



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Determinación de las constantes de
decaimiento del cloro en un sector de la red
de distribución de agua potable de la Ciudad
de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Brenda Escobar Arriaga

DIRECTOR DE TESIS

Cristian Emmanuel González Reyes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimiento

A mi director de tesis, M.I. Cristian Emmanuel González Reyes, quien mantuvo su orientación y apoyo en cada paso, resolvió mis dudas y me asesoró siempre que el proyecto presentó imprevistos y complicaciones.

Al M.I. Ricardo Zárate Mendoza, subdirector de la Sectorización Poniente del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, quien proporcionó de información interna del sector BJ-02 fundamental para el desarrollo de la tesis, colaboró directamente en la autorización y ejecución de los muestreos en sitio, y quien sin su apoyo y disposición no sería posible la concreción de este proyecto.

A mis compañeros y amigos, Omar Castro, Raúl Varela, Alejandro Corte y Josselyn González, y a los colaboradores del organismo operador SACMEX, Miguel Anaya y Francisco Zúñiga, por su participación durante los muestreos en sitio.

A Daniela Aguirre por ser mi apoyo incondicional en cada etapa del proyecto.

A mis padres, Jorge Luis Escobar y Rosalinda Arriaga, por participar y aconsejar en cualquier aspecto que lo necesitara para concretar la tesis.

Al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental por el préstamo de material e instalaciones para realizar los muestreos y mediciones.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería por ser parte de mi formación profesional, compartir sus conocimientos, estimular mi curiosidad e impulsarme a desarrollar mi pensamiento crítico y creativo.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo	1
1.1.1.	El objetivo general	1
1.1.2.	Los objetivos específicos:.....	1
1.2.	Justificación.....	2
1.3.	Alcances y limitaciones	3
2.	Marco referencial	4
2.1.	Marco teórico	4
2.1.1.	Oxidación por cloro.....	4
2.1.2.	Cinética química.....	6
2.1.3.	Factores que afectan el decaimiento del cloro libre en tuberías	8
2.1.4.	Transporte y mezcla en redes de tubería	9
2.1.5.	Constantes cinéticas del cloro libre en tuberías	10
2.2.	Estado del arte	11
2.3.	Modelación en redes de distribución de agua	12
2.3.1.	Modelación hidráulica en EPANET.....	12
2.3.2.	Modelación de calidad en EPANET	14
3.	Descripción del sector BJ-02.....	16
3.1.	Origen del agua que recibe el sector	18
3.2.	Características de la red de agua potable del sector BJ-02	20
3.3.	Características de los usuarios del sector BJ-02	26
4.	Elaboración del modelo hidráulico	28
4.1.	Diámetros y conexiones.....	29
4.2.	Demanda base	31
4.3.	Patrón de demanda	35
4.3.1.	Procedimiento para generación del patrón de demanda doméstica.....	36
4.4.	Fugas	40
4.5.	Calibración y validación del modelo hidráulico	41
5.	Diseño de experimento	46
5.1.	Hipótesis	46
5.2.	Identificación del sistema y modelo	47
5.3.	Selección de variables.....	47
5.4.	Plan de muestreo	48

5.4.1.	Primer plan de muestreo	48
5.4.2.	Reporte de primer muestreo	50
5.4.3.	Segundo plan de muestreo	54
5.4.4.	Reporte de segundo muestreo	58
6.	Resultados y Discusión.....	62
6.1.	Determinación de constante de reacción global (<i>kglobal</i>)	62
6.2.	Determinación de constante de reacción en el seno del fluido (<i>kb</i>)	65
6.3.	Determinación de constante de reacción de pared (<i>kw</i>)	70
6.4.	Evaluación del modelo de calidad	71
6.5.	Exploración del modelo de calidad	73
7.	Conclusiones y Recomendaciones	75

Índice de tablas

TABLA 1.	LONGITUD Y DIÁMETROS DE TRAMOS DE TUBERÍA EN SECTOR BJ-02.
TABLA 2.	TABLA DE CONCENTRACIONES INICIALES DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIDAS EN EL SECTOR BJ-02. MUESTREO PARA OBTENER K GLOBAL.
TABLA 3.	TABLA DE CONCENTRACIONES FINALES DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIDAS EN EL SECTOR BJ-02. MUESTREO PARA OBTENER K GLOBAL.
TABLA 4.	TABLA DE CONCENTRACIONES DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIDAS EN LABORATORIO. MUESTREO PARA OBTENER KB.
TABLA 5.	COEFICIENTES CINÉTICOS (K GLOBAL) PARA CADA UNIDAD DE MUESTREO.
TABLA 6.	COEFICIENTES CINÉTICOS (K GLOBAL) FILTRADOS PARA CADA UNIDAD DE MUESTREO.
TABLA 7.	OBTENCIÓN DE COEFICIENTE CINÉTICO KB PARA EL PUNTO DE MUESTREO 1.
TABLA 8.	OBTENCIÓN DE COEFICIENTE CINÉTICO KB PARA EL PUNTO DE MUESTREO 2.
TABLA 9.	OBTENCIÓN DE COEFICIENTE CINÉTICO KB PARA EL PUNTO DE MUESTREO 3.
TABLA 10.	OBTENCIÓN DE COEFICIENTE CINÉTICO KB PARA EL PUNTO DE MUESTREO 4.
TABLA 11.	COEFICIENTES CINÉTICOS DE PARED EN FUNCIÓN DE VELOCIDAD DE FLUJO Y DIÁMETRO DE TUBERÍA.
TABLA 12.	EVALUACIÓN DE MODELO DE CALIDAD DEL SECTOR BJ-02.

Índice de figuras

FIGURA 1.	DISTRIBUCIÓN DEL ÁCIDO HIPOCLOROSO Y EL HIPOCLORITO EN AGUA EN DIFERENTES VALORES DE PH (SINGER & RECKHOW, 2011)
FIGURA 2.	CURVA DE CLORACIÓN A PUNTO QUIEBRE (CONAGUA, 2019A).
FIGURA 3.	COMPORTAMIENTO DE CUATRO MODELOS DE REACCIÓN (CONAGUA, 2019A)
FIGURA 4.	TRANSPORTE POR ADVECCIÓN DE UN SOLUTO (CONAGUA, 2019B).
FIGURA 5.	DATOS DE ENTRADA PARA MODELACIÓN HIDRÁULICA EN EPANET. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.
FIGURA 6.	TIPOS DE ANÁLISIS DE CALIDAD A REALIZAR EN EPANET. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.
FIGURA 7.	SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA CDMX. FUENTE: PROGRAMA DE SECTORIZACIÓN AVANCES 2022

FIGURA 8. SECTORES DE LA ALCALDÍA BENITO JUÁREZ. FUENTE: PROGRAMA DE SECTORIZACIÓN AVANCES 2022.

FIGURA 9. RUTA DEL AGUA DE LOS SISTEMAS CUTZAMALA Y LERMA. FUENTE: LÓPEZ, 2019.

FIGURA 10. DIAGRAMA GENERAL DE LA INFRAESTRUCTURA HÍDRICA DEL SISTEMA PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.
FUENTE: ORGANISMO OPERADOR SACMEX.

FIGURA 11. ELEVACIONES DEL SECTOR BJ-02

FIGURA 12. PLANO DE TUBERÍAS DEL SECTOR BJ-02. FUENTE: FUENTE INTERNA SACMEX.

FIGURA 13. CRUCEROS DEL SECTOR BJ-02

FIGURA 14. CRUCEROS DEL SISTEMA DE VÁLVULAS EXISTENTES NO INTERVENIDAS EN EL SECTOR BJ-02. FUENTE: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SECTOR BJ-02, FUENTE INTERNA SACMEX.

FIGURA 15. CRUCEROS DEL SISTEMA DE VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO PARA EL AISLAMIENTO DEL SECTOR BJ-02. FUENTE: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SECTOR BJ-02, FUENTE INTERNA SACMEX.

FIGURA 16. CRUCERO DE VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN Y CRUCERO DE MEDIDOR. FUENTE: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SECTOR BJ-02, FUENTE INTERNA SACMEX.

FIGURA 17. MEDIDORES DE PRESIÓN EN EL SECTOR BJ-02. FUENTE: FUENTE INTERNA SACMEX.

FIGURA 18. TRABAJOS DE INSTALACIÓN DE VÁLVULA INTELIGENTE EN EL SECTOR BJ-02. FUENTE: SACMEX

FIGURA 19. PLATAFORMA DIGITAL PARA MONITOREO DE OPERACIÓN DE SECTORES DE LA CDMX. FUENTE: SACMEX

FIGURA 20. ÍNDICE DE DESARROLLO POR MANZANA.

FIGURA 21. MODIFICACIÓN DE IDENTIFICADORES DE NODOS. LADO IZQUIERDO: SUPUESTO POR SACMEX; LADO DERECHO: REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 23. MODIFICACIÓN DE DIÁMETROS. LADO IZQUIERDO: SUPUESTO POR SACMEX; LADO DERECHO: REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 24. MODIFICACIÓN DE CONEXIONES. LADO IZQUIERDO: SUPUESTO POR SACMEX; LADO DERECHO: REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 25. RUTA DE LA ASIGNACIÓN DE DEMANDAS A NODOS DE LA RED DEL SECTOR BJ-02.

FIGURA 26. MODIFICACIÓN DE DEMANDA BASE ASIGNADA A NODOS. LADO IZQUIERDO: SUPUESTO POR SACMEX; LADO DERECHO: REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 27. PATRONES DE DEMANDA PARA REPRESENTAR CONSUMO DOMÉSTICO Y NO DOMÉSTICO EN LA RED DEL SECTOR BJ-02. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 28. PATRONES DE DEMANDA DOM Y NODOM DEL SECTOR BJ-02. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 29. EVALUACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO MEDIANTE COMPARACIÓN DE GASTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 30. PATRÓN DE DEMANDA DOM Y NO DOM CALIBRADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 31. COMPARACIÓN ENTRE EL GASTO A LA ENTRADA DEL SECTOR REAL Y EL GENERADO POR EL MODELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

FIGURA 32. PUNTO INICIAL, ENTRADA DE AGUA AL SECTOR BJ-02.

FIGURA 33. MEDIDOR DE CLORO HANNA INSTRUMENTS HI701-0 (LADO IZQUIERDO) Y PAQUETE DE REACTIVO PARA USO DEL MEDIDOR (LADO DERECHO).

FIGURA 34. PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS EN PREDIOS.

FIGURA 35. UBICACIÓN DE PUNTOS DE PRIMER MUESTREO.

FIGURA 36. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO EN EL SECTOR BJ-02

FIGURA 37. NODOS DE MUESTREO Y SUS RESPECTIVAS EDADES DE AGUA EN DIFERENTES HORARIOS.

FIGURA 38. APERTURA DE REGISTROS DE AGUA POTABLE EN EL SECTOR BJ-02 CON EL APOYO DEL PERSONAL DE SACMEX.

FIGURA 39. VACIADO DE REACTIVO PARA MEDIR CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE EN MUESTRA DE AGUA.

FIGURA 40. REGISTRO DE CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE EN LABORATORIO DE SANITARIA Y AMBIENTAL.

FIGURA 41. GRÁFICA DE AJUSTE PARA LA OBTENCIÓN DE KB EN EL PUNTO DE MUESTREO 1.

FIGURA 42. GRÁFICA DE AJUSTE PARA LA OBTENCIÓN DE KB EN EL PUNTO DE MUESTREO 2.

FIGURA 43. GRÁFICA DE AJUSTE PARA LA OBTENCIÓN DE KB EN EL PUNTO DE MUESTREO 3.

FIGURA 44. GRÁFICA DE AJUSTE PARA LA OBTENCIÓN DE KB EN EL PUNTO DE MUESTREO 4

FIGURA 45. CORRELACIÓN ENTRE VALORES MEDIDOS Y VALORES CALCULADOS POR EL MODELO.

FIGURA 46. CONCENTRACIONES DE CLORO EN MODELO, 10 AM, CONCENTRACIÓN INICIAL 0.3 MG/L.

