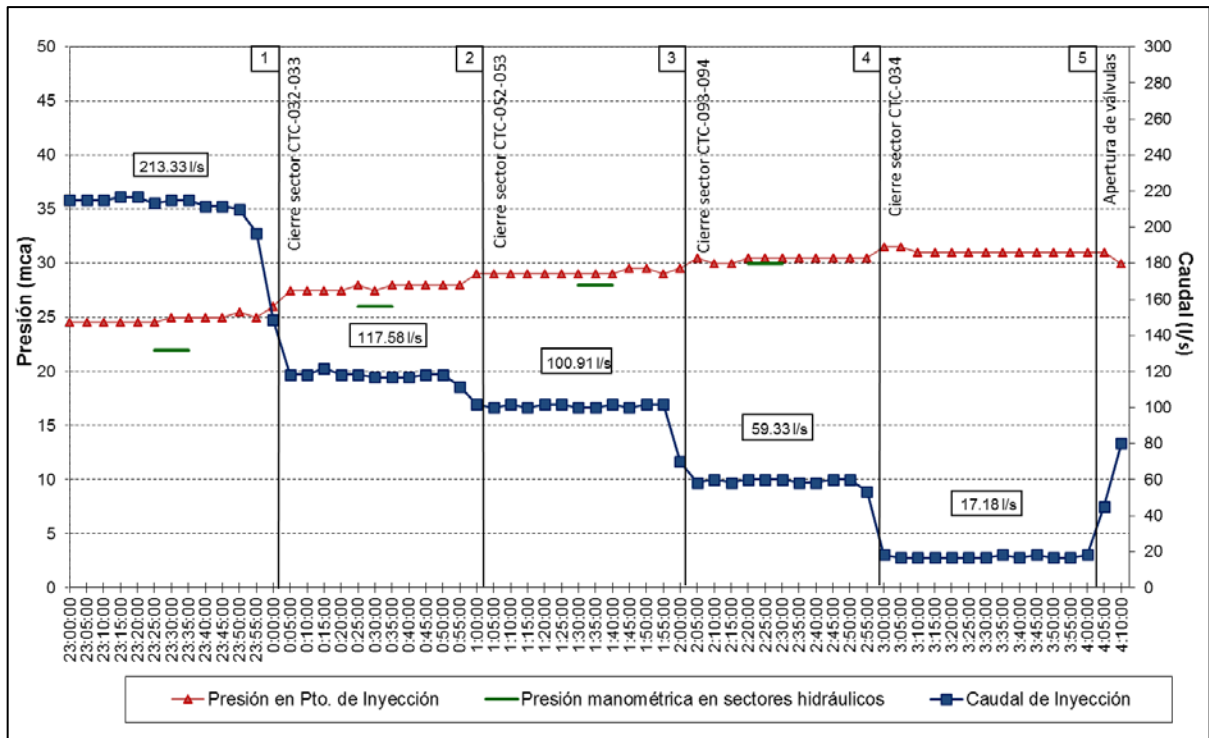


Figura 45 Prueba de subdivisión del distrito de medición del distrito CTC-M44

La Tabla 25 presenta el ajuste del coeficiente de pérdidas realizado para 2 válvulas de seccionamiento en acueductos, 5 válvulas de abastecimiento de los sectores y 22 válvulas internas.

Tabla 25 Ajuste de coeficientes de pérdidas en líneas del modelo hidráulico, caso CTC-M44

Línea	Diámetro [mm]	Coefficiente de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-972	500	200	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-978	500	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-154	80	700	CTC-032-033	interna
L-173	80	700	CTC-032-033	interna
L-297	160	700	CTC-032-033	interna
L-853	80	700	CTC-032-033	interna
L-527	200	500	CTC-032-033	interna
L-38	200	150	CTC-032-033	abastecimiento
L-311	110	150	CTC-032-033	interna
L-167	80	100	CTC-032-033	interna
L-282	80	100	CTC-032-033	interna
L-993	250	100	CTC-032-033	interna
L-172	100	50	CTC-032-033	interna
L-174	80	50	CTC-032-033	interna
L-189	80	50	CTC-032-033	interna
L-313	200	50	CTC-032-033	interna
L-408	200	50	CTC-032-033	interna
L-627	80	50	CTC-032-033	interna
L-635	80	50	CTC-032-033	interna
L-636	80	50	CTC-032-033	interna

Línea	Diámetro [mm]	Coefficiente de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-745	80	50	CTC-032-033	interna
L-782	100	50	CTC-032-033	interna
L-992	80	50	CTC-032-033	interna
L-307	250	25	CTC-032-033	abastecimiento
L-359	200	280	CTC-034	interna
L-421	200	50	CTC-034	abastecimiento
L-357	80	Cerrada	CTC-034	interna
L-291	200	80	CTC-052-053	abastecimiento
L-374	80	120	CTC-093-094	interna
L-608	80	120	CTC-093-094	interna
L-990	80	80	CTC-093-094	interna
L-246	250	20	CTC-093-094	abastecimiento
L-271	250	Cerrada	CTC-093-094	abastecimiento
L-260	80	Cerrada	CTC-093-094	interna

La Tabla 26 muestra las estadísticas de las desviaciones entre las presiones simuladas y observadas antes y después del ajuste de válvulas; correspondientes a las simulaciones 9 y 10 respectivamente, y la última simulación del proceso de calibración (simulación 18).

Tabla 26 Estadística de las desviaciones entre valores medidos y simulados de presión, antes y después del ajuste de los coeficientes de pérdida de carga en válvulas, y simulación final del proceso de calibración. Caso CTC-M44

Simulación	Nudo	Valor medio observaciones	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio
Simulación 9	N-43	12.51	23.53	11.019	11.040
	N-49	19.02	23.40	4.377	4.394
	N-119	17.95	22.34	4.383	4.401
	N-647	14.71	22.54	7.822	7.843
	N-658	19.14	21.91	2.775	3.142
	N-393	15.93	23.90	7.971	8.057
	N-368	21.26	22.97	1.709	1.747
Simulación 10	N-43	12.51	12.85	0.788	0.979
	N-49	19.02	19.38	0.461	0.560
	N-119	17.95	18.21	0.432	0.537
	N-647	14.71	14.84	0.649	0.802
	N-658	19.14	19.27	0.856	1.072
	N-393	15.93	16.40	1.031	1.301
	N-368	21.26	21.48	0.342	0.429
Simulación 18	N-43	12.51	11.62	1.167	1.400
	N-49	19.02	18.69	0.467	0.594
	N-119	17.95	17.32	0.696	0.829
	N-647	14.71	13.69	1.120	1.367
	N-658	19.14	18.73	0.859	1.081
	N-393	15.93	15.49	1.271	1.532
	N-368	21.26	21.10	0.321	0.420

A continuación se incluyen los gráficos de correlación entre el caudal simulado y observado para la primera (Figura 46) y última simulación (Figura 47), y los correspondientes a los valores de presión simulados antes de realizar la calibración de las pérdidas de carga en la red (Figura 48) y la última simulación del proceso de calibración (Figura 49).

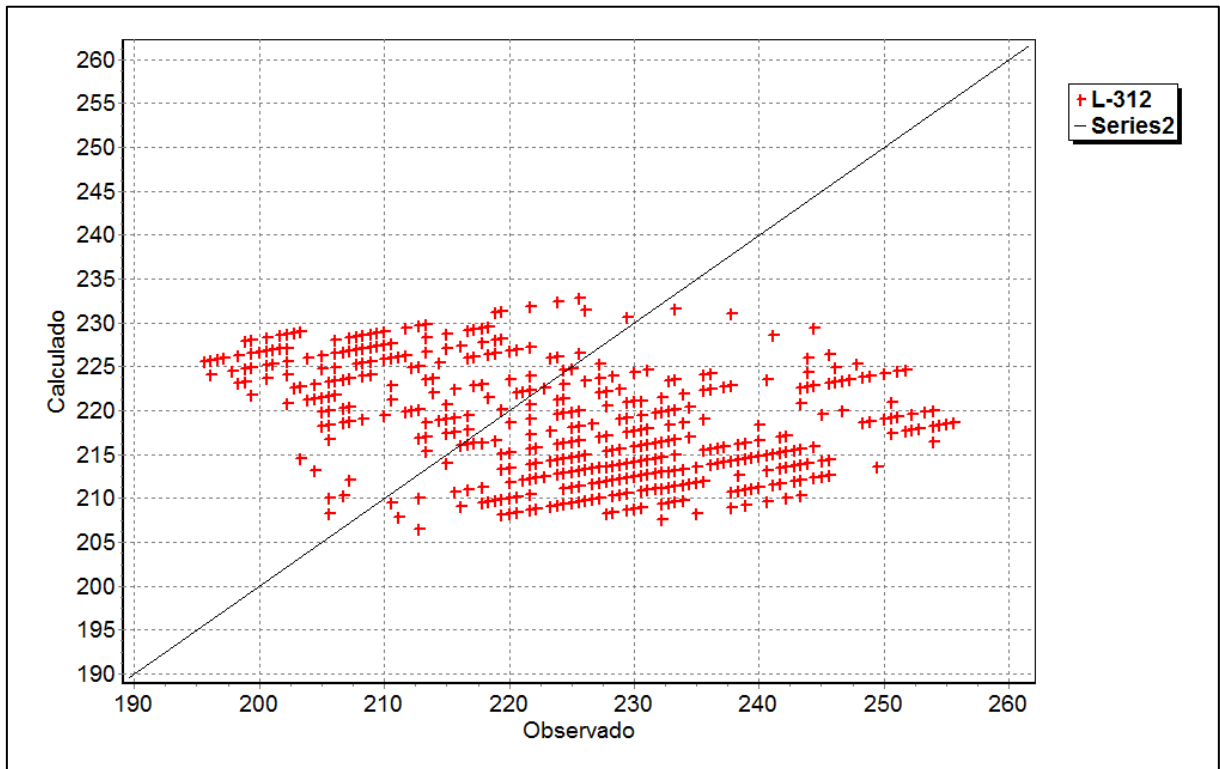


Figura 46 Gráfico de correlación entre valores observados y simulados correspondiente a la simulación 1 con la primera estimación del emisor global de fugas. Caso CTC-M44

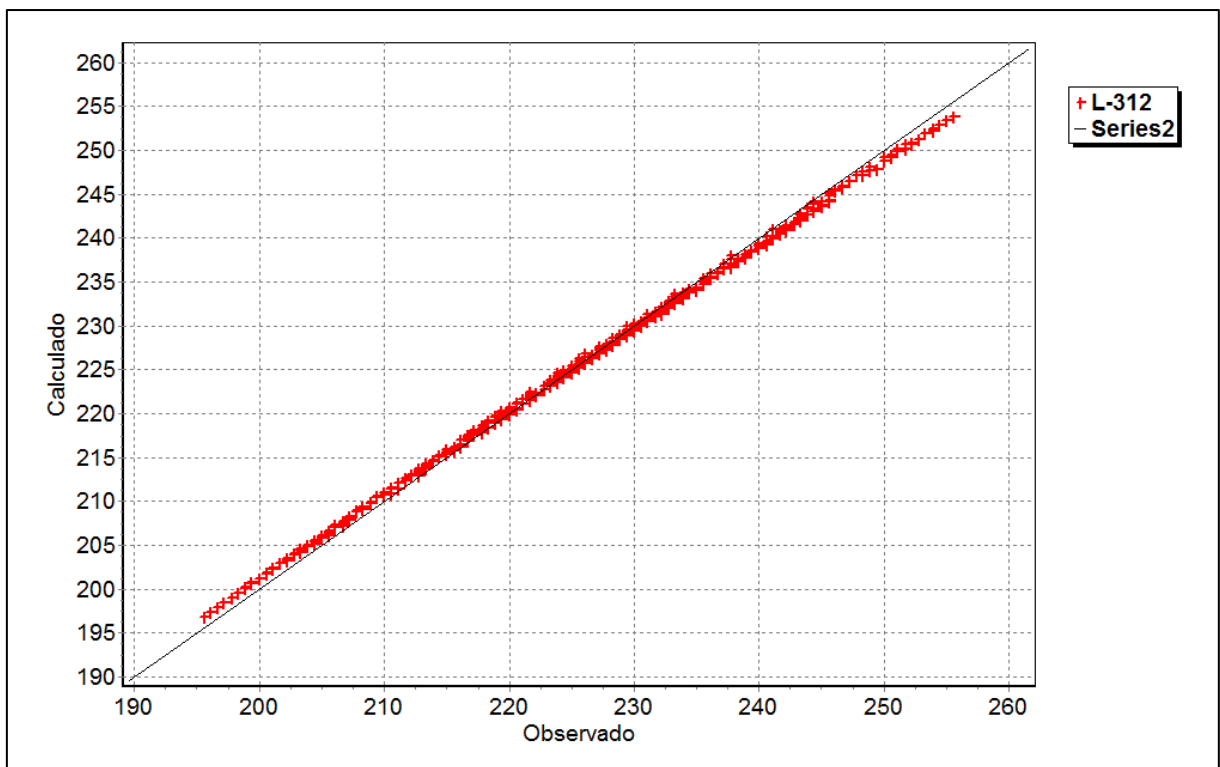


Figura 47 Gráfico de correlación para la simulación final del proceso de calibración. Caso CTC-M44

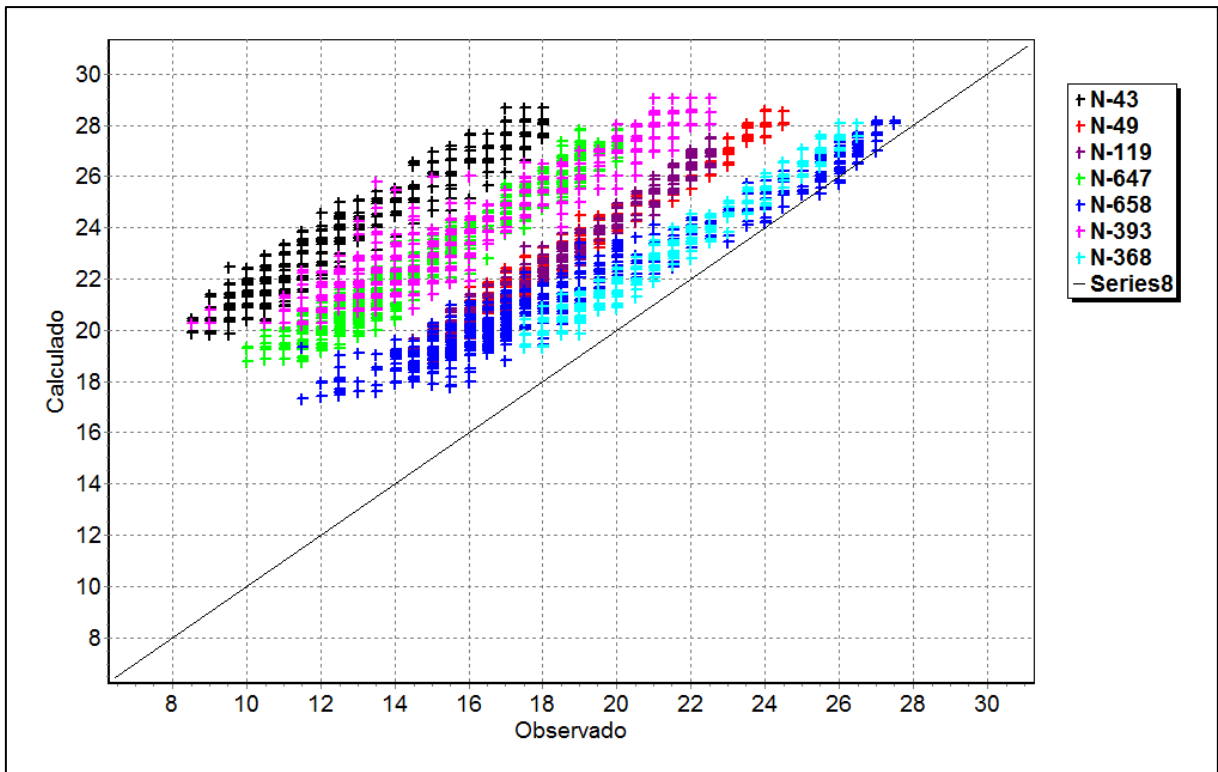


Figura 48 Gráfico de correlación entre presiones simuladas y observadas antes de realizar el ajuste de los coeficientes de pérdida de carga en válvulas (simulación 9). Caso CTC-M44

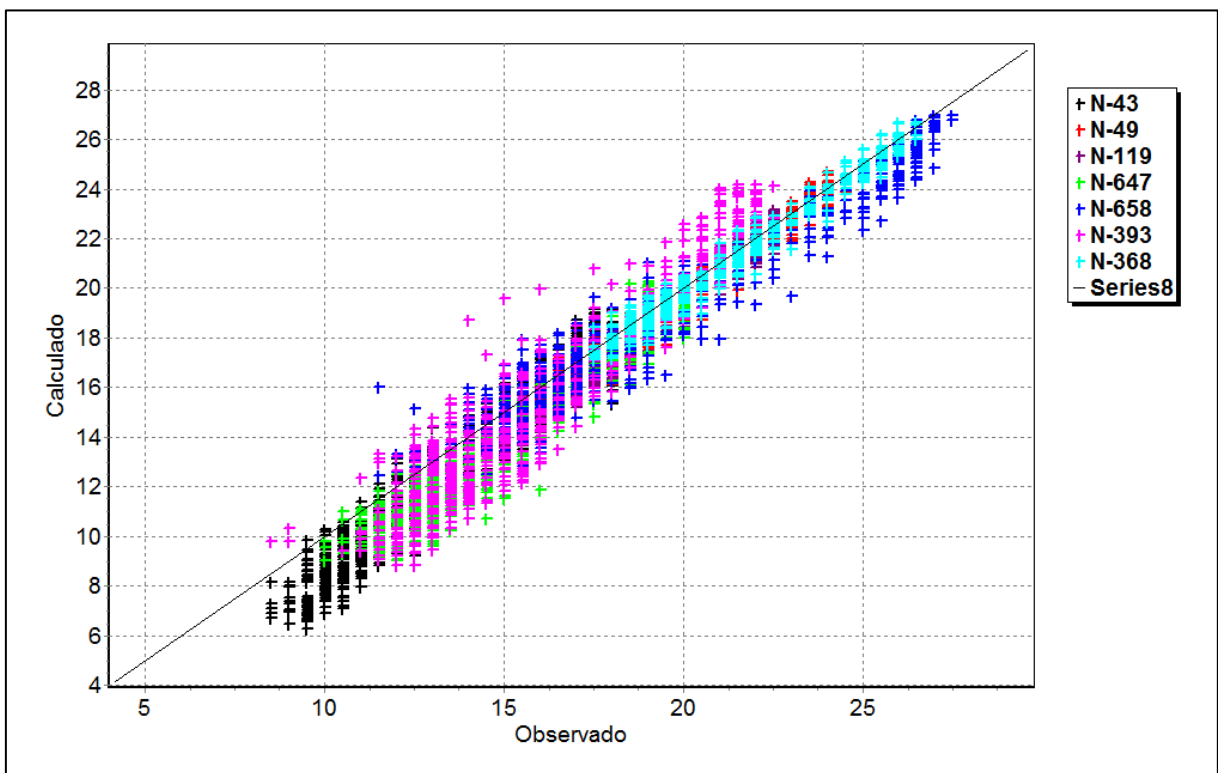


Figura 49 Gráfico de correlación del modelo hidráulico calibrado (simulación 18). Caso CTC-M44

La Figura 50 presenta los caudales observados y las curvas de caudal para la primera simulación (simulación 0), la simulación con el primer valor estimado del emisor global de

fugas (simulación 1), la simulación correspondiente al ajuste de los coeficientes de válvulas (simulación 10), y la simulación correspondiente al modelo calibrado (simulación 18).

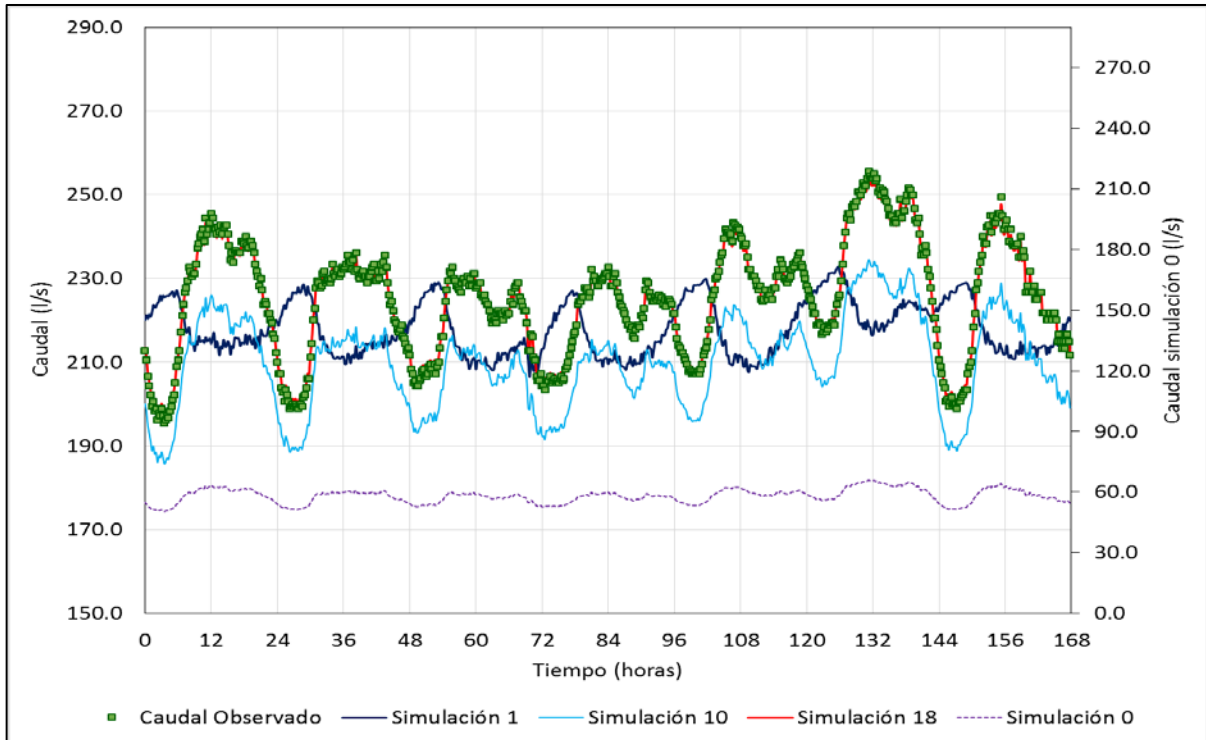


Figura 50 Caudal simulado y observado correspondiente a la simulación 0 (sin emisores de fugas). Caso CTC-M44

A manera de ejemplo se presenta la Figura 51, en la cual se muestran gráficamente los resultados del ajuste de los coeficientes de pérdidas en válvulas correspondiente al para el nudo N-658.

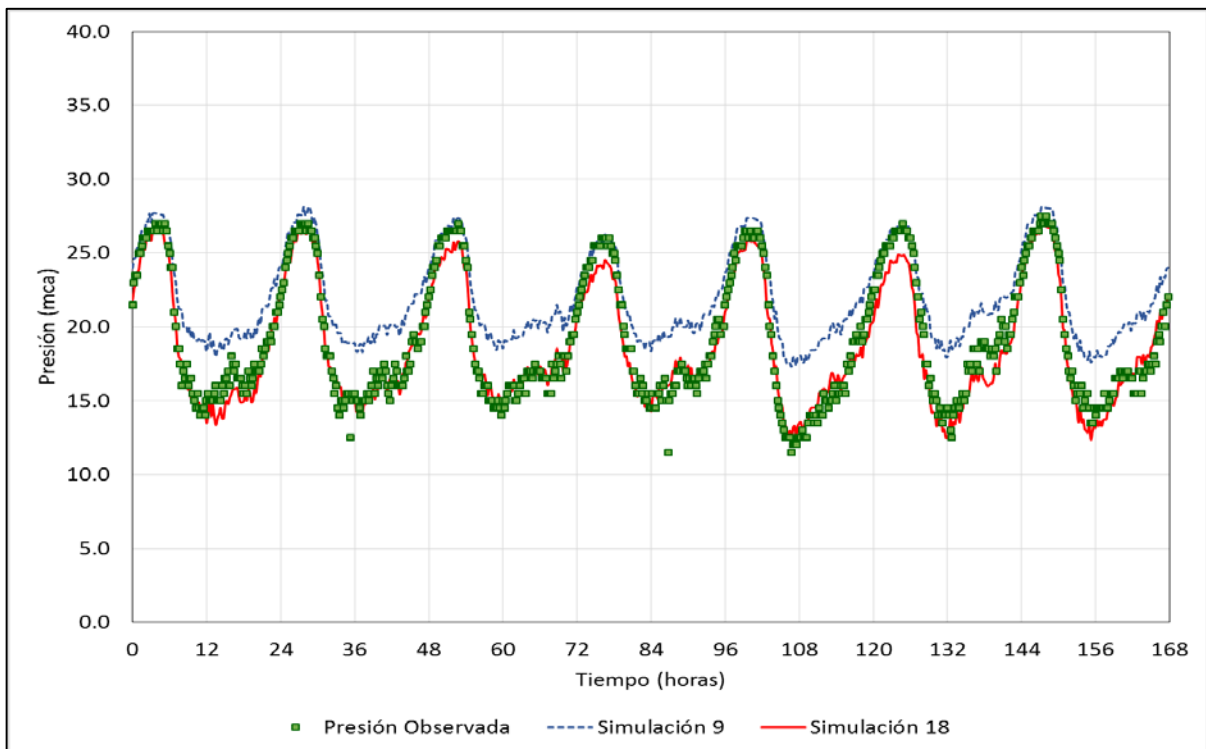


Figura 51 Presión simulada y observada en el nudo N-658, antes del ajuste de coeficientes de pérdidas en líneas (simulación 9) y en la simulación final (simulación 18). Caso CTC-M44.

En el anexo 3 se han incluido los gráficos correspondientes a la simulación anterior al ajuste de las pérdidas de carga (simulación 9) y la simulación final para los nudos N-43, N-49, N-119, N-368, N-393, N-647 y N-658; en los cuales se registraron medidas de presión utilizados en el proceso de calibración para este caso de estudio.

4.7 Resumen de los casos de estudio desarrollados

Se han desarrollado tres casos de estudio para validar la metodología propuesta. Los casos de estudio consisten en redes de distribución con diferentes rendimientos volumétricos, pertenecientes al sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Guayaquil (Ecuador). Los sectores seleccionados fueron los distritos N72-M132, N50-M31, CTC-M44. A continuación se presenta la Tabla 27 y la Tabla 28 que resumen los principales resultados de los procesos de calibración realizados en cada caso de estudio.