FIGURA 47. CONCENTRACIONES DE CLORO EN MODELO, 4 AM, CONCENTRACIÓN INICIAL 0.3 MG/L

FIGURA 48. CONCENTRACIONES DE CLORO EN MODELO, 4 AM, CONCENTRACIÓN INICIAL 1.1 MG/L

1. Introducción

1.1. Objetivo

1.1.1. El objetivo general

Determinar la constante de reacción en el seno del líquido (k_b), la constante de reacción de pared (k_w) y la constante de reacción global (k_{global}) del cloro libre residual en el agua distribuida en un sector de la red de agua potable de la Ciudad de México, a partir de la medición de algunas características de calidad del agua en distintos puntos de la red y la modelación hidráulica por computadora del sistema.

1.1.2. Los objetivos específicos:

- Definir las características físicas e hidráulicas del sector BJ-02, a partir de los planos de construcción y el modelo hidráulico en EPANET proporcionados por el organismo operador, para asegurar la congruencia del modelo hidráulico con la red actual del sector.
- Obtener información socioeconómica y de consumo de los usuarios del sector, a partir de recorridos virtuales, recorridos en sitio, sistemas de información estadística, y datos de consumo de agua históricos del sector, que permitan estimar el consumo de agua potable en cada tramo de la red de estudio.
- Refinar el modelo hidráulico en EPANET a partir de verificar las características físicas y los parámetros de consumo, para aproximar el comportamiento hidráulico del modelo a la red actual.
- Determinar la constante de reacción global del cloro libre residual (K_{global}), a partir de mediciones de concentración de cloro en sitio, que consideren la influencia de las reacciones del cloro con el agua y con las paredes de tubería en la disminución de concentración.
- Determinar la constante de reacción en el seno del fluido (K_b), a partir de pruebas en frasco que sólo consideren la influencia de las reacciones del cloro con el agua en la disminución de concentración de cloro.
- Determinar la constante de reacción en las paredes (K_w), a partir de la K_{global} y la K_b , para conocer la influencia de las reacciones de cloro con las paredes de tubería en la disminución de la concentración del cloro.
- Evaluar los valores medidos con los calculados en el modelo a partir de indicadores estadísticos, para determinar si las constantes son representativas del sector BJ-02.
- Explorar el modelo de calidad a partir de los resultados de la simulación, para conocer la variación temporal y espacial de la concentración de cloro y conocer la vulnerabilidad de la red a encontrarse desprotegida.

1.2. Justificación

El uso de cloro es uno de los métodos más comunes de desinfección del agua para consumo humano y tiene la característica de dejar una protección en el agua de la red conocida como cloro libre residual. El cloro libre es una sustancia química altamente oxidante, por lo que al salir de la planta potabilizadora continúa reaccionando con su medio y disminuye su concentración. Al disminuir el cloro libre, existe el peligro de que ciertas partes de la red queden desprotegidas ante un posible crecimiento microbiano (Rossman et al., 1994), esto deja la salud de la población vulnerable dado el riesgo inminente de contacto con virus, bacterias, protozoarios o helmintos (CONAGUA, 2019^a).

En cuanto al uso de cloro como desinfectante en el agua para uso y consumo humano, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece el límite permisible de concentración de cloro libre residual entre 0.2 y 1.5 mg/L. La dosificación de cloro se realiza revisando la concentración en diferentes puntos de la red, pero no en todos. Ya que revisar la totalidad de la red resulta impráctico, existe el riesgo de que el agua potable se distribuya con una excesiva, insuficiente o nula concentración de cloro a los usuarios (CONAGUA, 2019b).

Un modelo de la calidad del agua permite representar la red y simular la concentración del desinfectante en cualquier punto a lo largo de un periodo extendido, analizar las causas de concentraciones fuera de rango y planear soluciones. En otras palabras, permite un mejor monitoreo y control de calidad del agua en la red para garantizar la salud de los usuarios (CONAGUA, 2019b).

Un modelo de calidad se desarrolla a partir de un modelo hidráulico, al cual, posteriormente, se le asignan las constantes cinéticas que describen el ritmo al que decae el cloro en la red. Generalmente, se describe la reacción del cloro en las redes de distribución como una reacción de primer orden y se obtienen dos coeficientes cinéticos: el coeficiente de reacción en el seno del fluido (k_b) y el coeficiente de reacción con la pared de la tubería (k_w). Esto debido a que los dos procesos de decaimiento muestran diferentes dinámicas de reacción (Muhammad et al., 2021). El coeficiente de reacción global (k_{global}) considera todas las reacciones en las que interviene el cloro en la red.

Las constantes cinéticas dependen de múltiples factores que varían de acuerdo con las características de la red de estudio, por lo tanto, determinar estas constantes requiere caracterizar adecuadamente el comportamiento hidráulico de la red y recolectar mediciones directas de la calidad del agua. Diversos investigadores han determinado estas constantes y han desarrollado modelos de calidad en Egipto (Mostafa et al., 2013), Ecuador (García Ávila, 2019), Malasia (Muhammad et al., 2021), entre otros.

En México, se desarrolló un modelo para caracterizar el decaimiento de cloro en la red de agua potable de Culiacán, Sinaloa (Tzatchkov et al., 2004), y en 2020 se realizó un estudio para comparar los coeficientes de reacción de pared para tuberías de diferentes materiales (Rodríguez Ruiz, 2020).

Hasta el momento, la presente investigación es el primer estudio en obtener las constantes de decaimiento representativas de una parte de la red de la Ciudad de México; en particular, el sector BJ-02, ubicado en la Alcaldía Benito Juárez de la Ciudad de México.

1.3. Alcances y limitaciones

La zona de estudio de la presente investigación se limita a un sector de la red de agua potable de la Ciudad de México, éste es el sector BJ-02 y se encuentra en la zona noroeste de la Alcaldía Benito Juárez, en la colonia San Pedro de los Pinos. El sector se encuentra delimitado por Avenida Revolución, Avenida San Antonio, Periférico y la calle 4. Abarca un área de 0.26 kilómetros cuadrados, abastece una población de alrededor de 4,000 habitantes, y la red tiene 6.1 kilómetros de tubería y una sola entrada de agua.

El sector fue seleccionado como la red de estudio debido a la disponibilidad de información. El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) proporcionó un modelo hidráulico computacional de la red del sector, y éste fue refinado a partir de los planos de construcción, registros históricos de presión y caudal, y un estudio de la demanda. El estudio de demanda define el tipo y ubicación de los usuarios en el sector, así como su consumo estimado. El estudio se realizó a partir de recorridos en sitio y virtuales, sistemas de información catastral (Agencia Digital de Innovación Pública, 2022) (INEGI, 2022a) (INEGI, 2022b), datos básicos de consumo (CONAGUA, 1994), y los registros históricos de caudal a la entrada del sector. Cabe mencionar que el estudio de demanda y la calibración del modelo hidráulico se realizaron durante el año 2022, mientras que los muestreos se llevaron a cabo en 2023.

La refinación del modelo hidráulico se realizó para representar con la mayor exactitud posible la trayectoria del agua y conocer el tiempo de permanencia del agua desde la entrada del sector hasta cualquier punto de la red. No obstante, el movimiento del agua en el sector BJ-02 depende principalmente de usuarios domiciliarios, es decir, del comportamiento humano, por lo que asegurar la exactitud del modelo no es posible. Por otro lado, las redes de distribución se encuentran en constante cambio, tanto en la infraestructura que las compone, como en los usuarios que abastece. Por lo tanto, el modelo hidráulico tiene un margen de incertidumbre que no es posible de visualizar, cuantificar, ni controlar; esta incertidumbre puede arrastrar errores en la determinación de constantes, especialmente en la determinación de la constante de reacción global (k_{global}).

Para la determinación de los coeficientes de reacción, se realizaron distintos muestreos para medir la concentración de cloro en la red de estudio. Las muestras de agua fueron recolectadas en sitio, y las mediciones se llevaron a cabo con el apoyo de colaboradores del organismo operador SACMEX, el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, y voluntarios.

La presente tesis no considera la concentración de subproductos de la cloración que puedan existir en el agua potable, sólo considera la concentración del cloro libre. Además, no se realiza un estudio estacional, es decir, no se tomaron muestras de agua durante todo el año. Se llevó a cabo un primer muestreo entre diciembre 2022 y febrero 2023, cuyo diseño involucró hacer uso del medidor de cloro a la entrada del sector, el cual registra la concentración de cloro libre en tiempo real. Sin embargo, eventualmente se descubrió que los valores registrados por el medidor de cloro eran incongruentes y se diseñó un segundo plan de muestreo que no necesitara el uso de dicho medidor. El segundo muestreo se llevó a cabo entre mayo y junio 2023.

2. Marco referencial

2.1. Marco teórico

La protección de la calidad del agua para consumo humano data desde hace cientos de años. Los avances científicos y médicos durante el siglo XVII, junto con la necesidad de proveer de agua potable a las crecientes urbanizaciones, establecieron la base en la distribución de agua. La conexión de epidemias con sistemas de abastecimiento de agua centralizados fueron un gran paso en la protección de la salud pública. Desde entonces se ha reconocido el método de potabilización convencional de agua como uno de los más grandes aportes a la salud pública del siglo XX. Este método se refiere a la utilización de la mejor fuente de abastecimiento disponible, el tratamiento del agua a través de filtración y desinfección, y el mantenimiento de la red de distribución (Roberson & Burneson, 2011).

La desinfección es un proceso diseñado para reducir el número de microorganismo patógenos. Distintos agentes químicos y físicos pueden ser usados para llevar a cabo la desinfección. Entre los agentes más comunes se encuentran el cloro, el dióxido de cloro, el ozono, la radiación UV y la ebullición de agua. La elección de agente o agentes a utilizar en la desinfección depende de factores como la efectividad de la desinfección, el costo operativo, la formación de subproductos, la seguridad operacional del agente, el aporte de una protección residual, y el sabor, olor, y color del agua que reciben los usuarios (Roberson & Burneson, 2011).

La cloración es el método de desinfección más común debido a su bajo costo, eficiencia, confiabilidad y su efecto residual. El cloro libre es un producto de la desinfección por cloración y tiene el objetivo de proteger de la presencia o desarrollo de organismos patógenos en el interior de la red de distribución (CONAGUA, 2019a).

En el uso del cloro como desinfectante, la normatividad mexicana establece límites permisibles de concentración de cloro libre para asegurar la calidad del agua potable. Sin embargo, el cloro libre es un agente altamente reactivo y al entrar en contacto con sustancias en el agua y con las paredes que la contiene, se reduce su concentración. Garantizar la concentración permisible para todos los usuarios que abastece una red de agua potable es altamente complejo debido al número de factores que intervienen en la rapidez con que ocurre este decaimiento del cloro (CONAGUA, 2019a) (CONAGUA, 2019b).

Para comprender el comportamiento del cloro libre residual en el sector BJ-02, es necesario describir los conceptos que rigen la formación y decaimiento de esta sustancia en una red de distribución de agua potable.

2.1.1. Oxidación por cloro

Los oxidantes químicos son usados para la oxidación de especies inorgánicas, compuestos orgánicos y otros contaminantes. También pueden ser usados para destruir compuestos que provocan sabor y olor, y eliminar color. Dado que muchos oxidantes tienen propiedades biocidas, pueden ser usados para controlar crecimientos acuáticos como algas (Singer & Reckhow, 2011).

La oxidación por cloro consiste en que el cloro inactiva los microorganismos al afectar la integridad de sus membranas y daña enzimas y ácidos nucleicos. La reacción de los microorganismos ante el cloro está

determinada por la resistencia de sus membranas y por la afinidad química del cloro con las sustancias vitales del organismo (CONAGUA, 2019a).