Tabla 27 Comparación de resultados de la calibración del caudal inyectado

Distrito de Medición	Rendimiento Volumétrico (%)	No. de simulaciones realizadas	No. de ajustes del patrón de consumo	Emisor de fugas [l/s(mca) ^{0.5}]	ECM del caudal simulado
N72-M132	77.7	10	1	1.5458	0.419
N50-M31	41.3	19	2	16.2981	0.776
CTC-M44	25.8	18	2	38.9747	0.764

Tabla 28 Comparación de resultados de la calibración de las presiones

Distrito de Medición	No. puntos de medida de presión	No. de válvulas ajustadas	ECM series de presión	Min. ECM de presiones	Nudo de Min. ECM	Máx. ECM de presiones	Nudo de Máx. ECM
N72-M132	5	6	1.083	0.506	N-183	1.897	N-5
N50-M31	5	56	1.074	0.483	N-130	1.433	N-356
CTC-M44	7	34	1.106	0.594	N-49	1.532	N-393

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

La investigación desarrollada en este Trabajo de Fin de Máster planteó resolver el problema de la calibración preliminar de modelos hidráulicos. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica del estado del arte referente a la carga y la calibración de modelos hidráulicos; complementada con la revisión de varios conceptos de la gestión de pérdidas que resultan relevantes para apoyar la propuesta metodológica desarrollada. De manera específica, la revisión del estado del arte se ha enfocado en los siguientes temas:

- La asignación de los consumos supuestos en la red de distribución, enfocándose en los métodos para la distribución espacial y temporal de los consumos.
- La asignación de las fugas en el modelo hidráulico, presentando los distintos enfoques para la representación de las fugas como demandas dependientes de la presión.
- El problema de la calibración es revisada en varios apartados; en los que se incluyen las principales fuentes de error en la modelación hidráulica, las etapas que conformarían un procedimiento general para la calibración, y una revisión de los criterios de calibración propuestos por académicos, consultores y autoridades del sector del agua.
- Las técnicas avanzadas de calibración basadas en enfoques analíticos e implícitos, apoyadas en métodos de optimización evolutivos y no evolutivos; propuestas para la solución al problema de la calibración de modelos hidráulicos.
- La estimación de fugas en la red de distribución. Basada en el balance hídrico y técnicas propias de la gestión de pérdidas; tales como la detección de fugas apoyada en el concepto de Distrito de Medición.

Analizando la bibliografía revisada en el estado del arte se ha propuesto una metodología basada en la modelación de demandas dependientes de la presión, distribuidas espacialmente en función de la longitud de las tuberías y del nivel de fugas estimado para sectores de red definidos en el sistema de distribución. La propuesta metodológica incluye cuatro procesos básicos que buscan calibrar en un principio el emisor global de fugas, determinar los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base, ajustar los coeficientes de pérdida de válvulas, y finalmente calibrar los emisores de fuga distribuidos en los nudos del modelo hidráulico.

Algunos de los aportes más relevantes realizados con la metodología propuesta consisten en:

- Presentar un método iterativo de rápida convergencia, que sea una opción al uso de complejas técnicas matemáticas de optimización; simplificando el problema de la calibración de modelos hidráulicos.
- Obtener la calibración preliminar de los modelos hidráulicos en redes con poca disponibilidad de información relativa a mediciones de caudal y presión.

- Solventar imposibilidad de realizar pruebas de campo para estimar los valores iniciales de los coeficientes de pérdida de carga; representando las pérdidas de carga en la red a través de pérdidas localizadas.
- Incluir en el problema de la calibración la falta de información fiable de la posición de operación de las válvulas instaladas en la red de distribución.
- Conseguir el ajuste de la distribución temporal de la demanda independiente de la presión a partir de la variación temporal de las fugas.
- Distribuir los emisores de fugas en los nudos, de tal forma sea posible obtener una mejor aproximación del modelo hidráulico a las condiciones reales de operación de la red.

Finalmente para validar la metodología propuesta, ésta se ha aplicado a tres casos de estudio; los cuales consisten en sectores de red de distribución con diferentes rendimientos volumétricos, pertenecientes al sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Guayaquil (Ecuador). El desarrollo de los casos de estudio incluyó:

- La revisión de la información técnica y comercial de los Distritos de Medición seleccionados; tales como caudales inyectados y presiones de servicio, rendimiento volumétrico, material de las tuberías, y volumen suministrado por categoría de consumo y tipo de facturación.
- La descripción general de los modelos construidos; cuantificando los elementos líneas y nudos existentes, y el rango de la elevación de éstos últimos.
- La presentación gráfica de los datos de caudal y presión que fueron utilizados para la calibración de los modelos.
- La revisión del proceso de carga de los consumos en los modelos hidráulicos.
- La revisión de los resultados de la aplicación de la metodología de calibración en los tres casos de estudio.

En definitiva, se concluye de manera general que el método resulta válido para redes de distribución con escasa información relativa a mediciones de caudal y presión, y de diferente rendimiento volumétrico. Siendo posible afirmar que la rapidez de convergencia del proceso iterativo propuesto está condicionada al nivel de pérdidas de la red.

El ajuste de los coeficientes de pérdidas en válvulas resulta más simple en las redes con menor número de válvulas instaladas. En los sectores de red con válvulas internas, el ajuste del coeficiente de pérdidas en las válvulas a la entrada del sector no fue suficiente para ajustar las presiones simuladas a las medidas en la red de distribución.

Por otro lado, la calibración del patrón de consumo de la demanda base resulta de gran utilidad práctica para aquellos abastecimientos que no disponen de los recursos tecnológicos para realizar estudios orientados a obtener el perfil de consumo de sus abonados. Sin embargo, la definición de un único perfil de consumo puede resultar poco útil para aquellos casos en que se requiera un análisis más preciso.

5.2 Desarrollos futuros

A la vista del trabajo realizado y con la idea de continuar en una tesis doctoral, quedan pendientes los siguientes desarrollos:

- Comparar entre sí diferentes métodos de reparto del emisor global de fugas.
- Incluir en la metodología una técnica de optimización que permita ajustar las pérdidas de carga en válvulas.
- Extender la metodología de calibración propuesta para incluir el ajuste de las rugosidades de las tuberías.
- Desarrollar un algoritmo que optimice el proceso de calibración propuesto.
- Verificar y validar el método en redes con mayor número de puntos de medida de parámetros hidráulicos.

Referencias

- Alegre, H. y Covas, D. (2005) Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água: Uma abordagem centrada na reabilitação. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Instituto Superior Técnico
- Alegre, H., Teixeira, S., Almeida, M. y Vieira, P. (2005) Controlo de Perdas de Água em Sistemas Públicos de Adução e Distribuição. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Instituto Superior Técnico
- Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E.J., Cubillo, F., Hirner, W., Merkel, W., y Parena, R. (2006). Performance Indicators for Water Supply Services: IWA Manual of Best Practice. IWA Publishing.
- Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera, E., Jr., and Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation." J. Water Resource Planning and Management, ASCE, Vol. 131 No. 6, 458–466, Noviembre 2005
- Alvisi S. y Franchini M. (2009) "Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems." Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 135, No. 6, Noviembre 2009
- American Water Works Association Leak Detection and Water Accountability Committee (1996) "Water Accountability." Journal American Water Works Association, Vol. 88, No. 7, 108-111, Julio 1996
- AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee (1999) "Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling." Proceeding of Informatic Management and Technology Conference, New Orleans
- American Water Works Association (2009). Water audits and loss control programs, Manual of water supply practices M36. Tercera edición, American Water Works Association
- AWWA (2013) "Committee Report: Defining model calibration." Journal of American Water Works Association, Vol. 105, No. 7, 60-63, Julio 2013
- Arregui, F., Cabrera, E. Jr y Cobacho, R. (2006) Gestión integral de contadores. IWA Publishing. Londres
- Basciá, A. y Tucciarelli, T. (2003) "Simultaneous Zonation and Calibration of Pipe Network Parameters." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 5, Mayo 2003
- Bhave P.R. (1988) "Calibrating water distribution network models." Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 114, No.1, Febrero 1988
- Boulos P.F. y Wood D.J. (1990) "Explicit calculation of pipe-network parameters." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 11, Noviembre 1990

- Boulos P.F. y Ormsbee L. E. (1991) "Explicit network calibration for multiple loading conditions." *Civil Engineering Systems*, Taylor & Francis, Vol. 8, No. 3, 1991
- Boulos, P.F. (2006) "Managing leaks using flow step-testing, network modeling, and field measurement." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 103, No. 2, 90-97, Febrero, 2011.
- Boulos, P.F., Lansey, K. y Karney, B. (2006) *Comprehensive Water Distribution System Analysis Handbook for Engineers and Planners*. MWH Soft Press.
- Brothers, K. (2003) "A practical Approach to Water Loss Reduction." *Water 21*, IWA Publishing, 54-55, Junio 2003
- Buie, L.M. (2000) "Accounting for Lost Water." *Journal American Water Works Association*, Vol. 92, No. 7, 67-71, Julio 2000.
- Butler, D. (2009) *Leakage Detection and Management*. Palmer Environmental
- Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F. y García-Serra, J. (1999). "Auditoría de redes de distribución de agua." *Ingeniería del Agua*, Vol. 6, No. 4, 291-303, Diciembre 1999
- Cabrera, E., Espert, V. Garcpi-Serra, J. y Martínez, F. (2009) *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. ITA-Universidad Politécnica de Valencia.
- Cabrera, E. Jr., Dane, P., Haskins, S. y Theuretzbacher-Fritz H. (2011) *Benchmarking Water Services: Guiding water utilities to excellence*. IWA Publishing
- Cabrera, E. (2013) "Balances hídricos en redes de agua: El criterio de la International Water Association (IWA)" *Apuntes de la asignatura Gestión Técnica y Operación de Sistemas de Distribución de Agua a presión, Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente*, Universidad Politécnica de Valencia.
- Cassa, A., Van Zyl, J. y Laubscher, R. (2010) "A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes." *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, Vol. 7, No. 2, 109-120, Abril 2010
- Cesario, A. y Lee, T. (1980) "A computer method for loading model networks." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 72, No. 4, Abril 1980.
- Cesario, L. (1995) *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. American Water Works Association.
- Cole, G.B. (1983) "Leak Detection Program Reduces Unaccounted-for Water" *Opflow*, American Water Works Association, Vol. 9, No. 4, 6-7, Abril 1983
- Cheung, P. y Souza, R. (2006) "Comparação de métodos de calibração de redes hidráulicas". Universidad de Sao Paulo.
- Christie, M., Cliffe, A., Dawid, P. y Senn, S. (2011) *Simplicity, Complexity and Modelling*. John Wiley & Sons Ltd. Primera edición.
- Datta R.S.N. y Sridharam K. (1994) "Parameter estimation in water distribution systems by least squares." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 4, Julio/Agosto 1994
- De Paola, F., Fontana, N. Galdiero, E., Giugni, M., Sorgenti degli Uberti, G. y Vitaletti, M. (2014) "Optimal design of district metered areas in water distribution networks."

- 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013, Elsevier, 449-457
- Di Nardo, A. y Di Natale, M. (2011) "A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks." *Engineering Optimization*, Taylor & Francis, Vol. 43, No. 2, 193-211, Febrero 2011
 - Edwards, J., Cole, S. y Brandt, M. (2006) "Quantitative results of EPS model calibrations with a comparison to industry guidelines." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 98, No. 11, 72-83, Noviembre 2006
 - EPA (2010). Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems. Office of Water, United States Environmental Protection Agency.
 - Fanner, P. (2004) "Assessing Real Water Losses: A practical approach." *Water* 21, Vol. 6, No. 2, 49-50, Abril 2004
 - Fanner, P., Sturm, R., Thornton, J., y Liemberger, R. (2007a). Leakage Management Technologies. American Water Works Association & Research Foundation, American Water Works Association e IWA Publishing.
 - Fanner, P., Thornton, J., Liemberger, R. y Sturm, R. (2007b) Evaluating Water Loss and Planning Loss Reduction Strategies.
 - Farina, G., Creaco, E. y Franchini, M. (2014) "Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes." *Civil Engineer and Environmental Systems*, Taylor & Francis, Vol. 31, No. 14, 36-50
 - Farley, M. (1985) "District Metering Part 1: System Design and Installation." *Water Research Centre Report ER 180E*
 - Farley, M. y Merrifield, T. (1987) "District Metering Part 2: System Operation." *Water Research Centre Report ER 210E*
 - Farley, M. (2001) Leakage Management and Control: A Best Practice Training Manual. Organización Mundial de la Salud (WHO)
 - Farley, M. y Trow, S. (2003). Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control. IWA Publishing. American Water Works Association & Research Foundation
 - Fillion, Y. (2003) "Sources of error in network modeling: a question of perspective." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 95, No. 2, 119-130, Febrero 2003
 - Franchini, M. y Alvisi, S. (2010) "Model for hydraulic networks with evenly distributed demands along pipes." *Civil Engineer and Environmental Systems*, Taylor & Francis, Vol. 27, No. 2, 133-153, Junio 2010
 - García-Serra, J. (1984) Modelización y mejora de la red de distribución de Gandía-Playa. Interconexión con la red de Gandía Pueblo. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
 - García, V., Cabrera, E. y Cabrera, E. Jr. (2006). "The Minimum Night Flow revisited." *Water Distribution System Analysis Symposium*, ASCE.
 - García, J., Cabrera, E. y Cabrera Jr, E. (2007) "Water saving evaluation applying a pressure management strategy." *Water Loss 2009*, Bucarest

- Gil, J.C. (2010). Sistemas de distribución de agua con intermitencia de servicio: Gestión de demanda y optimización operacional. Lemoine editores.
- Giustolisi, O. y Todini, E. (2009) "Pipe hydraulic resistance correction in WDN analysis." *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, Vol. 6, No. 1, Abril 2009
- Giustolisi, O. (2010). "Considering Actual Pipe Connections in Water Distribution Network Analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 11, 889-900, Noviembre 2010
- Giustolisi, O. y Walski, T. (2012) "Demand Components in Water Distribution Network Analysis." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 138, No. 4, Julio 1, 2012.
- GIZ-Agencia Alemana para la Cooperación Técnica y VAG-Armaturen (2009). Guía para la reducción de pérdidas de agua: un enfoque en la gestión en la presión. Agencia Alemana para la Cooperación Técnica
- Gomes, R., Sa Marques, A. y Souza, J. (2012) "Decision support system to divide a large network into suitable district metered areas." *Water Science and Technology*, IWA Publishing, Vol. 65, No. 9, 1667-1675
- Greco M. y Del Giudice G. (1999) "New approach to water distribution network calibration." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 8, Agosto 1999
- Guerrero, J. y Arango, A. (2008). Evaluación económica de proyectos de Reducción de Pérdidas y Uso Eficiente de Agua en Empresas de Acueducto. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Guth, N. y Klingel, P. (2012) "Demand allocation in Water Distribution Network Modelling: A GIS approach using Voronoi diagrams with constraints." *Application of Geographic Information Systems*, Capítulo 15, INTECH
- Herrera, M., Izquierdo, J., Pérez-García, R. y Montalvo, I. (2012) "Multi-agent adaptative boosting on semi-supervised water supply clusters." *Advances in Engineering Software*, Elsevier Science, Vol. 50, 131-136
- Hudson, W.D. (1964) "Reduction of Unaccounted-for-Water" *Journal of American Water Works Association*, Vol. 56, No. 2, 143-148, Febrero 1964
- Iglesias, P. Y Martínez, J. (2012) Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2 vE. FLUIDOS – UPV, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de Valencia
- Johnson, E. y Vermersch, M. (2011) "IWA guidance for apparent loss reduction: filling the knowledge gap." *Water21*, Vol. 13, No. 4, 48-50, Agosto 2011
- Kanakoudis, V. y Gonelas, K. (2014) "Accurate water demand spatial allocation for water networks modelling using a new approach." *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, Febrero 2014.
- Kapelan, Z. (2002) Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models. Tesis doctoral. School of Engineer and Computer Science. University of Exeter. Reino Unido. Enero 2002.