La cinética química establece el ritmo de la reacción de oxidación, así como las rutas y mecanismos a través de los cuales ocurren estas reacciones. Las reacciones químicas pueden ocurrir exactamente como se expresan, o bien, ocurren a través de una serie de pasos que involucran reacciones intermedias. En el caso de la desinfección por cloro, la ruta de reacción depende del estado en que se dosifique durante la potabilización (Singer & Reckhow, 2011). El cloro se encuentra disponible en estado gaseoso (Cl_2), como una solución acuosa concentrada (hipoclorito de sodio $NaOCl$), o como un sólido (hipoclorito de calcio $Ca(OCl)_2$) (Singer & Reckhow, 2011). El cloro en cualquiera de sus formas se hidroliza al entrar en contacto con el agua, formando ácido hipocloroso ($HOCl$) (CONAGUA, 2019a).

A continuación, se describe la reacción entre el agua y cada una de las tres especies químicas:

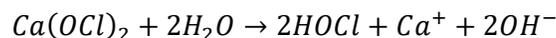
Cloro gas



Hipoclorito de sodio



Hipoclorito de calcio



El ácido hipocloroso ($HOCl$) resultante se disocia moderadamente de la siguiente manera:



La suma del $HOCl$ y del OCl^- es llamado cloro libre residual. Ambas fracciones de la especie producen la inactivación de las bacterias y virus. Sin embargo, la eficiencia de desinfección del $HOCl$ es 80 veces mayor que la del OCl^- (CONAGUA, 2019a). Tanto el ácido hipocloroso ($HOCl$) como el ion hipoclorito (OCl^-) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (Figura 1). Entre menor es el pH mayor es el porcentaje de ácido hipocloroso ($HOCl$) y entre mayor es el pH mayor es el porcentaje de ion hipoclorito (OCl^-). Dado que el ácido hipocloroso tiene una capacidad microbicida significativamente mayor, el pH es un parámetro importante por considerar en la eficiencia de desinfección (CONAGUA, 2019a).

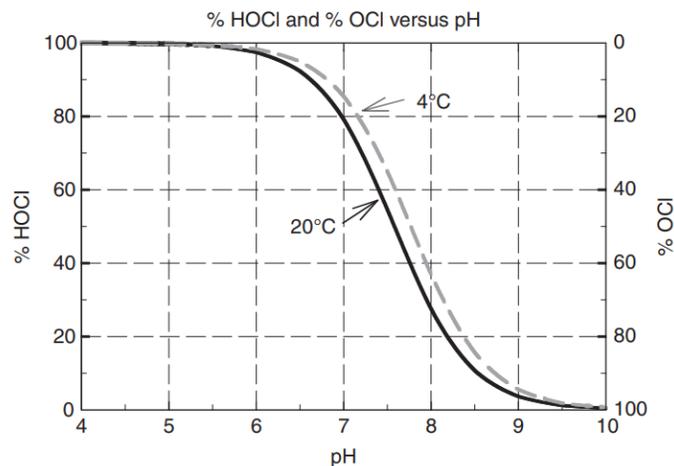


Figura 1. Distribución del ácido hipocloroso y el hipoclorito en agua en diferentes valores de pH (Singer & Reckhow, 2011)

Cloración a punto quiebre

Durante la potabilización, el cloro dosificado reacciona con muchas de las sustancias disueltas o suspendidas en agua, por ejemplo, con la materia orgánica, ácido sulfhídrico, manganeso, hierro, nitritos y amoníaco. En conjunto, estas sustancias se denominan compuestos reductores y consumen el cloro antes de que éste actúe como desinfectante (CONAGUA, 2019a).

Conforme el cloro es añadido, reacciona con la materia oxidable y así todo se reduce a ion cloro (Figura 2, punto A). Después de haber cubierto esta demanda, el cloro sigue reaccionando con el amoníaco para formar cloraminas (entre el punto A y B). Posteriormente, entre el punto B y el punto de quiebre, algunas de las cloraminas se convierten a tricloruro de nitrógeno (NCl_3), las cloraminas restantes son oxidadas a óxido nítrico (N_2O) y nitrógeno (N_2) y el cloro se reduce a ion cloro. Si se adiciona más cloro, la mayoría de las cloraminas se oxidarán. Una vez alcanzando el punto de quiebre, la adición de cloro resulta en un incremento proporcional del cloro residual libre (CONAGUA, 2019a).

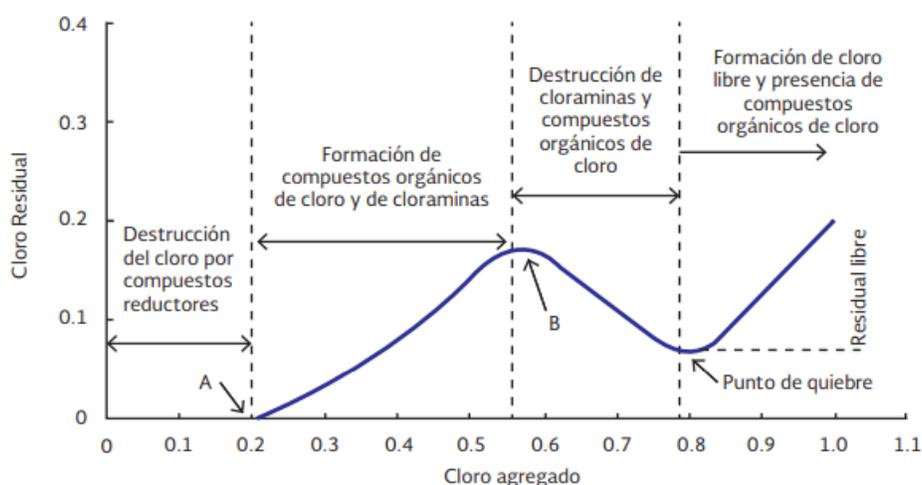


Figura 2. Curva de cloración a punto quiebre (CONAGUA, 2019a).

2.1.2. Cinética química

Una vez que el agua sale de la planta potabilizadora y entra a la red de distribución el cloro libre residual continúa reaccionando con los microorganismos y otras sustancias en el agua, en los tanques y en las paredes de la tubería, y disminuye su concentración. Por lo tanto, el cloro libre se clasifica como una sustancia no conservativa, es decir, es una sustancia cuya concentración no se mantiene constante a través del tiempo (CONAGUA, 2019b).

El cambio en la concentración de una sustancia con respecto al tiempo se conoce como la *velocidad de reacción*. La velocidad de reacción es proporcional a la concentración de los reactivos que intervienen en la reacción, elevados a alguna potencia. La constante de proporcionalidad que describe esta relación es la *constante de reacción* o *constante cinética* (Chang, 2010).

Un modelo de reacción se utiliza para describir estas relaciones entre sustancias e incluir los parámetros que relacionan la velocidad de reacción con las condiciones del sistema (CONAGUA, 2019b). Las reacciones se pueden describir como reacciones de primer orden, segundo orden y orden cero. En una *reacción de primer orden* su velocidad depende de la concentración de un reactivo elevada a la primera potencia.

$$\text{Velocidad de reacción} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k[A]^1$$

En una *reacción de segundo orden* su velocidad depende de la concentración de uno de los reactivos elevada a la segunda potencia o de la concentración de dos reactivos diferentes, cada uno elevado a la primera potencia.

$$\text{Velocidad de reacción} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k[A]^2 = k[A][B]$$

Una *reacción de orden cero* significa que la velocidad de reacción es una constante.

$$\text{Velocidad de reacción} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k[A]^0 = k$$

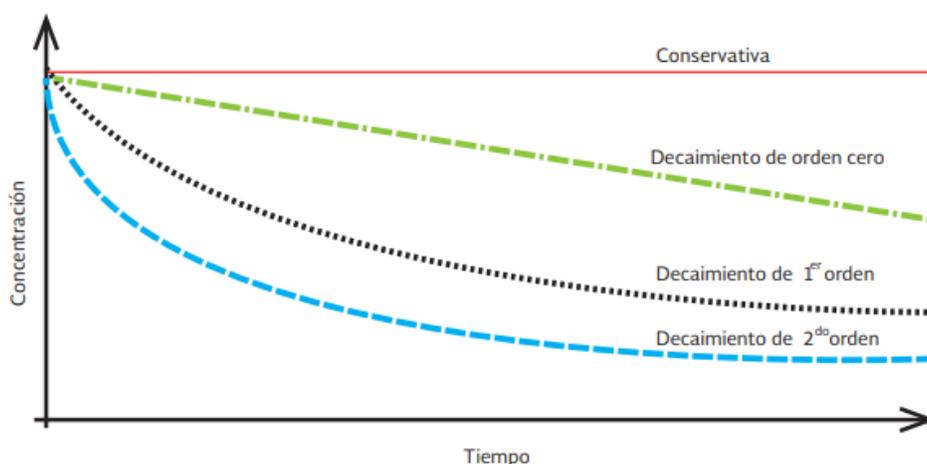


Figura 3. Comportamiento de cuatro modelos de reacción (CONAGUA, 2019a)

Los modelos de reacción también pueden ser representados con ecuaciones cinéticas de orden mayor u orden mixto que permitan describir una reacción de manera más exacta.

La velocidad de reacción depende de la cantidad y tipo de especies químicas con las que interactúa el cloro, y es imposible discretizar y caracterizar individualmente todas las reacciones que ocurren en la red de distribución. Por practicidad, la mayoría de los modelos de calidad suponen que, en el interior de las tuberías de la red, la velocidad de reacción del cloro con su medio en general, disminuye exponencialmente con el tiempo. Esta relación se describe como una reacción de primer orden (CONAGUA, 2019b).

2.1.3. Factores que afectan el decaimiento del cloro libre en tuberías

La presencia del cloro libre residual es un parámetro de calidad de agua que, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, requiere estar dentro de un rango de concentración permisible entre 0.2 y 1.5 mg/L cuando llega a los usuarios. Si la concentración de cloro disminuye demasiado, puede salirse del rango permisible y se corre el riesgo de que ciertas partes del sistema de distribución queden desprotegidas frente a una posible contaminación en su trayecto. La cantidad de cloro libre que llega a las tomas de agua de los usuarios depende del ritmo al cuál disminuye la concentración y del tiempo de permanencia del agua en la red.

El ritmo de decaimiento depende de las múltiples características del agua en la red y de la red de distribución misma. A continuación, se presentan los factores que afectan el ritmo de decaimiento del cloro en una red de distribución:

- **Temperatura.** La influencia de este factor se explica con la teoría de colisiones, la cual establece que cualquier molécula en movimiento posee energía cinética, cuanto más rápido se mueve, su energía cinética es mayor. Para reaccionar, una molécula debe chocar con otra, y las moléculas que chocan deben tener energía cinética total igual o mayor que la energía de activación, que es la mínima cantidad de energía que se requiere para iniciar una reacción química. Debido a que a mayor temperatura están presentes más moléculas con mayor energía, la rapidez de formación del producto también es mayor. Por lo tanto, la constante de rapidez de una reacción es dependiente de la temperatura (Chang, 2010). La temperatura varía de acuerdo con la hora del día, la estación del año y la zona geográfica, por lo tanto, al describir el decaimiento del cloro en una red de distribución se deben tomar en cuenta la variación de estos aspectos (Powell et al., 2000) (García-Ávila et al., 2020).
- **Calidad del agua.** Si el agua en la red contiene materia orgánica, u otras sustancias como partículas de hierro, la cantidad de materia disponible a ser oxidada por el cloro será mayor, y por ello, el decaimiento también será más rápido (Powell et al., 2000).
- **Calidad de las tuberías.** El material, diámetro y la edad de las tuberías puede jugar un papel importante en la tasa de disminución del cloro. Por ejemplo, una tubería de hierro o acero es más vulnerable a reaccionar con el cloro que una tubería de PVC, una tubería de diámetro menor tiene mayor contacto proporcional con las paredes, y la edad de la tubería puede indicar la presencia de corrosión o mayor rugosidad, estos factores potencialmente aumentan el consumo del cloro (Kiéné et al., 1998) (Rodríguez Ruiz, 2020)
- **pH.** Es un parámetro cuya variación afecta el porcentaje de componentes de cloro libre presentes en el agua. Entre menor es el pH, mayor es el porcentaje de ácido hipocloroso ($HOCl$) y, dado que éste tiene una capacidad oxidante mayor, si el pH es mayor el decaimiento del cloro también puede aumentar (Singer & Reckhow, 2011).
- **Condiciones hidráulicas de flujo.** Las condiciones de flujo pueden referirse a flujo laminar, flujo turbulento o en transición. Debido al aumento de energía cinética, entre mayor es la intensidad de turbulencia, mayor es el ritmo de decaimiento del cloro. Condiciones hidráulicas con flujo permanente producen coeficientes de decaimiento mayores que en flujo no permanente. Los eventos transitorios también pueden producir coeficientes de decaimiento menores (Ramos et al., 2010) (Kim & Kim, 2017).

El tiempo permanencia del agua en el sistema depende características fijas y características operacionales. Las características fijas se refieren a la geometría de la red, la longitud, diámetro y rugosidad de tramos de tubería, y la presencia de tanques de almacenamiento y su capacidad. Las características

operacionales se refieren a las variaciones de presión, servicio intermitente, presencia de fugas, la cantidad de usuarios y los hábitos de consumo de los mismos.

La calidad del agua en sistemas de distribución depende de una serie de reacciones complejas que varían en espacio y tiempo, por lo que valorar la calidad del agua con precisión es difícil. Un campo emergente, con el potencial de optimizar recursos y proveer de beneficios significativos en la toma de decisiones en el abastecimiento de agua, es el desarrollo de modelos de calidad. A diferencia de los modelos que sólo enfocan sus aplicaciones en la hidráulica, los modelos de calidad generalmente requieren un mayor grado de detalle en el transporte y mezcla del agua en las redes de tubería. Además, la modelación de parámetros como el cloro libre requieren la determinación de los coeficientes cinéticos que describen el comportamiento del cloro en la red (Lechevallier et al., 2011).

2.1.4. Transporte y mezcla en redes de tubería

Todos los modelos de calidad consideran el transporte de un soluto a través del sistema tomando como punto de partida la distribución de flujo resultante de un análisis hidráulico. La distribución del flujo en una red de agua se define a partir de la conservación de la masa y la conservación de energía. En los análisis de flujo en una red de tuberías, dos procesos deben ser considerados para la modelación de la calidad del agua: la mezcla en los nodos y el transporte en tuberías. La *mezcla en nodos* se debe a la dilución y a la inyección. Se asume que, en la combinación de flujos con diferentes concentraciones, ocurre una mezcla completa e instantánea y, como resultado, las concentraciones son uniformes en toda la sección transversal de la tubería aguas abajo. El *transporte en un fluido* se puede producir por cinco mecanismos: advección, difusión molecular, difusión turbulenta, dispersión, y radiación. El mecanismo dominante para el transporte en tuberías es la advección, y la mayoría de los modelos de calidad de agua sólo representan este mecanismo. La advección es el movimiento de una partícula con el agua, en dirección del flujo, con la magnitud de la componente de la velocidad principal (Figura 4) (CONAGUA, 2019b).

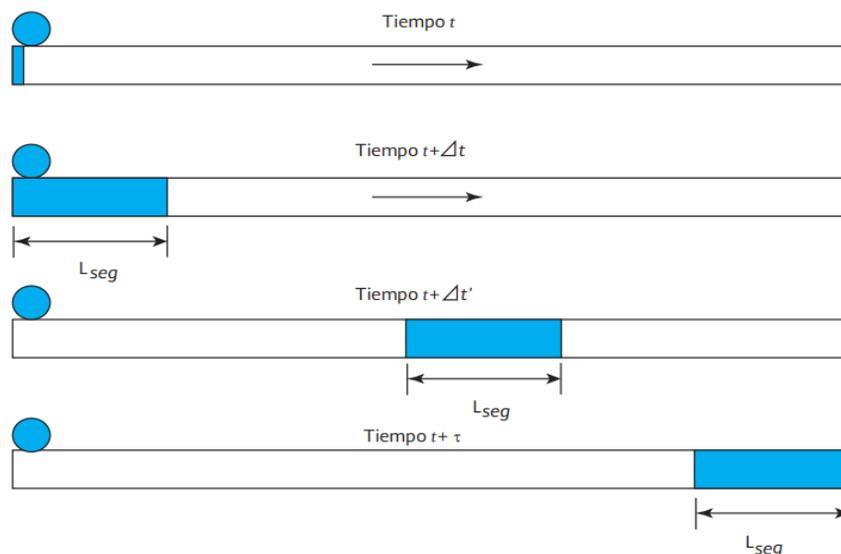


Figura 4. Transporte por advección de un soluto (CONAGUA, 2019b).

2.1.5. Constantes cinéticas del cloro libre en tuberías

Los modelos de decaimiento de primer orden han demostrado generar buenas representaciones del decaimiento del cloro libre en redes de distribución (Vasconcelos et al., 1997). En una reacción de primer orden, el cambio de concentración de una sustancia con respecto al tiempo es proporcional a la concentración de los reactivos elevados a la primera potencia. La constante de proporcionalidad que describe esta relación es la *constante cinética* (Chang, 2010).

$$\frac{dC}{dt} = -kC^1$$

Por lo tanto, el cambio de concentración del cloro libre en tuberías respecto al tiempo se representa como una ecuación diferencial. Para resolver la ecuación diferencial se aplica el método de separación de variables.

$$\int_{C_o}^C \frac{1}{C} dC = -k \int_{t_o}^t dt$$
$$\ln(C) - \ln(C_o) = -k(t - t_o)$$
$$e^{\ln(C/C_o)} = e^{-k(t-t_o)}$$
$$C = C_o e^{-kt}$$

Donde

- C es la concentración final de cloro libre
- C_o es la concentración inicial de cloro libre
- k es la constante o coeficiente cinético
- t es el tiempo transcurrido entre la concentración inicial y la final

El decaimiento del cloro libre residual en las redes de distribución involucra las reacciones del cloro con el agua en la tubería y las reacciones con la tubería misma. Generalmente, se obtienen dos tipos de coeficientes cinéticos: el coeficiente de reacción en el seno del fluido (k_b) y el coeficiente de reacción con la pared de la tubería (k_w). Esto debido a que los dos procesos de decaimiento muestran diferentes dinámicas de reacción (Muhammad et al., 2021) (CONAGUA, 2019b):

$$k_{global} = k_b + k_w$$

El coeficiente de reacción en el seno del fluido puede ser determinado por medio de pruebas en frasco a partir de muestras de agua tomadas de la red de estudio. El coeficiente de reacción con la pared de la tubería se puede obtener de manera directa, a partir de experimentos en campo de la red en cuestión, o de manera indirecta, a partir del coeficiente de transferencia de masa y el coeficiente cinético global de la red. El coeficiente de pared es difícil de estimar, ya que puede variar con las condiciones de flujo, diámetro, rugosidad, edad de tubería y condiciones de biocapa de la tubería. Rara vez se calcula un coeficiente para cada tubo individual; Generalmente se estima un coeficiente único para toda la red de distribución (CONAGUA, 2019b).

2.2. Estado del arte

El uso del cloro como desinfectante data desde el siglo de XVII, sin embargo, el desarrollo de modelos de reacción para describir el comportamiento del cloro residual en redes de distribución comenzó con investigadores como Lewis A. Rossman y John J. Vasconcelos en la década de 1990 en Estados Unidos. Rossman y sus colaboradores de la EPA (Environmental Protection Agency) establecieron un modelo de reacción de primer orden como el mejor ajuste para el decaimiento del cloro libre residual en una red de distribución (Rossman et al., 1994). Además, desarrollaron el programa EPANET para modelar el comportamiento hidráulico y de calidad en redes de distribución (Rossman, 2000).

En las últimas décadas, diversos investigadores han tomado interés en la determinación de las constantes de reacción del cloro y han desarrollado modelos de calidad en todo el mundo. Investigadores en Estados Unidos (Arevalo, 2007), Egipto (Mostafa et al., 2013), Portugal (Monteiro et al., 2014), Polonia (Kowalska et al., 2018), Ecuador (García Ávila, 2019), y Malasia (Muhammad et al., 2021), han determinado constantes de reacción para el desarrollo de modelos de calidad enfocados en el decaimiento del cloro en redes de distribución reales en estos países. La mayoría de estos modelos consideran reacciones de primer orden y obtienen las constantes de reacción k_b y k_w , esto facilita la comparación de resultados entre estudios.

Por otro lado, también se han elaborado otros modelos diferentes al de primer orden. En México, se estableció un modelo de orden mixto para caracterizar el decaimiento de cloro en la red de agua potable de Culiacán, Sinaloa (Tzatchkov et al., 2004). Y en Australia, algunos investigadores cuestionaron la exactitud del modelo de primer orden y evaluaron el ajuste de distintos modelos de reacción (Fisher et al., 2011).

Además del desarrollo de modelos de calidad enfocados en el decaimiento del cloro, en las últimas décadas se han llevado a cabo experimentos para caracterizar qué fenómenos afectan la disminución del cloro y en qué magnitud (Kiéné et al., 1998). En Gran Bretaña, se determinó la concentración inicial del cloro, la calidad del agua en la red y la temperatura como algunos de los factores más importantes que controlan las tasas de decaimiento (Powell et al., 2000). En México, se realizó una comparación entre los coeficientes de reacción de pared para tuberías de diferentes materiales (Rodríguez Ruiz, 2020). Y en Portugal (Ramos et al., 2010) y Corea del Sur (Kim & Kim, 2017) se evaluó la variación de la concentración de cloro bajo diferentes condiciones de flujo.

La presente tesis determina las constantes cinéticas (k_{global} , k_b y k_w) de un sector de la red de distribución de la Ciudad de México a partir de una metodología similar a la utilizada por autores en otros países. Esta investigación aporta un estudio descriptivo y analítico del comportamiento hidráulico y el cambio de concentración de cloro en el sector BJ-02 bajo condiciones actuales. El estudio tiene el potencial de asistir en decisiones operacionales y estudios de planeación respecto al sistema de abastecimiento de la ciudad (Lechevallier et al., 2011).

2.3. Modelación en redes de distribución de agua

La calidad del agua en sistemas de distribución varía espacial y temporalmente de acuerdo con una serie de reacciones complejas que se desarrollan desde que el agua sale de la planta potabilizadora hasta que llega a los usuarios, por lo que evaluar la calidad en cada punto de abastecimiento resulta difícil (Lechevallier et al., 2011).

El uso del cloro como un desinfectante tiene la ventaja de aportar una protección residual a la red contra agentes nocivos para la salud, sin embargo, el decaimiento del cloro puede implicar que ciertas partes de la red queden desprotegidas. Los organismos operadores determinan la dosis del desinfectante, tanto en las fuentes como en estaciones de reinyección, de manera empírica, revisando la concentración en diferentes puntos. Dadas las dimensiones de las redes de agua potable en las ciudades, no es viable muestrear cada punto de la red. Por lo tanto, existe un margen de riesgo en el que múltiples puntos pueden tener una excesiva, insuficiente o nula concentración de cloro (CONAGUA, 2019b).

Herramientas de modelación hidráulica y de calidad proveen una manera de ligar parámetros hidráulicos con la calidad de agua. Estos modelos pueden proveer de valioso conocimiento acerca del comportamiento de los flujos y los factores y sustancias que afectan la calidad del agua, y son componentes importantes para un enfoque integral en la gestión de la calidad del agua en un sistema de distribución (Lechevallier et al., 2011).

En general el modelo se alimenta con los siguientes datos: trazo de la red, altimetría, material y diámetro de las tuberías, tanques, válvulas, bombas, datos operacionales, y ritmo de desinfección. Una parte de estos datos se toman del catastro de la infraestructura, y otra parte se obtiene por medio de mediciones en campo y en laboratorio. Normalmente, el principal obstáculo dentro de los organismos operadores para la aplicación de modelos de simulación de calidad del agua en redes de distribución es la falta de información (CONAGUA, 2019b).

2.3.1. Modelación hidráulica en EPANET

EPANET es un programa de cómputo ampliamente usado a nivel mundial que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión (Rossman, 2000).