- Kapelan, Z., Savic, D. y Walters, G. (2007) "Calibration of water distribution hydraulic models using a Bayesian-Type procedure." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 8, August 1, 2007
- Keller, C. W. (1976) "Analysis of Unaccounted-for Water" *Journal of American Water Works Association*, Vol. 68, No. 3, 159-162, Marzo 1976
- Koppel, T. y Vassiljev, A. (2009) "Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age." *Advances in Engineering Software, Elsevier*, Vol. 40, No.2, 659-664, Agosto 2009
- Kumar, S., Narasimham, S. y Bhallamudi, S.M. (2010) "Parameter Estimation in Water Distribution Networks." *Water Resources Management, Springer*, Vol. 24, No. 2, 1251-1272, Abril 2010
- Kunkel, J. (2003). "Committee Report: Applying Worldwide BMPs in Water Loss Control." *American Water Works Association Water Loss Control Committee, Journal American Water Works Association*, Vol. 95, No. 8, 65-79, Agosto 2003
- Lambert, A., Brown, T., Takizawa, M. y Weimer, D. (1999) "A review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems." *J Water SRT - AQUA*, Vol. 48, No. 6, 227-237, Diciembre 1999
- Lambert, A., y Hirner, W. (2000). "Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures." *IWA's Blue Pages, IWA website*.
- Lambert, A. (2001) "What Do We Know About Pressure: Leakage Relationships In Distribution Systems?" *IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management, Brno, República Checa*
- Lambert, A. (2002) "International Report: Water losses management and techniques." *Water Supply*, Vol. 2 No. 4, 1-20, IWA Publishing
- Lambert, A. (2003) "Assessing non-revenue water and its components: A practical approach." *Water21, IWA Publishing*, Vol. 5, No. 4, 50-51, Agosto 2003.
- Lambert, A. y Taylor, R. (2010). *Water Loss Guidelines. Water New Zealand. The New Zealand Water & Wastes Association.*
- Lansey K.E. y Basnet C. (1991) "Parameter estimation for water distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 117, No. 1, Enero/Febrero 1991
- Larado, R. (2012) *Computer Modeling of Water Distribution Systems. Manual of Water Supply Practices M32. American Water Works Association. Tercera edición.*
- Lingireddy, S. y Ormsbee, L. (1999) "Optimal Network Calibration Model Based on Genetic Algorithms." *Proceeding of Water Resources Planning and Management Conference, Junio 1999.*
- Lingireddy, S. y Ormsbee, L. (2002) "Hydraulic Network Calibration Using Genetic Optimization." *Civil Engineering and Environmental Systems, Taylor and Francis*, Vol. 19, No. 1, 13-39.

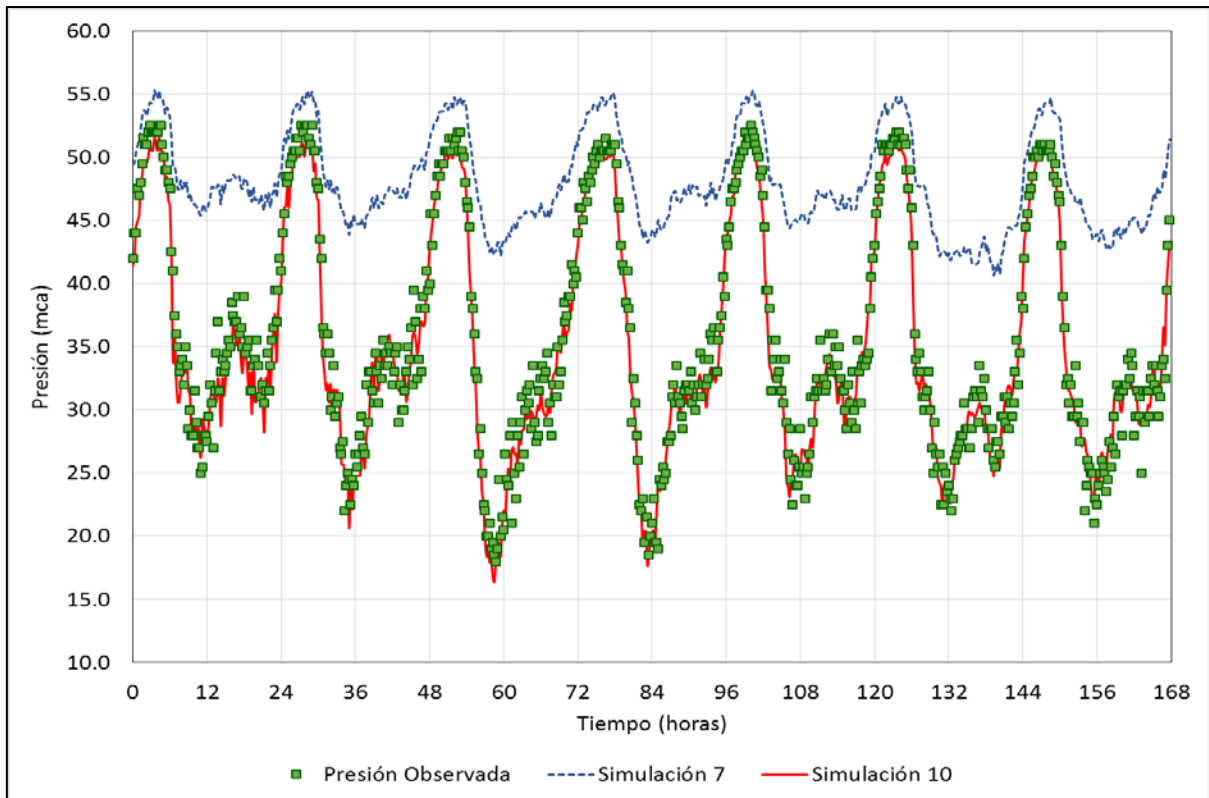
- López Patiño, G. (1994) Modelo matemático de la red arterial de distribución de agua potable a la ciudad de Valencia. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Mallick, K., Ahmed, I., Tickle, K. y Lansey, K.E. (2002) "Determining Pipe Groupings for Water Distribution Networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 128, No. 2, Marzo 2002
- Martínez Solano, J. (1994) Análisis y elaboración de un modelo matemático del sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Jávea (Alicante). Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez Solano, J., www.instagua.upv.es/swmm/descargas/LectorSHPSetup.zip (consultado el 7 de marzo de 2014)
- Martínez Solano, F.J., Iglesias-Rey, P.L., López-Patiño, G., y Fuertes-Miquel, V.S. (2013). Utilización de geoprocetos de los SIG como herramienta para la elaboración y explotación de modelos de redes de agua potable. III Jornadas de Ingeniería del Agua, 23 y 24 de octubre de 2013. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España)
- Mays, L. (2000) *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill.
- Mckenzie, R. (1999) *South African Night Flow Analysis*. South African Water Research Commission
- Menezes, M., (2012). Modelagem computacional visando a reabilitação de redes hidráulicas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Paraíba. João Pessoa, Paraíba. Junio 2012.
- Mora, D. (2012) Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos: Análisis de eficiencia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Julio 2012.
- Morrison, J. (2004) "Managing Leakage by District Metered Areas: A practical approach." *Water* 21, Vol. 6, No. 1, Febrero 2004.
- Morrison, J., Tooms, S. y Rogers, D. (2007) *DMA Management Guidance Notes, Specialist Group Efficient Operation and Management*, IWA
- Mutikanga, H., Sharma, S. y Vairavamoothy, K. (2013). "Methods and Tools for Managing Losses y Water Distribution Systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 139, No. 2, 166-174, Marzo 2013
- Ormsbee, L.E. y Wood D.J. (1986) "Explicit pipe network calibration." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 112, No. 2, Abril 1986
- Ormsbee L.E. (1989) "Implicit network calibration." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, No. 2, Marzo 1989
- Ormsbee, L. y Lingireddy, S. (1997) "Calibrating hydraulic network models." *Journal of the American Water Works Association*, AWWA, Vol. 89, No.2, 42-50
- Parker, J. (2011). "Report 1. Introducing Managing Leakage." UK Water Industry Research Limited

- Pearson, D., Fantozzi, M., Soares, D. y Waldron, T. (2005) "Searching for N2: How does Pressure Reduction Reduce Burst Frequency?" Leakage 2005, Halifax, Canadá
- Pilcher, R. (2003) "Leak Detection practices and techniques: a Practical approach." Water 21, Vol. 5, No. 6, Diciembre 2006.
- Price, R. y Vojinovic, Z. (2011) Urban Hydroinformatics: Data, Models and Decision Support for Integrated Urban Water Management, IWA Publishing
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. y Koppel T. (2010). "A review of methods for leakage management in pipe networks." Urban Water Journal, Taylor & Francis, Vol. 7, No. 1, 25-45, Febrero 2010
- Rizzo, A., Pearson, D., Stephenson, M. y Harper, N. (2004) "Apparent Water Loss Control: A practical approach." Water 21, Vol. 6, No. 3, Junio 2004
- Reddy P.V.N., Sridharan K. y Rao P.V. (1996) "WLS method for parameter estimation in water distribution networks." Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 122, No.3, Mayo/Junio 1996
- Rossman, L. (2000) EPANET 2 Users Manual. United States Environmental Protection Agency. Septiembre 2000.
- Saldarriaga, J. (2007) Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riego. Editorial Alfaomega. Universidad de Los Andes.
- Saldarriaga, J. y Jurado, C. (2008) "Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable." XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Mayo 2008.
- Savic, D. y Walters, G. (1995) "Genetic algorithm techniques for calibrating network models." Report No. 95/12, Centre for systems and Control Engineering, University of Exeter, Reino Unido.
- Savic, D., Kapelan, Z. y Jonkergouw, P. (2008) "Quo vadis water distribution model calibration?" Urban Water Journal, Taylor & Francis, Vol. 6, No. 1, 3-22, Marzo 2009.
- Savic, D. y Banyard, J. (2011) Water Distribution Systems. ICE Publishing, Londres
- Sempewo, J., Pathirana, A., y Vairavamoorthy, K. (2009) "Spatial analysis tool for development of leakage control zones from the analogy of distributed computing." Proceedinf of Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008, Kruger National Park, South Africa, 1-15.
- Shamir, U. y Howard, C. (1977) "Engineering analysis of water distribution systems." Journal of American Water Works Association, AWWA, Vol. 69, No. 9, 510-514.
- Simmons, J.G. (1966) "Economic Significance of Unaccounted-for Water" Journal of American Water Works Association, Vol. 58, No. 6, 639-641, Junio 1966
- Speight, V. y Khanal, N. (2008). "Model calibration and current usage in practice." Urban Water Journal, Taylor & Francis, Vol. 6, No. 1, 23-28, Marzo 2008.
- Speight, V. (2008) "Development of Model Calibration Guidance." Proceeding of Water Distirubtion Systems Analisys Conference, WDSA2008, Agosto 2008.