La implementación de un modelo de simulación hidráulica se desarrolla en dos etapas: la construcción del modelo y su calibración. La *construcción del modelo* implica determinar el tipo de problemas que el modelo ayudará a resolver, caracterizar los componentes de la red, esqueletizar la red simplificando el sistema de tuberías, integrar los componentes físicos y asignar los componentes no físicos. La *calibración del modelo* se enfoca en ajustar los parámetros de la red de acuerdo con la presión, gasto, la reproducción de estados de demanda y calibración de fugas. El primer paso en la generación del modelo hidráulico en EPANET es el trazo de la red, esto abarca la colocación de elementos como nodos, tanques, bombas, válvulas y las tuberías que los unen entre sí. Después, se insertan las características de cada uno de los componentes, como la elevación de los nodos, la longitud de las tuberías y las dimensiones de los tanques. El diámetro y la rugosidad de las tuberías son parámetros difíciles de determinar ya que dependen de la antigüedad de la red, la topología y la composición química del agua (CONAGUA, 2019b).

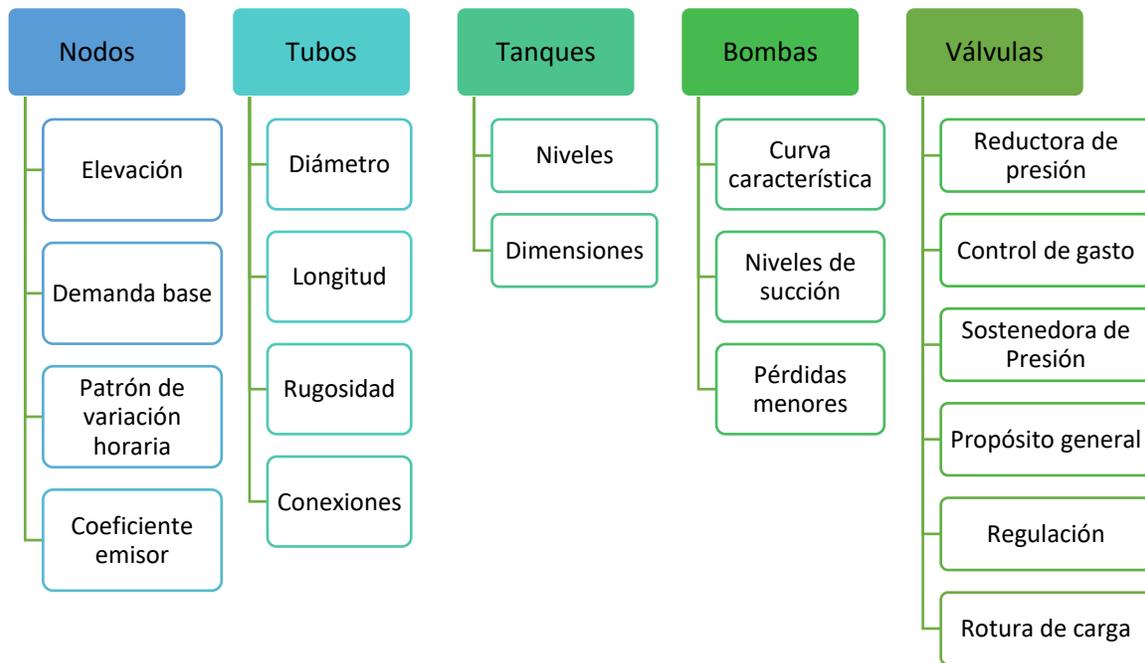


Figura 5. Datos de entrada para modelación hidráulica en EPANET. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos de calidad generalmente requieren un mayor grado de detalle dentro del modelo, en comparación con las aplicaciones que se enfocan sólo en la hidráulica. Un reto clave en la modelación hidráulica es la determinación del consumo de agua de los usuarios en todos los puntos del sistema de distribución a través del tiempo. Aunque existen medidores de agua en las tomas de agua de los usuarios, generalmente tienen lecturas mensuales o bimestrales, y no proveen de datos en tiempo real. La demanda en los nodos es la variable que más incidencia tendrá en la respuesta del modelo de calidad por lo que se debe realizar con particular atención durante la modelación hidráulica (Lechevallier et al., 2011) (CONAGUA, 2019b).

La asignación de demandas requiere caracterizar a los usuarios de una red por tipo de consumo (comerciales, domésticos, industriales, servicios públicos), nivel socioeconómico, clima de la zona, hábitos de consumo y variación horaria de la demanda. La asignación de demandas nodo por nodo consiste en relacionar cada usuario con un nodo del modelo y asignar su consumo a dicho nodo.

Las redes de distribución de agua potable pueden ser ramificadas, malladas o mixtas. Una red ramificada comienza en el punto donde la tubería de alimentación se bifurca en dos o más tuberías, las cuales a su vez se pueden bifurcar sucesivamente. Una red mallada tiene todos sus puntos conectados entre sí, de tal manera que el agua puede llegar a un punto determinado siguiendo distintas rutas. En el caso de la red de estudio, se trata de una red mixta, las tuberías se encuentran interconectadas por nodos salvo unas pocas excepciones. En el caso de una red mallada o mixta, el criterio de asignación de demandas queda a elección del modelador. EPANET permite asignar una demanda base y un patrón de demanda distinto para cada nodo. El patrón de demanda consiste en una serie de factores que aumentan o reducen la demanda base de acuerdo con la hora del día (CONAGUA, 2019b) (Rossman, 2000).

Para representar las fugas, EPANET utiliza la ecuación de descarga a través de un orificio. Por lo que, el gasto perdido por fugas está en función de la presión y de una constante que depende del área del orificio y otras condiciones de descarga. Dado que no es posible conocer con certeza datos como el área del orificio, la constante se calibra al correr la simulación del modelo. Esta constante, en EPANET se conoce como el coeficiente emisor (Rossman, 2000).

La calibración y validación del modelo hidráulico se completa al revisar los datos asociados con el modelo y compararlos con los datos de campo, para así asegurarse de la precisión del modelo. Debido a que las redes de distribución sufren constantes cambios, como la sectorización, ampliación, modificación de la red o del servicio, y el aumento o disminución en la demanda, el modelo hidráulico debe ser actualizado y recalibrado de forma periódica (CONAGUA, 2019b).

EPANET permite visualizar los resultados en múltiples formatos como mapas de la red codificados por colores, mapas de isolíneas, series de tiempo para parámetros en nodos o tramos de tubería, entre otros (Rossman, 2000).

2.3.2. Modelación de calidad en EPANET

El programa EPANET tiene la capacidad de realizar distintos tipos de análisis de calidad. Todos los análisis de calidad requieren que el modelo hidráulico ya se encuentre calibrado y validado. La modelación del decaimiento del cloro libre residual en una red de distribución corresponde a un análisis de una sustancia química. El resultado de este análisis es la concentración de la sustancia química en todos los nodos de la red en distintos instantes de tiempo (Rossman, 2000).

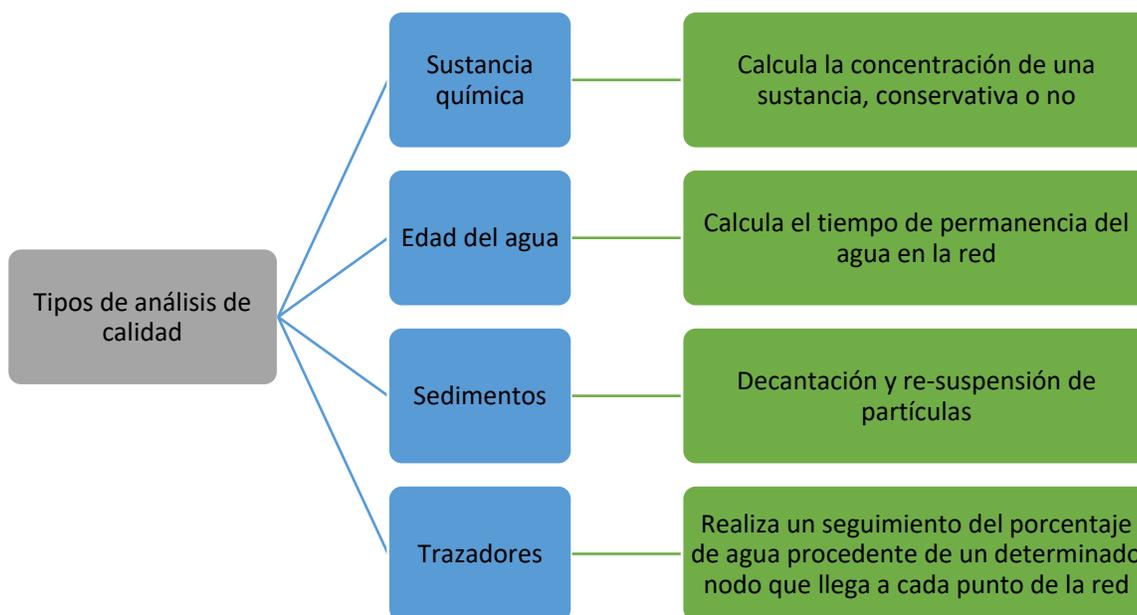


Figura 6. Tipos de análisis de calidad a realizar en EPANET. Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de edad del agua, trazadores, y la modelación de solutos en el agua como el cloro. Los análisis de la edad del agua y trazadores pueden llevarse a cabo sólo con la información hidráulica. Sin embargo, modelar parámetros como el cloro libre requieren los coeficientes cinéticos y recolección en datos en campo para la calibración del modelo (Lechevallier et al., 2011).

EPANET simula las reacciones que ocurren entre la sustancia química y el seno del agua mediante un modelo de reacción de orden n , lo que significa que la velocidad instantánea de reacción R de la sustancia depende en cada momento de la concentración de dicha sustancia, de acuerdo con la siguiente expresión (Rossman, 2000):

$$R = K_b C^n$$

K_b coeficiente de reacción en el seno del fluido

C concentración del reactivo (masa/volumen)

n orden de reacción

R tasa de reacción (masa/volumen/tiempo)

Además de las reacciones que ocurren con el agua, EPANET modela las reacciones que ocurren con el material de las paredes de las tuberías. La tasa de esta reacción se considera dependiente de la concentración del reactivo y utiliza la expresión de la forma (Rossman, 2000):

$$R = \left(\frac{A}{V}\right) K_w C^n$$

K_w coeficiente de reacción con las paredes de la tubería

A/V área de la superficie por unidad de volumen (1/longitud)

n orden de reacción

R tasa de reacción (masa/volumen/tiempo)

Los datos de entrada que complementan el modelo hidráulico para generar un modelo de calidad y permiten ejecutar un análisis de la concentración del cloro son: las constantes cinéticas y la concentración inicial en las fuentes de abastecimiento del modelo y posibles puntos de reinyección. Estos datos se determinan a partir de muestreos en la red de estudio para calibrar el modelo (Rossman, 2000).

Debido a la naturaleza físico-química del cloro, el programa de muestreo debe ser cuidadosamente diseñado e implementado, y debe tomar en cuenta los siguientes aspectos (CONAGUA, 2019b):

- El tiempo de retención hidráulico será una variable fundamental para definir los puntos de muestreo.
- En redes pequeñas, los tiempos de residencia hidráulica son cortos y no se produce decaimiento apreciable del desinfectante por lo que tomar un número reducido de puntos bastaría para conocer la concentración del cloro residual dentro de la red.
- En redes grandes cuando se incluyen solo las líneas principales, las velocidades de flujo son altas y, por lo tanto, los tiempos de retención hidráulicos son cortos. Por ello también se puede tomar un número reducido de muestras.

3. Descripción del sector BJ-02

La sectorización es la formación de zonas de suministro autónomas dentro de una red de distribución, en otras palabras, es la partición de la red en muchas pequeñas redes. Cada sector cuenta con una sola entrada de agua bien identificada e instrumentada con un medidor de caudal y presión. Estos medidores permiten conocer la cantidad de agua que alimenta al sector, así como su presión.