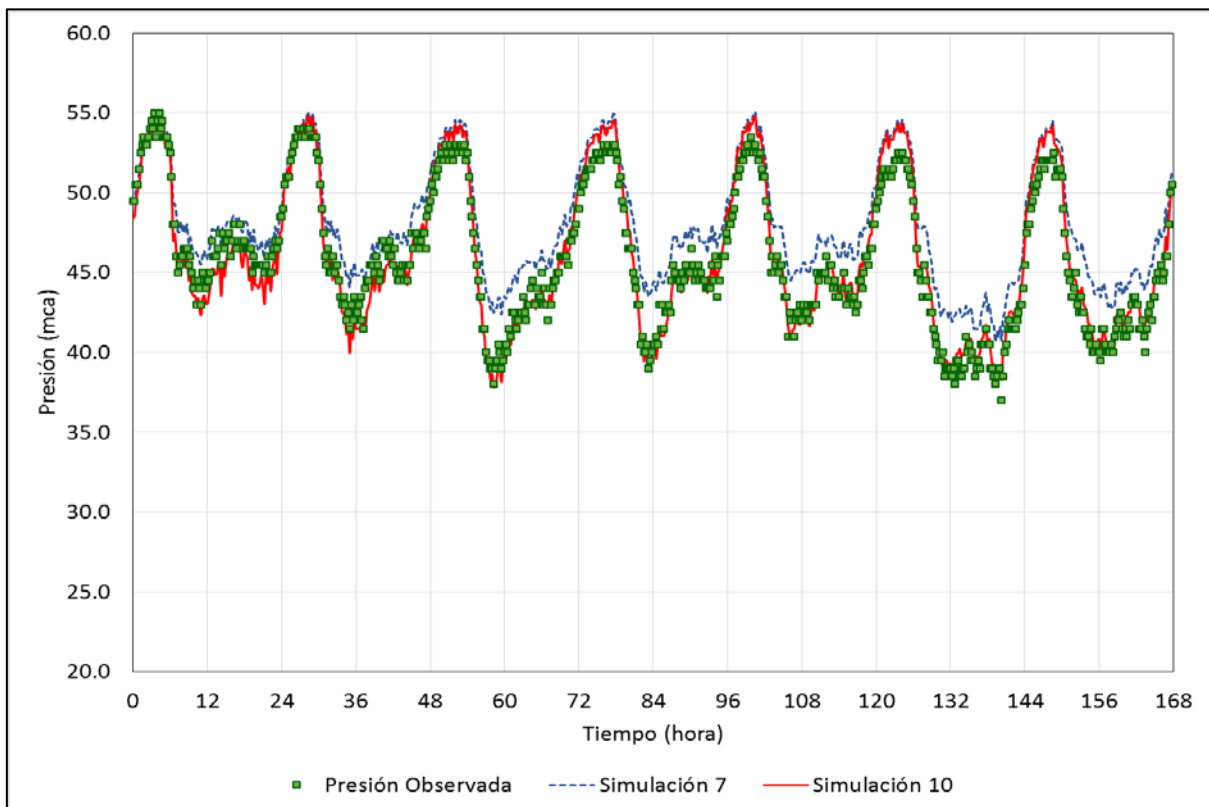
- Takahashi, S, Saldarriaga, J. y Vega, C. (2008) "Calibración de redes de distribución con métodos de inteligencia artificial." XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Mayo 2008.
- Takahashi, S., Saldarriaga, J., S. Vega, C. y Hernández F. (2010) "Water distribution system model calibration under uncertainty environments." *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 10, No. 1, IWA Publishing.
- Technical Group of Waste of Water (1985) "Report 26. Leakage Control: Policy and Practice." Water Authorities Association & Water Research Centre
- Teixeira, S. Loureiro, D. y Alegre, H. (2006) *Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Thornton, J., Sturm, R., t Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*, Segunda Edición, McGraw-Hill.
- UKWIR (1999) "A Manual of DMA Practice." United Kingdom Water Institute Research
- Van Zyl, C.E. y Clayton, C. (2007) "The effect of pressure on leakage in water distribution systems." *Proceedings of the ICE Water Management*, Volumen 160, No. 2, 109-114, Junio 2007.
- Vela, A., Martínez, F., García-Serra, J. y Pérez, R. (1994) "Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de sistemas de agua en sistemas de abastecimiento." *Ingeniería del Agua*, Vol. 1, No. 1, 35-54
- Waldron, T., Lambert, A., McKenzie, R., Pearson, D. y Brothers, K. (2004) *Water Loss Manuals Managing and Reducing Losses from Water Distribution Systems*. Environmental Protection Agency & Wide Bay Water, Australia
- Walski, T. (1983a) "Technique for calibrating network models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 109, No. 4, Octubre 1983
- Walski, T. (1983b) "Using water distribution system models." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 72, No. 2, 58-63, Febrero 1983
- Walski, T. (1986) "Case study: Pipe model calibration issues." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 112, No. 2, Abril 1986
- Walski, T. (1990) "Sherlock Holmes Meets Hardy-Cross or Model Calibration in Austin, Texas." *Journal of American Water Works Association*, AWWA, Vol. 82, No. 3, 34-38, Marzo 1990
- Walski, T. (1995) "Standards for model calibration." *Conference Proceeding of AWWA Computer Conference*, American Water Works Association
- Walski, T., Bezts, W., Posluszny, T., Weir, M. y Whitman, B. (2006) "Modeling leakage reduction through pressure control." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 98, No. 4, Abril 2006.
- Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S. y Koelle, E. (2007) *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press. Primera edición

- Water Authorities Association y Water Research Centre (1989) "Network Analysis: A Code of Practice." Water Research Centre.
- Wallace, L. (1987) "Water and Revenue Losses: Unaccounted-for Water." American Water Works Association.
- Wheadon, D.A. (1987) "Water Audit Reduces Unaccounted-for Water" Opflow, American Water Works Association, Vol. 13, No. 10, 6-7, Octubre 1987
- Wu, Z., Farley, M., Turtle, D., Kapelan, Z., Boxxal, J., Mounce, S., Dahasahasra, S., Mulay, M. y Kleiner, Y. (2011). Water Loss Reduction. Bentley Institute Press.
- Wu, Z.Y. y Simpson, A.R. (2001) "Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems." Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 2, Abril 2001
- Wu, Z.Y., Walski, T.M., Mankowski, R., Herrin, G., Gurrieri, R. y Tryby, M. (2002) "Calibrating water distribution model via genetic algorithm." Proceeding of the 2002 AWWA IMTech Conference, Kansas City, Missouri, Estados Unidos de Norteamérica, Abril 2002.

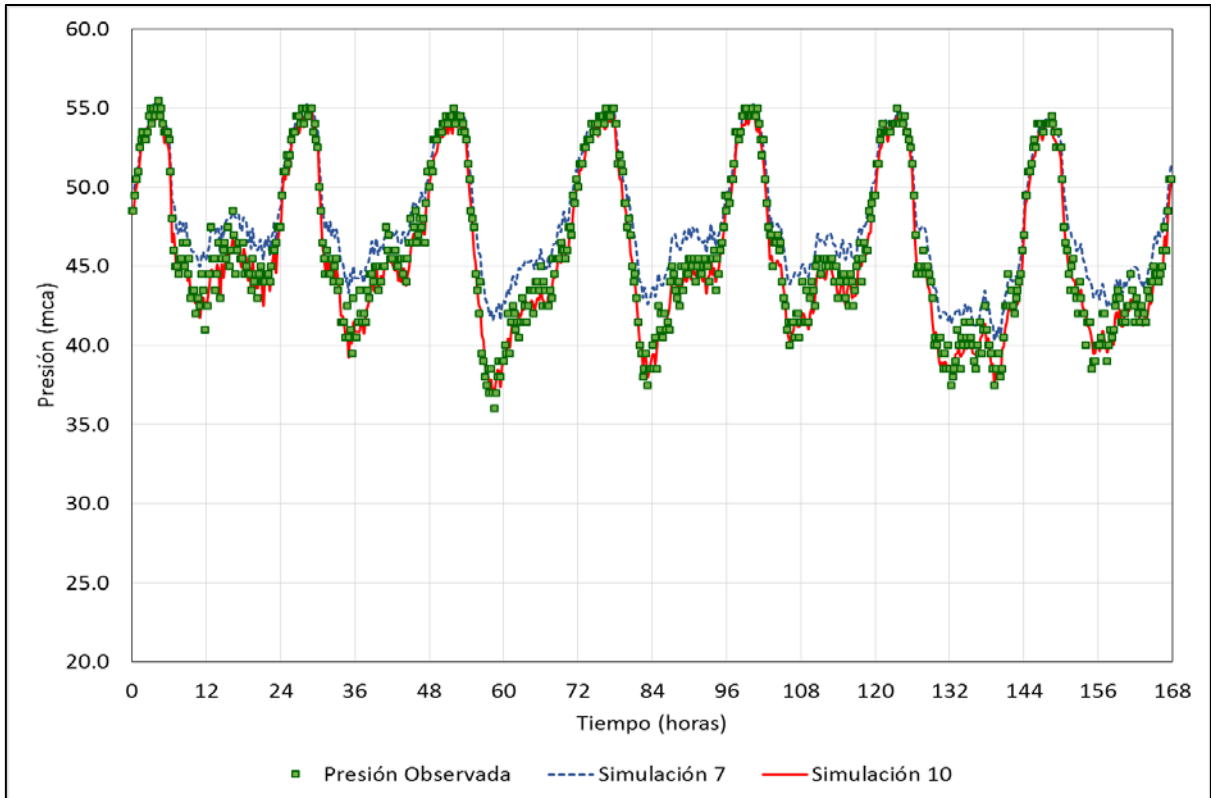
Anexo 1. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso N72-M132



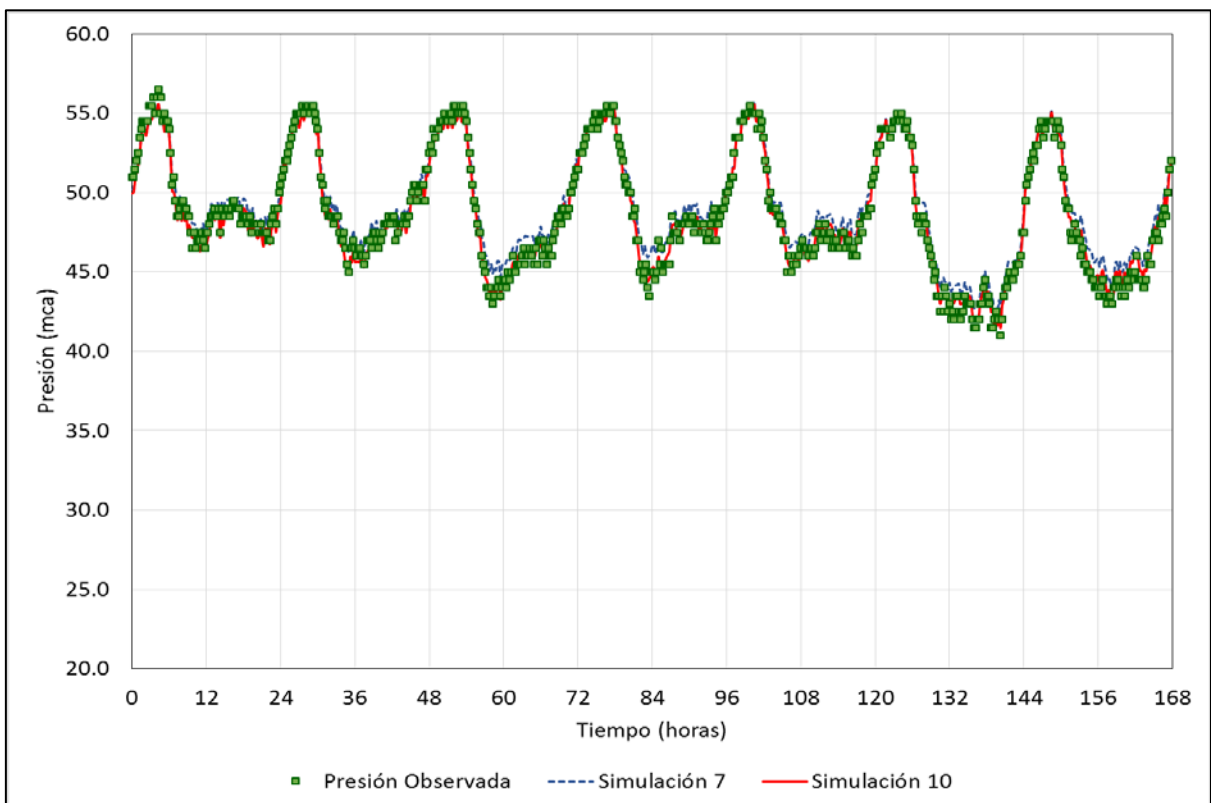
Anexo 1 - Figura 1 Presión simulada y observada para el nudo N-5, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 7) y para el modelo calibrado (simulación 10). Caso N72-M132



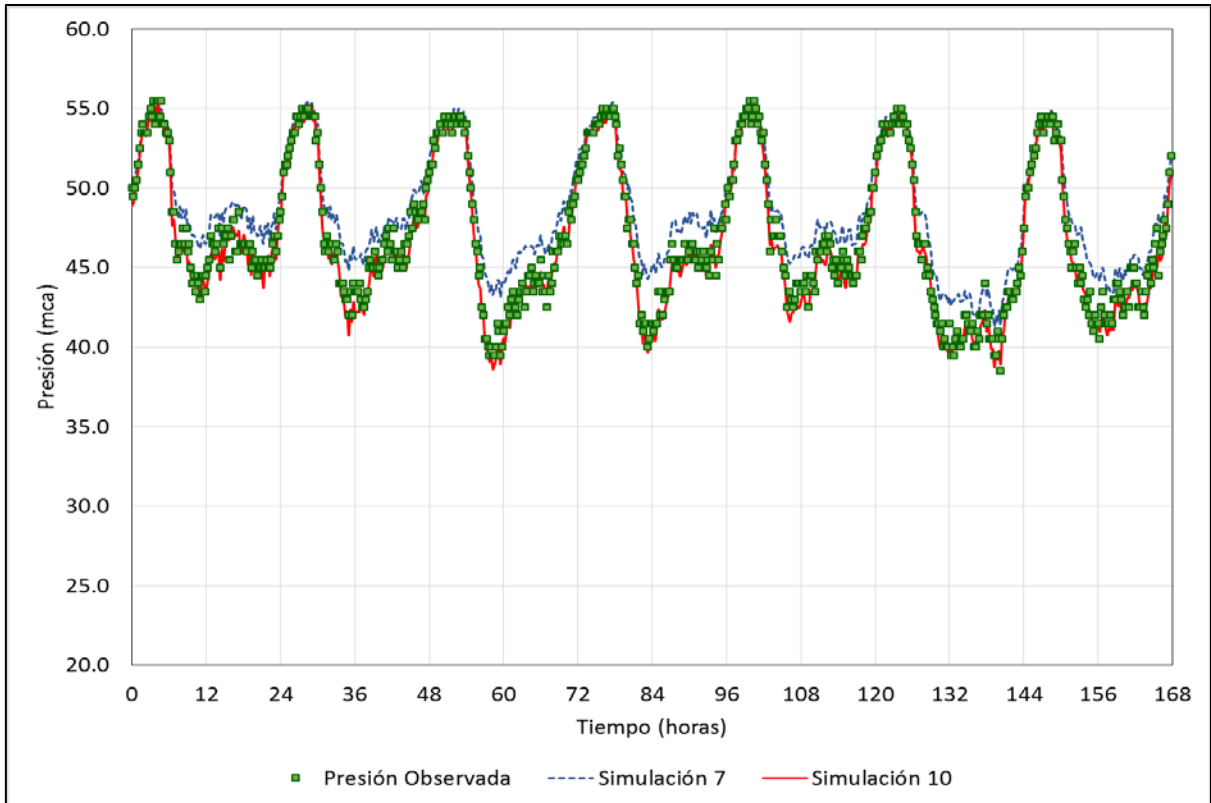
Anexo 1 - Figura 2 Presión simulada y observada para el nudo N-99, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 7) y para el modelo calibrado (simulación 10). Caso N72-M132



Anexo 1 - Figura 3 Presión simulada y observada para el nudo N-110, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 7) y para el modelo calibrado (simulación 10). Caso N72-M132

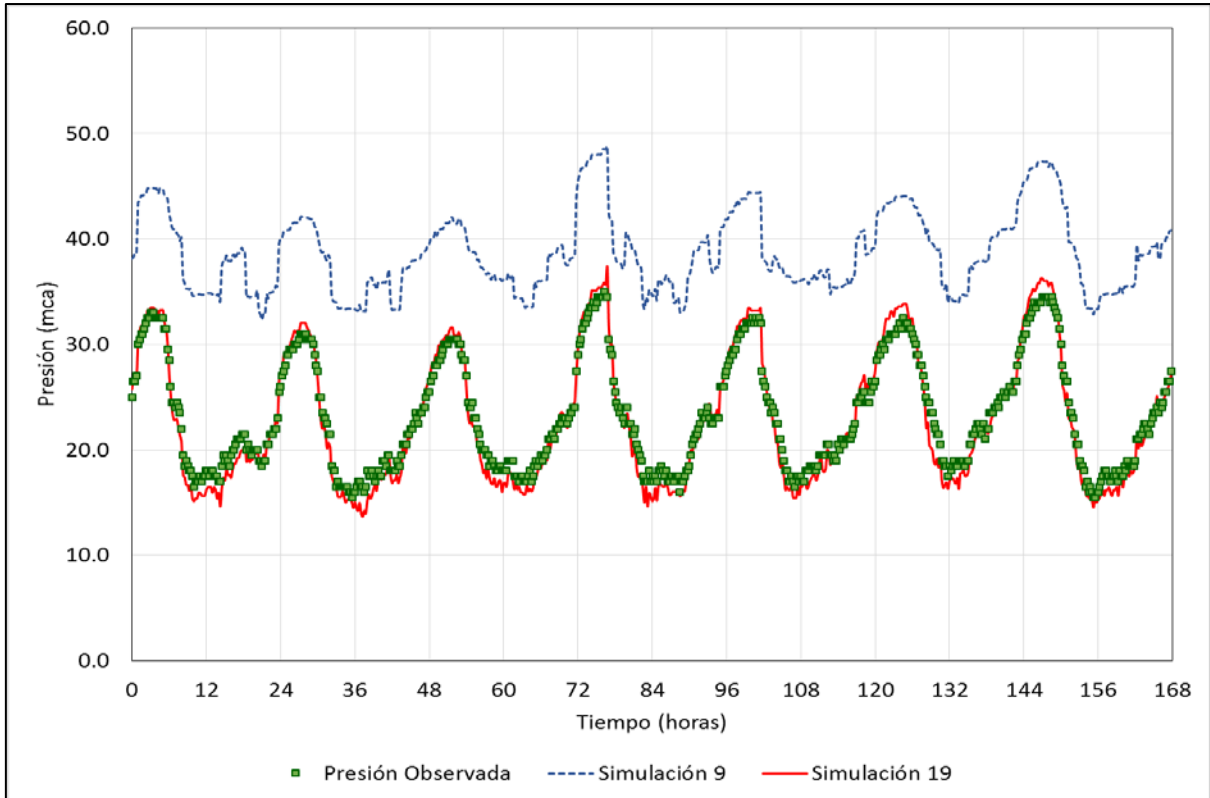


Anexo 1 - Figura 4 Presión simulada y observada para el nudo N-183, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 7) y para el modelo calibrado (simulación 10). Caso N72-M132

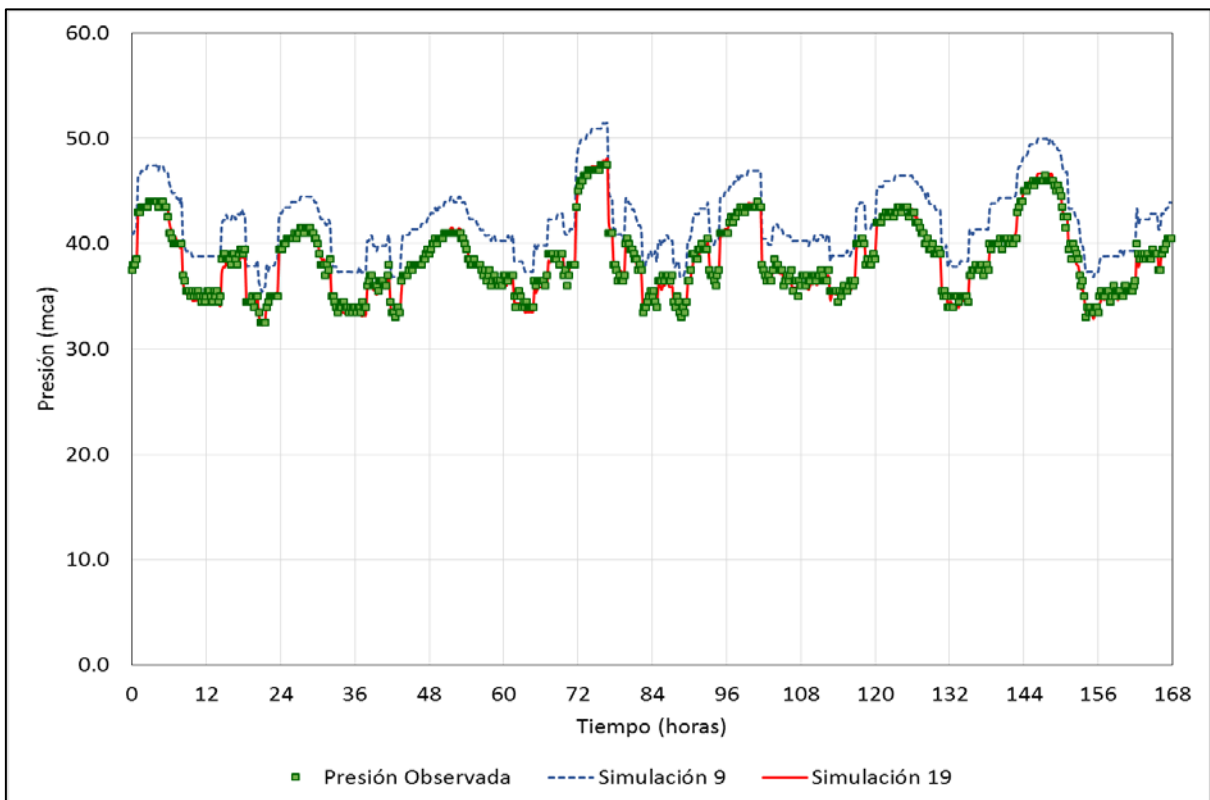


Anexo 1 - Figura 5 Presión simulada y observada para el nudo N-210, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 7) y para el modelo calibrado (simulación 10). Caso N72-M132

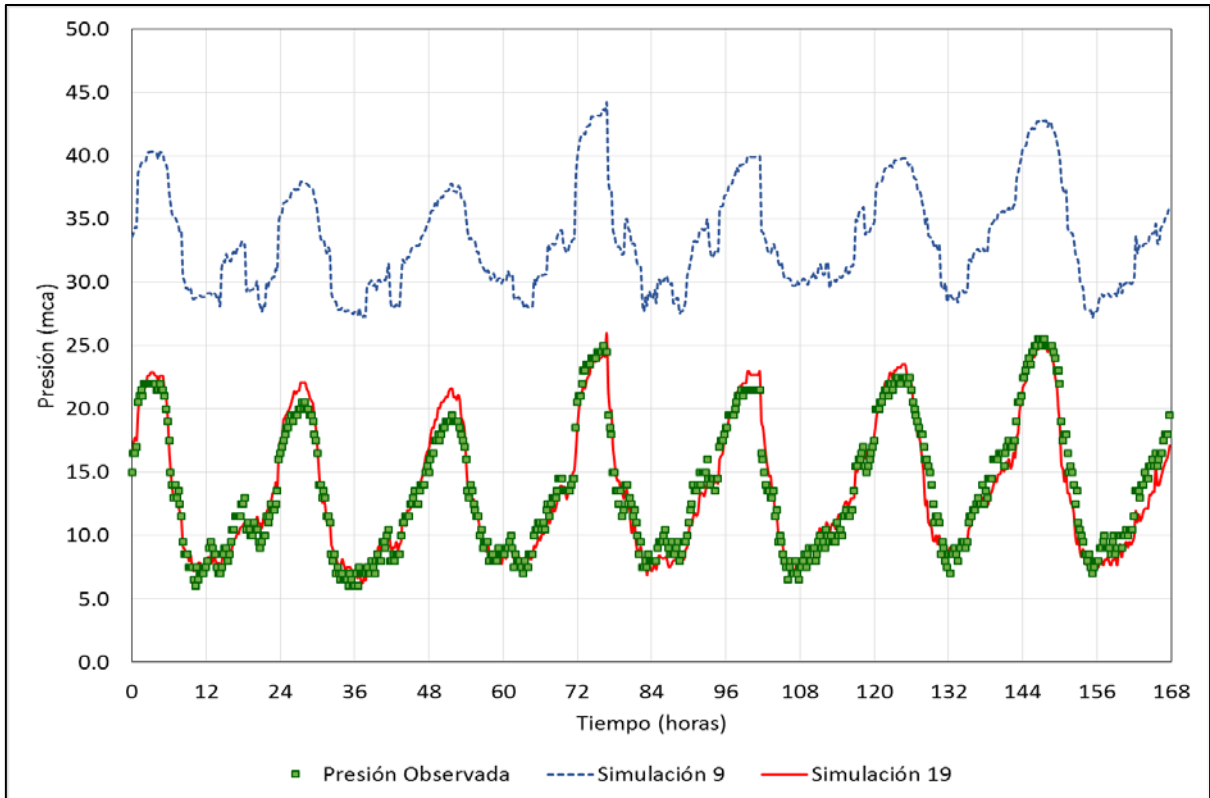
Anexo 2. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso N50-M31



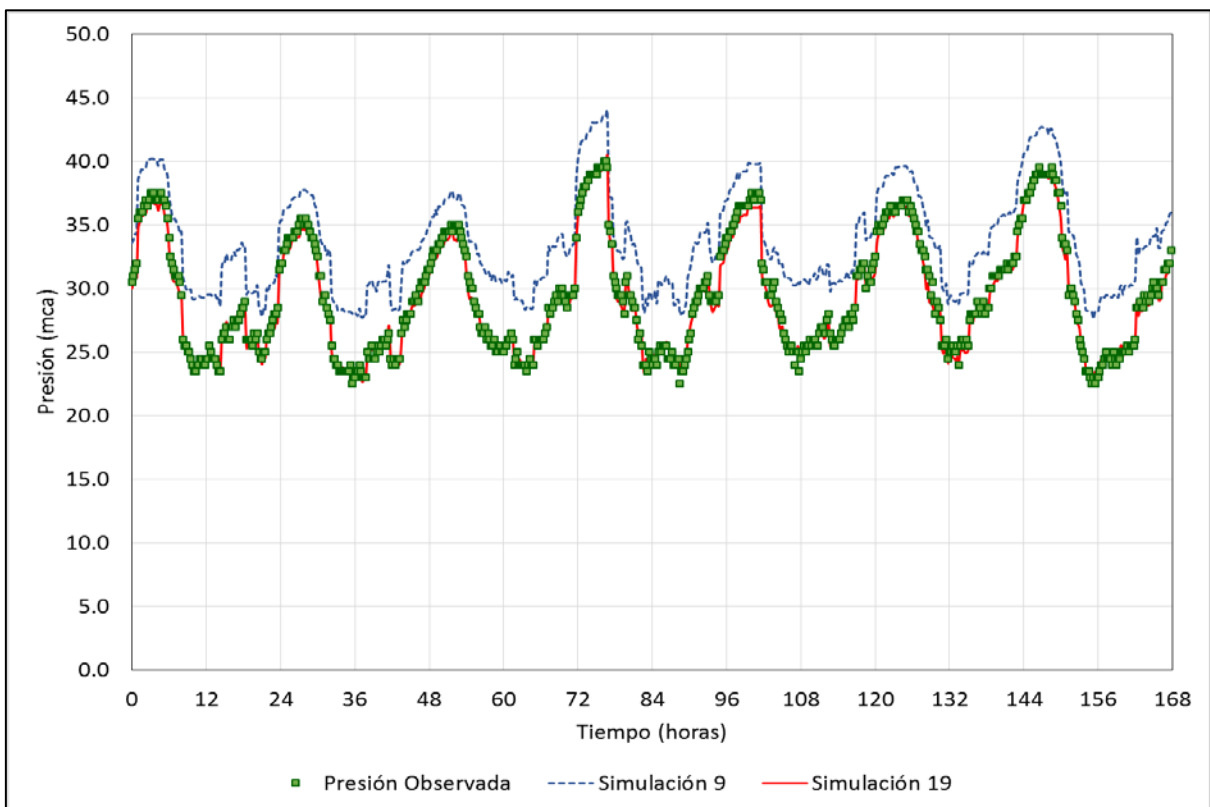
Anexo 2 - Figura 1 Presión simulada y observada para el nodo N-65, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso N50-M31