Algunas ventajas de la sectorización e instrumentación de la red de distribución son:

- Recopilar información del comportamiento hidráulico de la red.
- Identificar posibles fugas en la red a partir de comparar el gasto a la entrada de un sector y los consumos de los habitantes de este.
- Evaluar la igualdad del servicio de abastecimiento de agua, a partir de comparar los gastos y presiones medidos en distintas zonas de la red.

La sectorización es una estrategia para asistir en la distribución homogénea y eficiente de los caudales, la continuidad en el abasto de agua, el aumento de la efectividad de las reparaciones y la prolongación de la vida útil de las tuberías de la red (SACMEX, 2012).

La sectorización de la red de distribución de agua potable de la Ciudad de México es un proyecto de gobierno que fue impulsado desde 2004 como una respuesta al notable incremento de la longitud de la red en los últimos años, y la consiguiente dificultad en su mantenimiento y operación (SACMEX, 2012).

En 2018, un diagnóstico del sistema de aguas expuso que sólo el 56% de los usuarios presentaban un buen servicio de agua potable, el resto presentaba servicio por tandeos semanales o diarios, calidad deficiente, o una situación insostenible de abastecimiento debido a la sobreexplotación. La calidad del servicio se presenta de manera desigual en la ciudad, el suministro que se proporcionaba mediante tandeos o en forma deficiente se presentaba principalmente en las alcaldías Tlalpan, Iztapalapa y Magdalena de Contreras (SACMEX, 2018).

Por otro lado, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a través de su Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO) estableció que el organismo operador de la ciudad (SACMEX) tuvo una eficiencia física de 47% en 2020. Es decir, en 2020, sólo el 47% del volumen de agua producido era consumido por los usuarios, el 53% restante se perdió en fugas o tomas clandestinas.

Ante esta problemática, el proyecto de sectorización actual tiene el objetivo de mejorar el servicio de agua potable de la ciudad a partir de detectar y reparar de fugas con mayor rapidez, y homologar los caudales y presiones en la red. El proyecto consiste en reorganizar la red en 830 sectores entre 2019 y 2024.

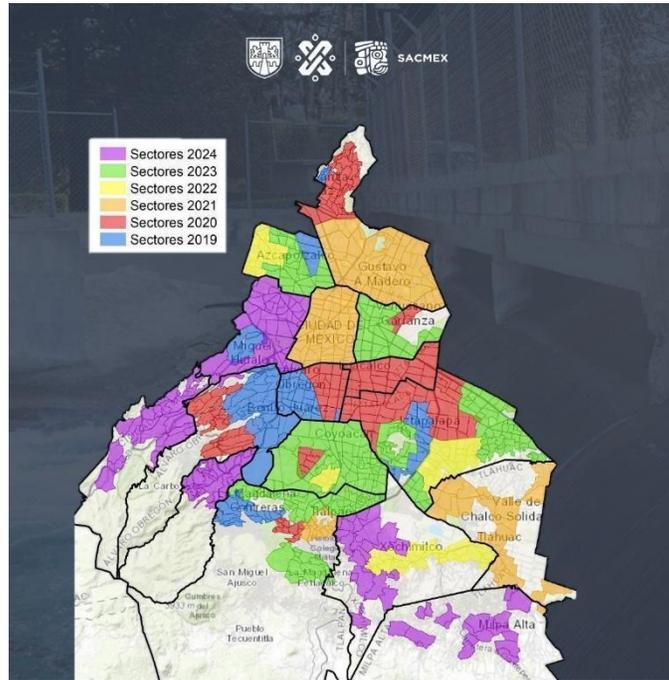


Figura 7. Sectorización de la red de distribución de la CDMX. Fuente: Programa de Sectorización Avances 2022

El sector de estudio es el sector BJ-02, el cual se encuentra en la zona noroeste de la Alcaldía Benito Juárez, en la colonia San Pedro de los Pinos. El sector se encuentra delimitado por Avenida Revolución, Avenida San Antonio, Periférico y la calle 4. Abarca un área de 0.26 kilómetros cuadrados. Abastece una población de alrededor de 4,000 habitantes, algunos usuarios comerciales y servicios públicos.

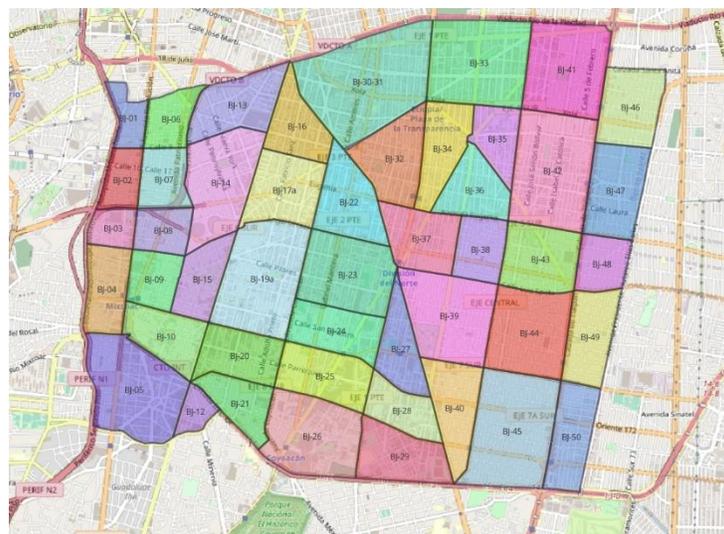


Figura 8. Sectores de la alcaldía Benito Juárez. Fuente: Programa de Sectorización Avances 2022.

La determinación de las constantes de decaimiento del cloro libre residual en el sector BJ-02 requieren la elaboración de un modelo hidráulico. Para generar este modelo hidráulico se requiere recopilar información acerca de las características de la red de estudio y el contexto bajo el cual opera.

La descripción del origen del agua que recibe el sector aporta una primera estimación de la calidad del agua en el sector. Las características de la red proporcionan los datos de entrada para la construcción del modelo hidráulico y permiten conocer la ubicación de las piezas especiales en la red. La descripción de los usuarios aporta una primera estimación en la cantidad de agua que demanda el sector, así como su variación temporal y espacial dentro del mismo. Caracterizar correctamente a los usuarios es un punto clave en la calibración del modelo hidráulico.

3.1. Origen del agua que recibe el sector

El sector BJ-02 recibe agua de los sistemas Cutzamala y Lerma; no es abastecido por la extracción de agua subterránea de la Ciudad de México. El agua potable ingresa por el poniente a través del Acueducto Perimetral Cutzamala Ramal Sur (Figura 9), llega a la Trifurcación Santa Lucía e ingresa a la alcaldía Benito Juárez (Figura 10). Antes de llegar a la Trifurcación Santa Lucía, el agua recibe una recloración con cloro gas en la Planta Cloradora “Peña del Venado” (Fuente interna, SACMEX, 2022). Dada la ubicación de la colonia San Pedro de los Pinos y el sector BJ-02, el sector es de los primeros en recibir el agua potable de los sistemas Cutzamala y Lerma en la alcaldía Benito Juárez, y en general en la Ciudad de México.

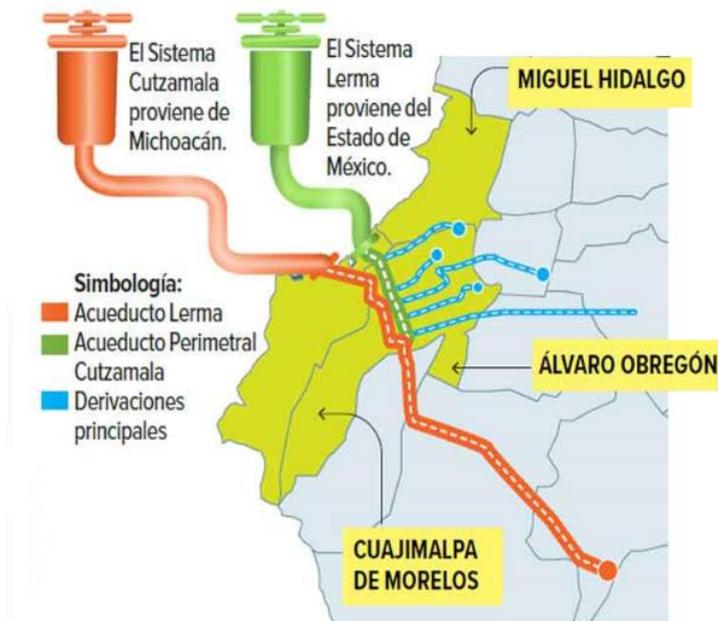


Figura 9. Ruta del agua de los sistemas Cutzamala y Lerma. Fuente: López, 2019.

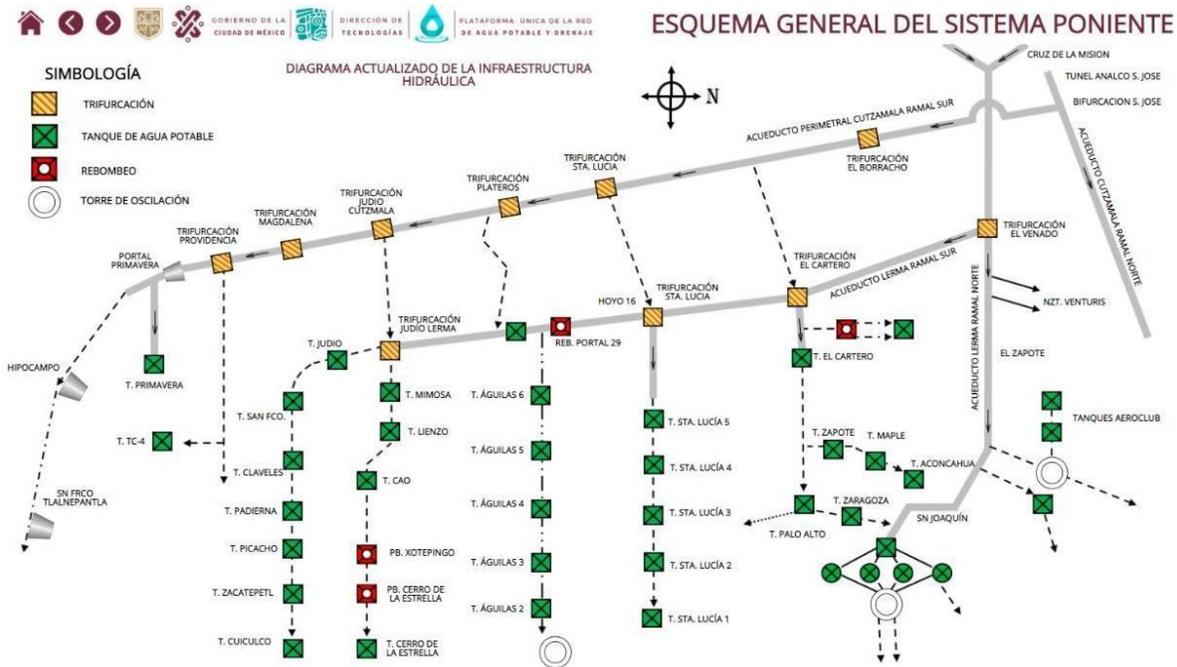


Figura 10. Diagrama general de la infraestructura hídrica del sistema poniente de la Ciudad de México. Fuente: Organismo Operador SACMEX.

En abril de 2020, la Gaceta Oficial de la Ciudad de México publicó las colonias que reciben servicio de agua potable por tandeo. La colonia San Pedro de los Pinos no se encuentra dentro de la lista (Gobierno de la Ciudad de México, 2020). Por lo tanto, se asume que el sector no recibe servicio por tandeo, es decir, recibe servicio continuo de agua potable.

3.2. Características de la red de agua potable del sector BJ-02

Las características de la red de agua potable del sector se refieren a la altimetría de la red, el material, longitud y diámetros de las tuberías, y la ubicación de válvulas y medidores.

La zona de estudio se encuentra entre las elevaciones 2254 metros y 2270 metros. A continuación, se presenta un mapa, generado en el software libre EPANET, de las elevaciones de los nodos del sector. Se observa que el nodo más alejado de la entrada del sector se encuentra a una elevación menor.