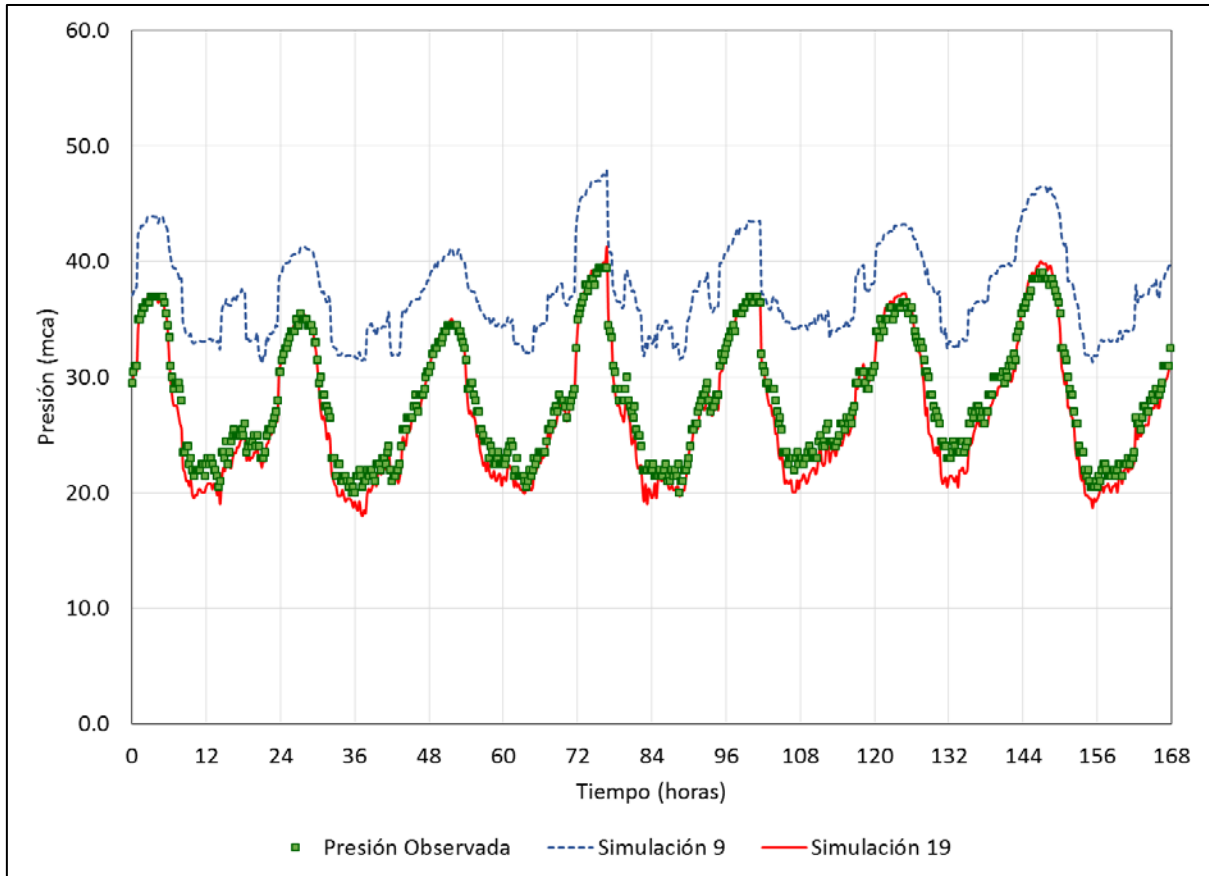
Anexo 2 - Figura 2 Presión simulada y observada para el nodo N-130, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso N50-M31



Anexo 2 - Figura 3 Presión simulada y observada para el nudo N-134, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso N50-M31

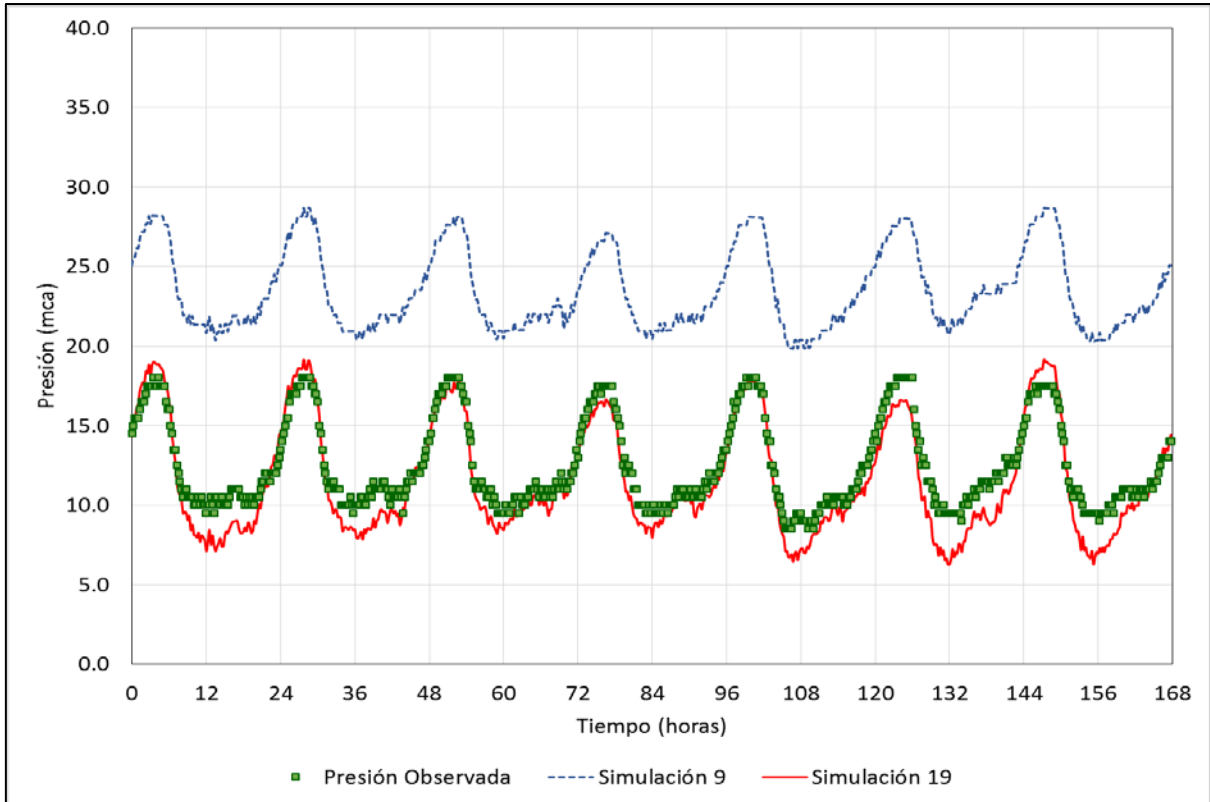


Anexo 2 - Figura 4 Presión simulada y observada para el nudo N-196, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso N50-M31

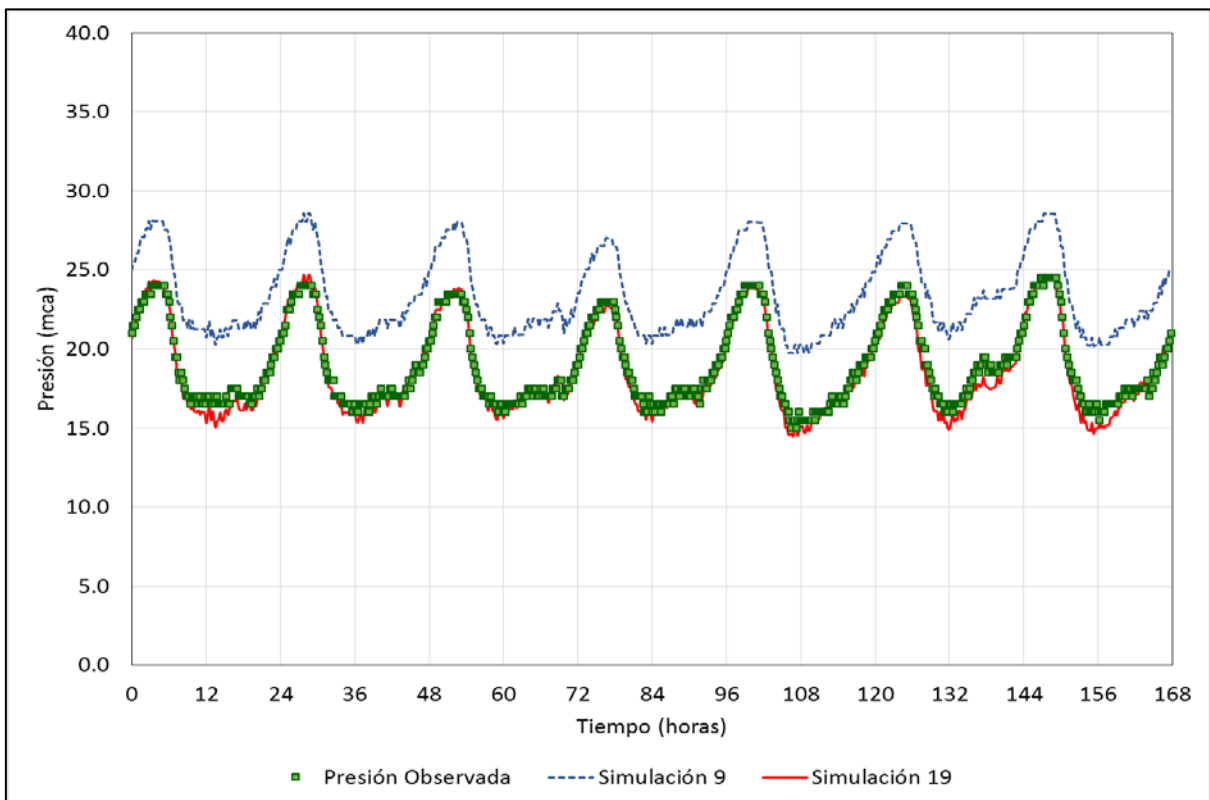


Anexo 2 - Figura 5 Presión simulada y observada para el nudo N-356, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso N50-M31

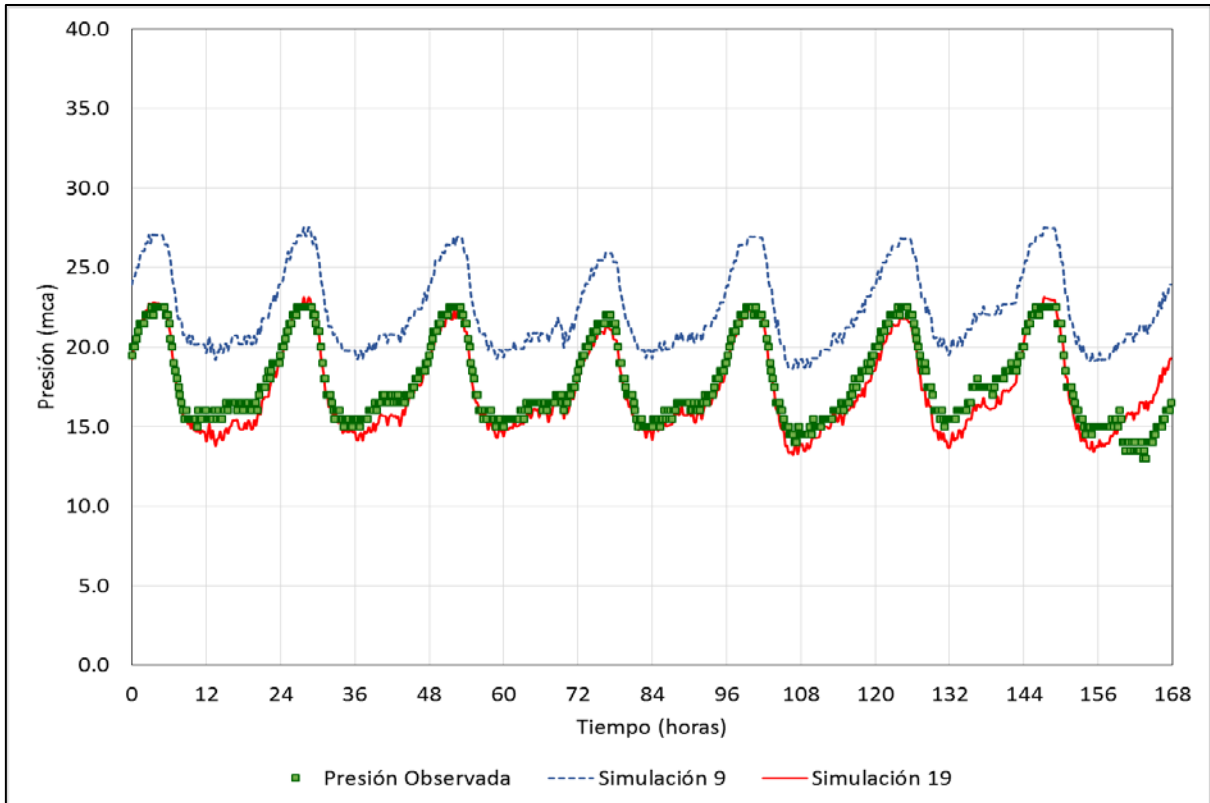
Anexo 3. Gráficos comparativos de presión simulada y observada. Caso CTC-M44