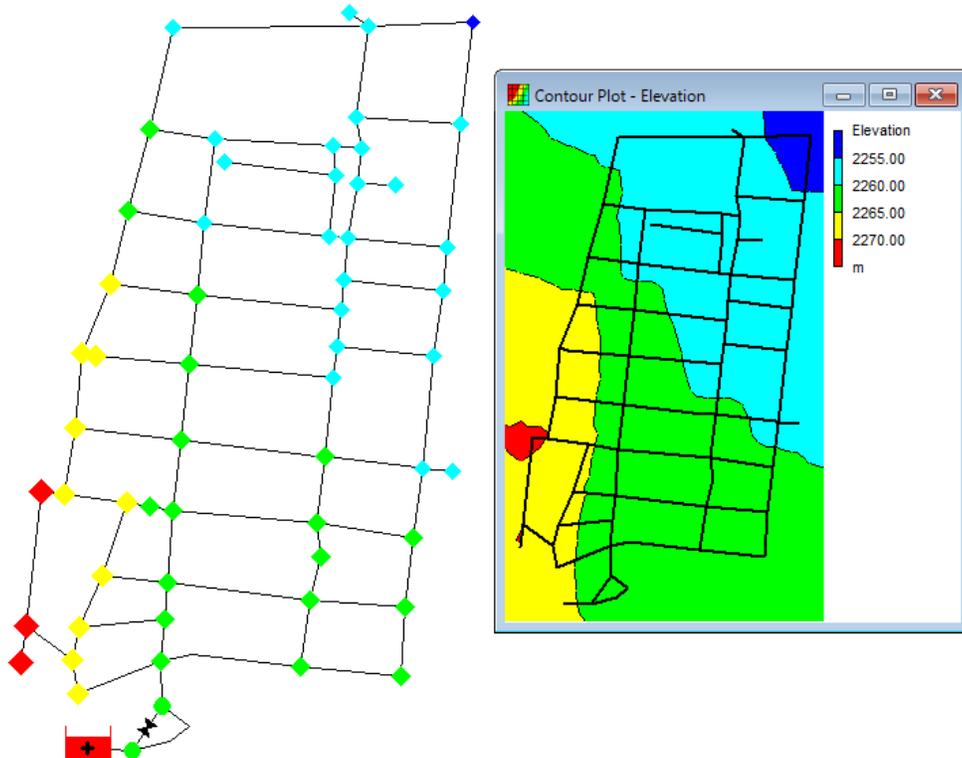
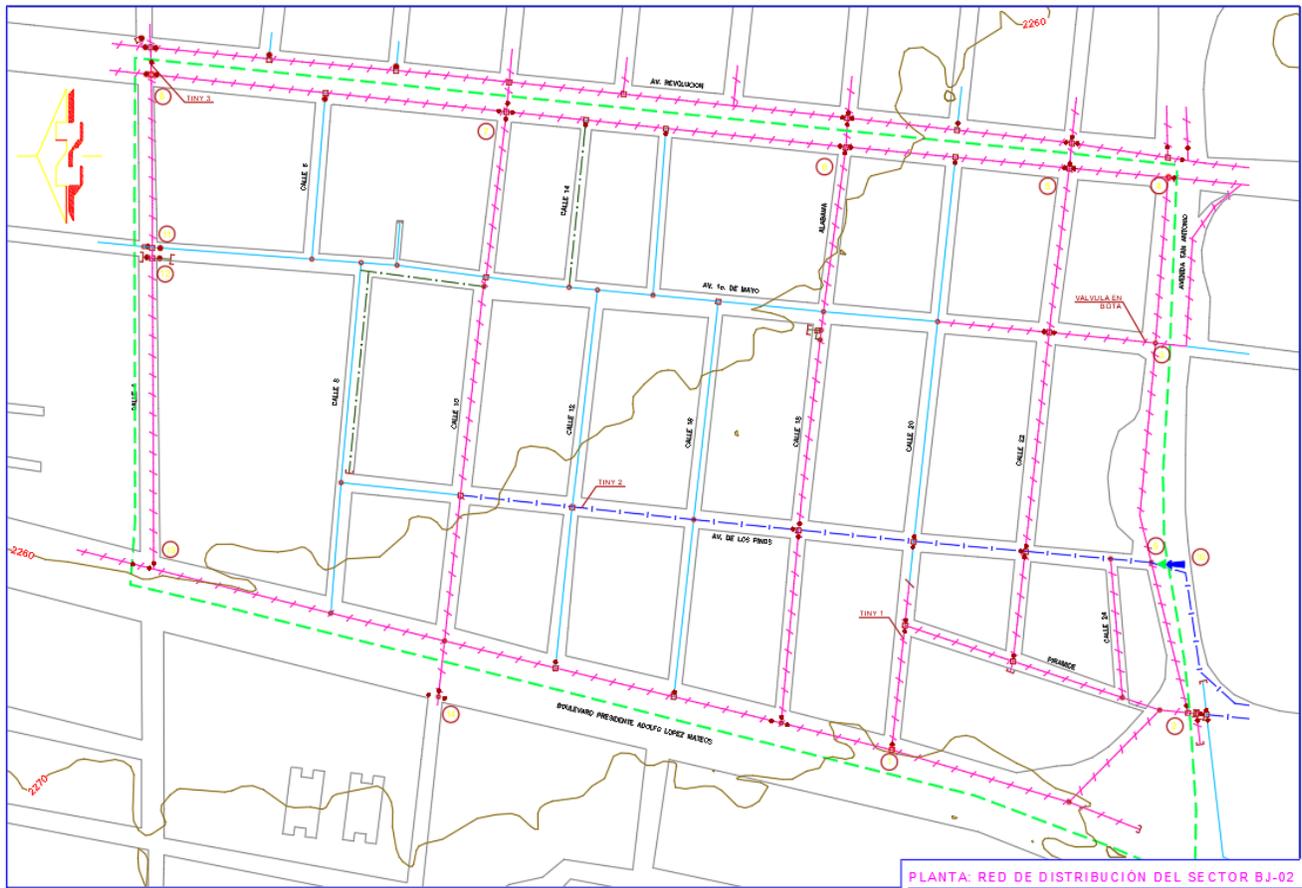


Figura 11. Elevaciones del sector BJ-02

La longitud total de tuberías dentro del sector es de 6,109 metros. Los diámetros de las tuberías varían entre 3 y 12 pulgadas (76.2 mm y 304.8 mm). Cada tramo de tubería del sector tiene definido un valor de diámetro y de longitud. Estos valores se encuentran desglosados para cada tramo en la Tabla 1. Las tuberías del sector son de asbesto-cemento (rugosidad absoluta de 0.025mm). El sector cuenta con 490 tomas de agua potable. El gasto medio diario es de 9.99 L/s que entra al sector, el gasto máximo diario es de 12.19 L/s y el gasto máximo horario es de 18.90 L/s. Estos datos se establecieron en los planos de construcción elaborados por el organismo operador SACMEX al momento de la delimitación del sector.

Tabla 1. Longitud y diámetros de tramos de tubería en sector BJ-02.

TRAMO	Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (m)	TRAMO	Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (m)
N8'-N10	76.2	3	7.69	N13-N20	152.4	6	75.77
N9-N10	76.2	3	124.2	N19-N24	152.4	6	56.06
N10-N15	76.2	3	74.07	N20-N25	152.4	6	74.25
N18-N19	76.2	3	103.02	N25-N25'	152.4	6	3.08
N2-N4	101.6	4	104.36	N25-N28	152.4	6	75.34
N4-N5	101.6	4	103.57	N24-N31	152.4	6	113.13
N4-N8	101.6	4	29.75	N28-N29	152.4	6	107.76
N7-N14	101.6	4	77.65	N29-N30	152.4	6	145.59
N6-N7	101.6	4	68.77	N30-N31	152.4	6	99.23
N7-N8'	101.6	4	136.43	N31-31'	152.4	6	31.15
N8'-N8	101.6	4	9.49	N28-N32	152.4	6	68.55
N8-N11	101.6	4	23.04	N31-N37	152.4	6	72.23
N11-N12	101.6	4	43.11	N32-N32'	152.4	6	14.81
N11-N16	101.6	4	58.64	N32-N33	152.4	6	66.12
N16-N18	101.6	4	53.78	N33-N34	152.4	6	23.98
N20-N21	101.6	4	88.31	N32'-N45	152.4	6	135.12
N21-N22	101.6	4	144.98	N33-N39	152.4	6	77.61
N18-N22	101.6	4	18.43	N38-N41	152.4	6	70.1
N22-N23	101.6	4	37.36	N37-N42	152.4	6	72.98
N23-N24	101.6	4	98.27	N39-N40	152.4	6	65.93
N23-N27	101.6	4	31.76	N40-N41	152.4	6	144.66
N25'-N26	101.6	4	94.93	N41-N42	152.4	6	100
N26-N27	101.6	4	146.1	N39-N43	152.4	6	79.77
N27-N30	101.6	4	79.86	N43-N44	152.4	6	85.77
N30-N36	101.6	4	72.08	N43-N46	152.4	6	16.37
N34-N35	101.6	4	23.44	N45-N45'	152.4	6	49.03
N35-N36	101.6	4	146.65	N45-N46	152.4	6	61.42
N36-N37	101.6	4	99.91	N46-N47	152.4	6	8.18
N36-N38	101.6	4	2.88	N41-N49	152.4	6	68.15
N1-N2	152.4	6	196.72	N42-N50	152.4	6	66.03
N2-N2'	152.4	6	5.54	N47-N48	152.4	6	91.08
N2-N3	152.4	6	105.36	N48-N49	152.4	6	142.88
N1-N6	152.4	6	116.27	N49-N50	152.4	6	101.18
N3-N5	152.4	6	119.46	N14-N21	304.8	12	72.93
N5-N17	152.4	6	110.11	N21-N26	304.8	12	71.59
N6-N13	152.4	6	75.17	N26-N29	304.8	12	76.75
N13-N14	152.4	6	78.47	N29-N35	304.8	12	71.55
N14-N15	152.4	6	137.11	N35-N40	304.8	12	72.09
N15-N16	152.4	6	7.79	N40-N44	304.8	12	54.29
N16-N17	152.4	6	100.53	N44-N48	304.8	12	25.59
N17-N19	152.4	6	54.86	N48-N51	304.8	12	1
						SUMA	6119.02



TUBERÍA DE 3"	---	---
TUBERÍA DE 4"	---	---
TUBERÍA DE 6"	---	---
TUBERÍA DE 12"	---	---
TUBERÍA DE 20"	---	---
TUBERÍA DE 48"	---	---
LÍMITE DEL SECTOR	---	---

Figura 12. Plano de tuberías del sector BJ-02. Fuente: Fuente interna SACMEX.

El sector tiene 12 cruceros cuyo propósito es aislar el sector del resto de la red de agua potable, de modo que sólo se tenga una entrada de agua (Figura 13). Algunos de los cruceros ya contaban con válvulas de seccionamiento (Figura 14), por lo que no fueron intervenidos. Otros cruceros corresponden con los que recibieron instalación de válvulas de seccionamiento para completar el aislamiento del sector (Figura 15). El crucero nueve corresponde a una válvula reductora de presión y el crucero diez corresponde al medidor de gasto (Figura 16 y Figura 18), estos dos cruceros se encuentran en la única entrada de agua potable al sector.