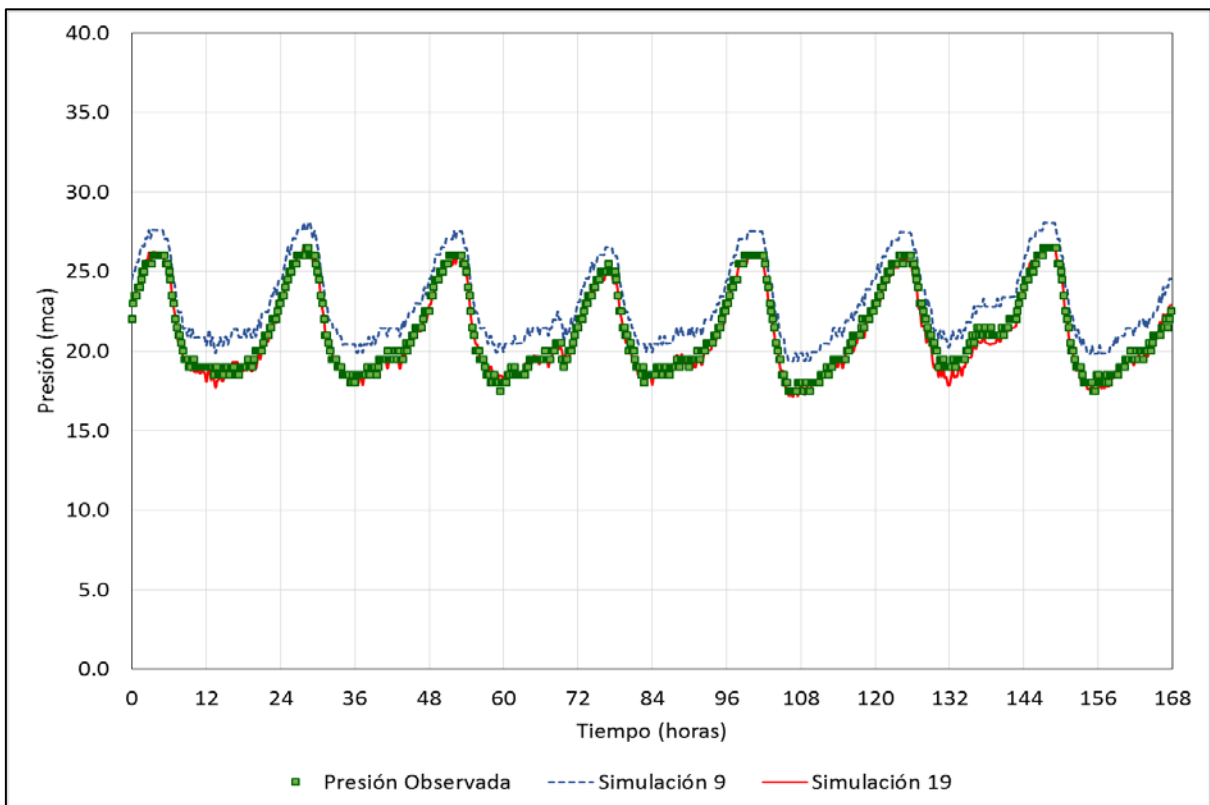
Anexo 3 - Figura 1 Presión simulada y observada para el nudo N-43, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



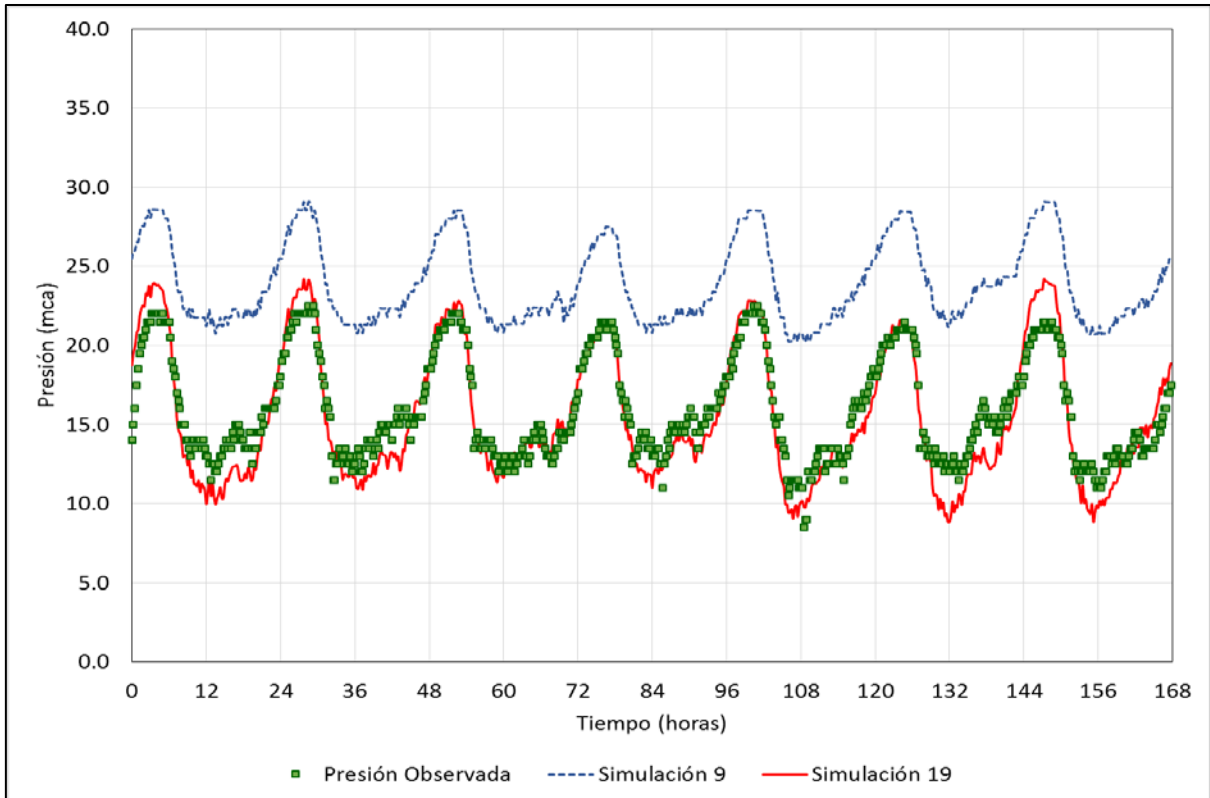
Anexo 3 - Figura 2 Presión simulada y observada para el nudo N-49, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



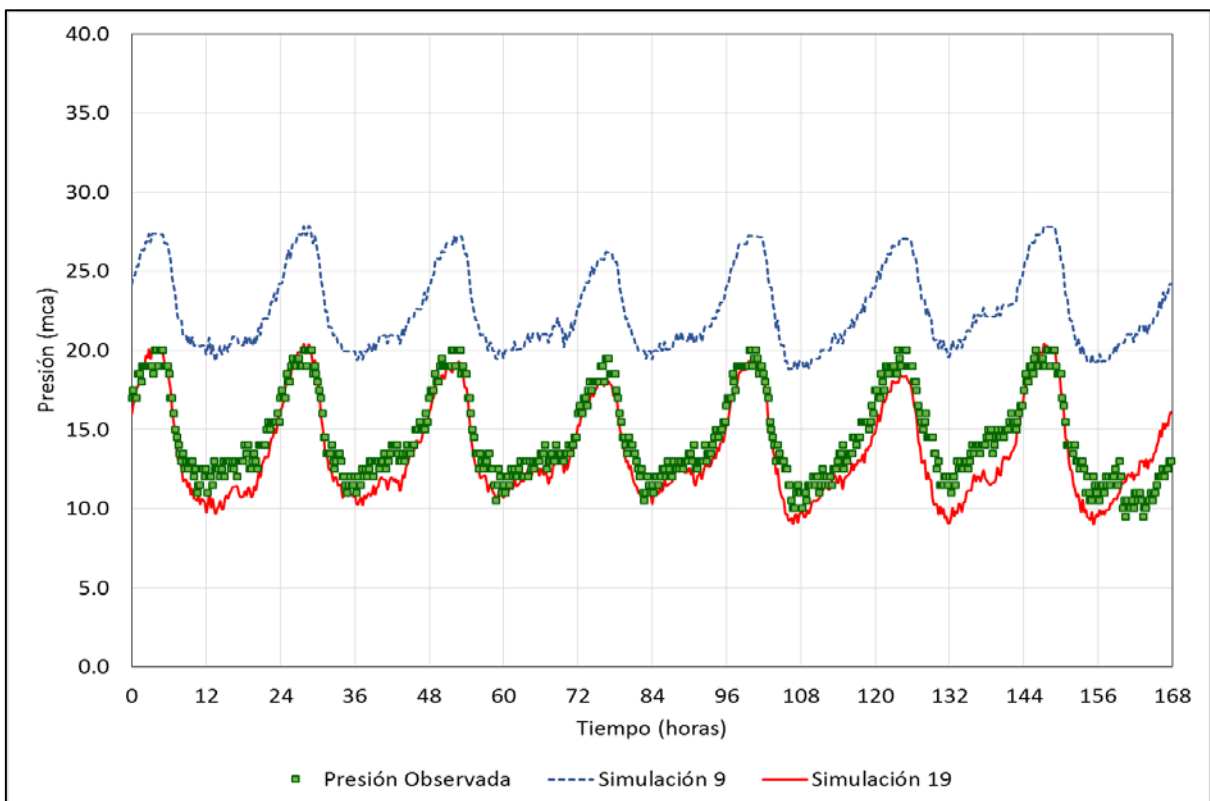
Anexo 3 - Figura 3 Presión simulada y observada para el nudo N-119, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



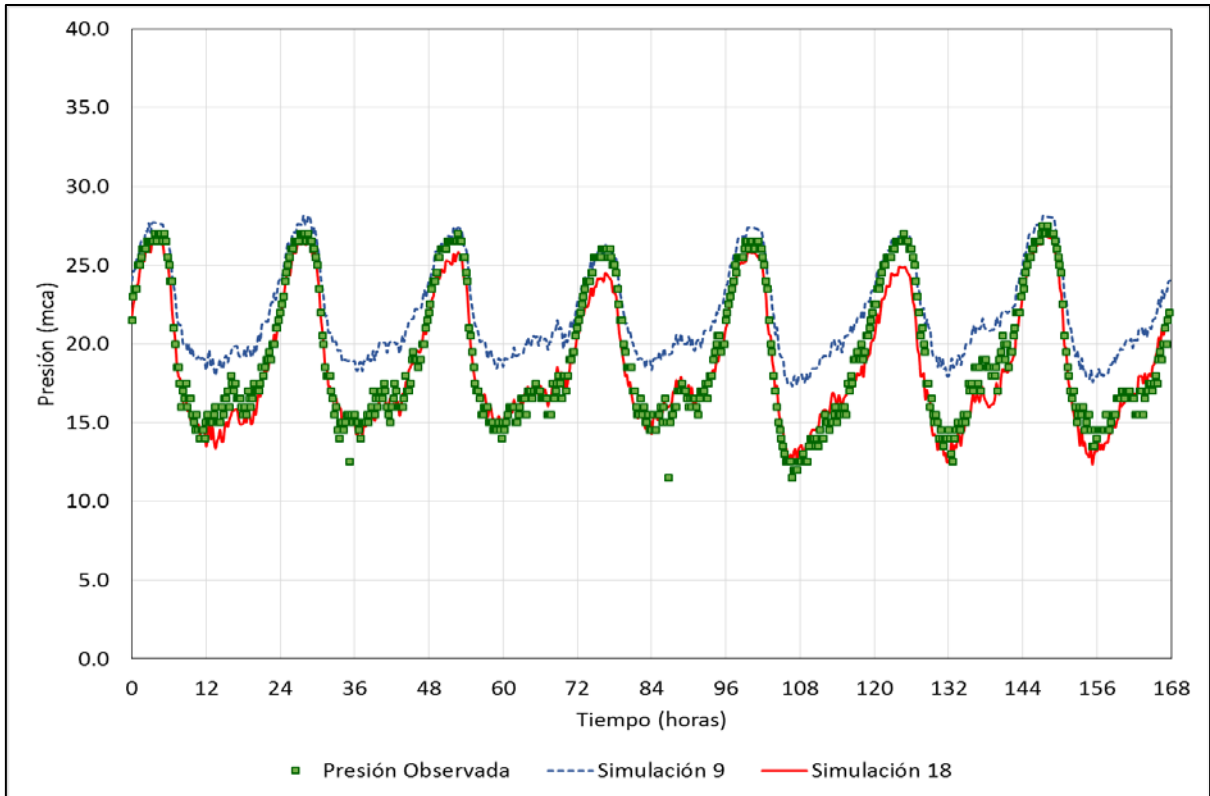
Anexo 3 - Figura 4 Presión simulada y observada para el nudo N-368, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



Anexo 3 - Figura 5 Presión simulada y observada para el nudo N-393, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



Anexo 3 - Figura 6 Presión simulada y observada para el nudo N-647, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44



Anexo 3 - Figura 7 Presión simulada y observada para el nudo N-658, modelo sin calibrar pérdidas de carga (simulación 9) y para el modelo calibrado (simulación 19). Caso CTC-M44