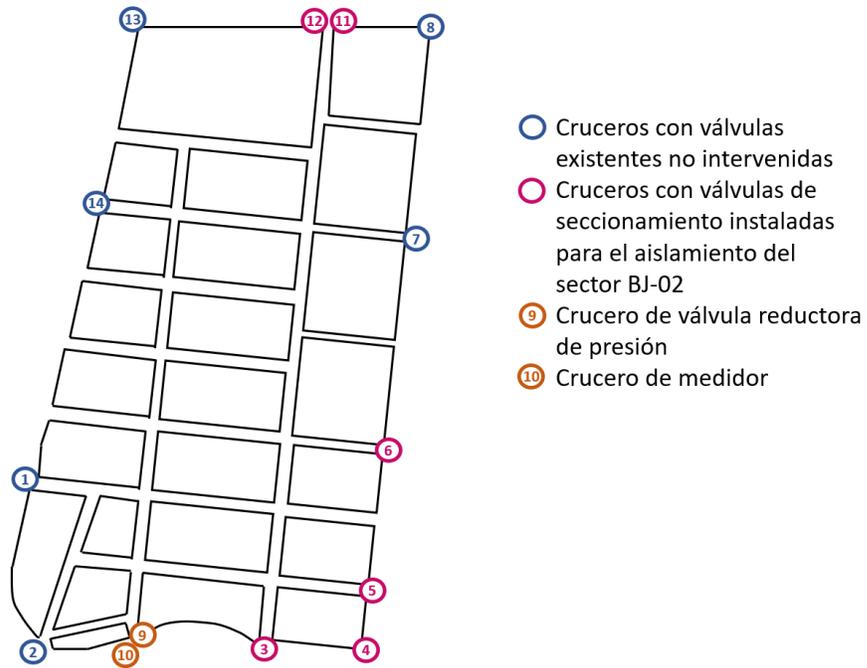


Figura 13. Cruceros del sector BJ-02

CUADRO DE CRUCEROS DEL SISTEMA DE VÁLVULAS EXISTENTES NO INTERVENIDAS

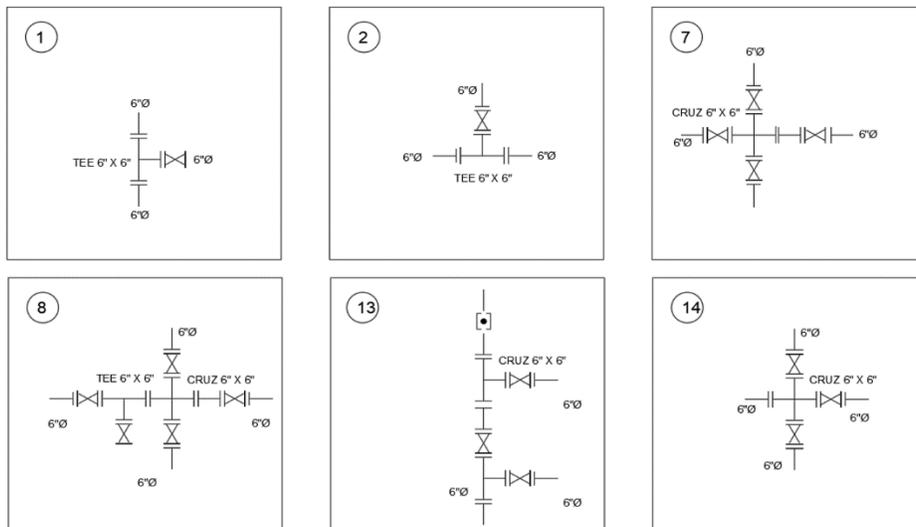


Figura 14. Cruceros del sistema de válvulas existentes no intervenidas en el sector BJ-02. Fuente: Planos de construcción del sector BJ-02, fuente interna SACMEX.

CUADRO DE CRUCEROS DEL SISTEMA DE VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO PARA EL AISLAMIENTO DEL SECTOR BJ-02

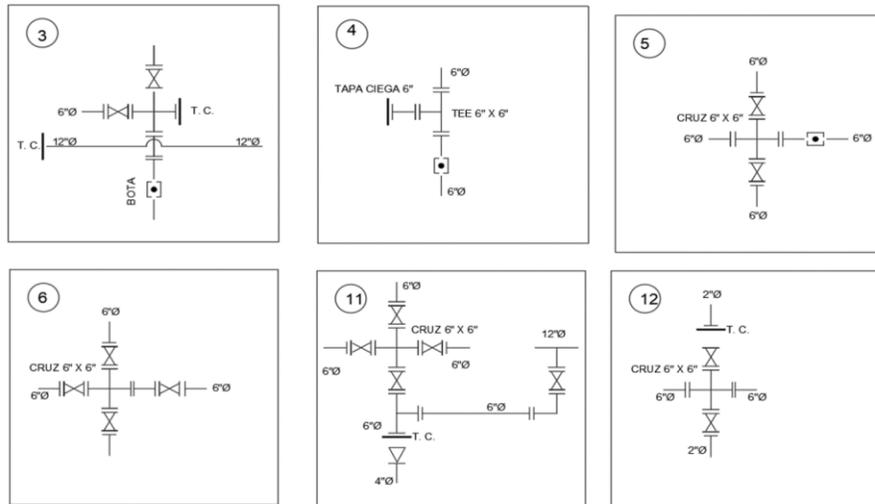


Figura 15. Cruceros del sistema de válvulas de seccionamiento para el aislamiento del sector BJ-02. Fuente: Planos de construcción del sector BJ-02, fuente interna SACMEX.

CRUCERO DE VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN

CRUCERO DE MEDIDOR

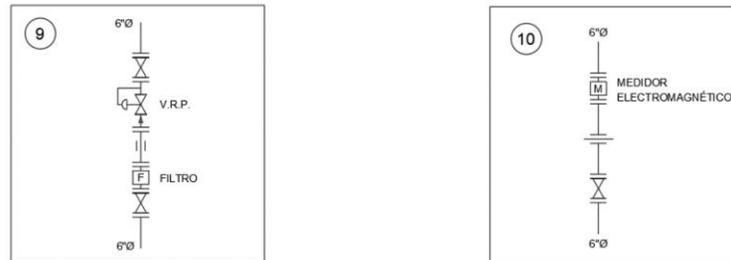


Figura 16. Crucero de válvula reductora de presión y crucero de medidor. Fuente: Planos de construcción del sector BJ-02, fuente interna SACMEX.

La red de estudio cuenta con cuatro medidores de presión, el primero de éstos se encuentra a la entrada del distrito hidrométrico, los tres siguientes se encuentran en distintos puntos a lo largo del sector.

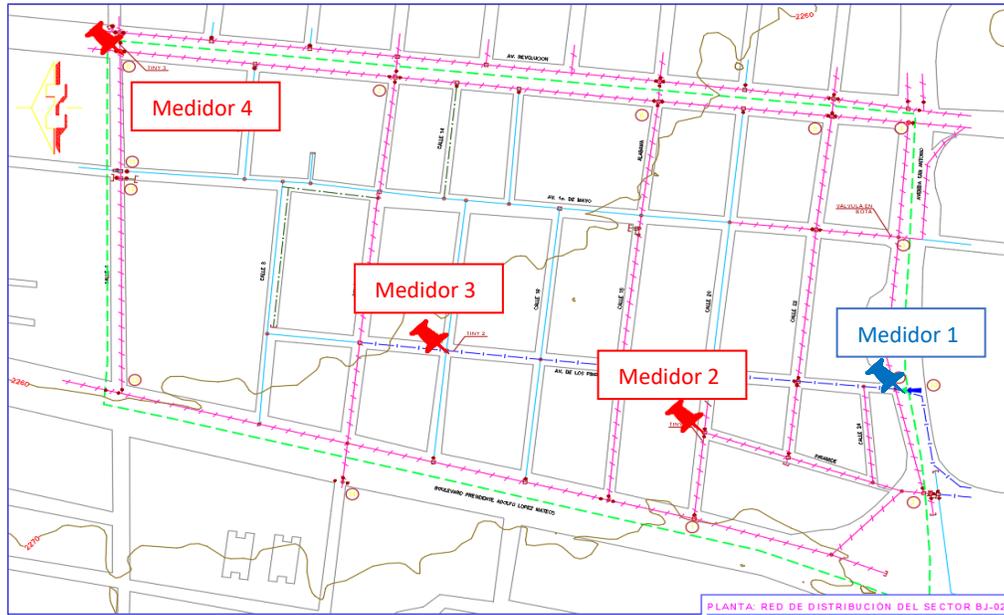


Figura 17. Medidores de presión en el sector BJ-02. Fuente: Fuente interna SACMEX.

A la entrada del sector se encuentra una válvula inteligente de la marca Oxford Flow, esta válvula proporciona un control automático de presión y flujo, y permite un monitoreo remoto de la operación de la válvula. La válvula reductora de presión tiene una consigna de 20.00 mca, es decir, la presión se reduce al valor fijo de 20 mca al entrar al sector.



Figura 18. Trabajos de instalación de válvula inteligente en el sector BJ-02. Fuente: SACMEX

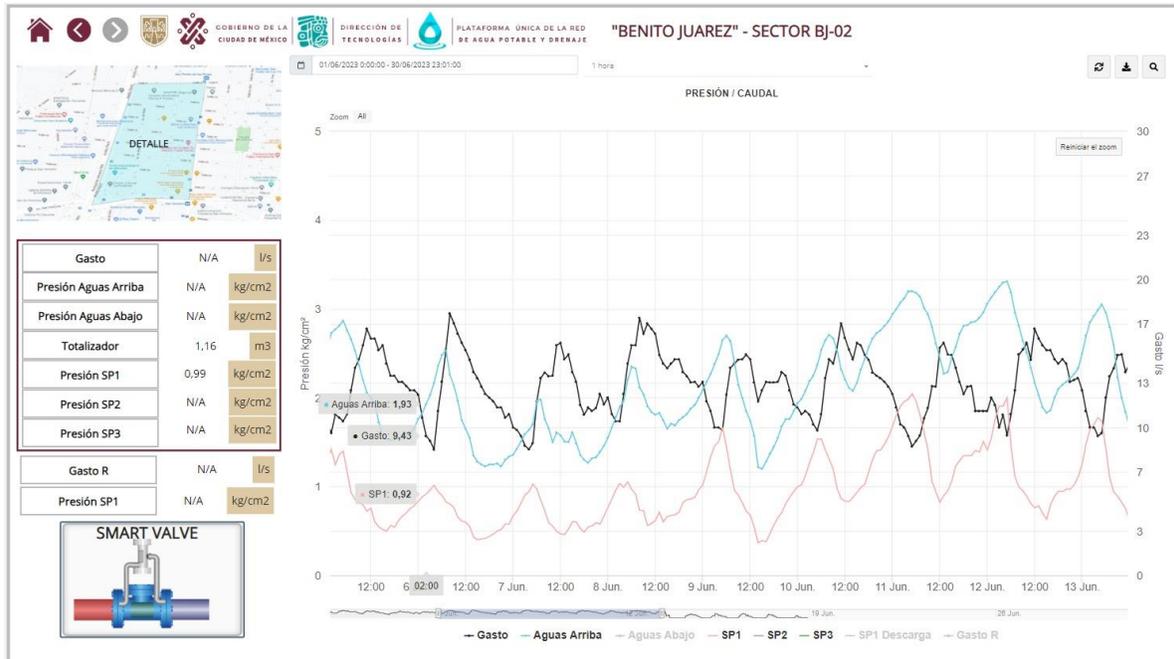


Figura 19. Plataforma digital para monitoreo de operación de sectores de la CDMX. Fuente: SACMEX

Aunado a lo descrito en el párrafo anterior, la válvula inteligente permite integrar en el monitoreo el sistema de calidad de agua MetriNet. Los sistemas MetriNet son sistemas modulares que consisten en un control y al menos un sensor de algún parámetro de calidad. En el caso de la válvula a la entrada del sector BJ-02 se cuenta con tres sensores: pH, turbiedad y cloro libre. El sensor de cloro libre consiste en un sensor amperométrico cubierto de una membrana, el sensor genera una pequeña corriente proporcional a la concentración de cloro de la muestra. El medidor de cloro tiene un rango entre 0 y 5 ppm y una resolución de 0.01 ppm (*O&M Manual, Metrinet Controller, n.d.*).

3.3. Características de los usuarios del sector BJ-02

El nivel socioeconómico de los usuarios se especificó a partir de considerar, como un indicador, el Índice de Desarrollo por manzana. De acuerdo con el Artículo Vigésimo Primero del Código Fiscal Vigente de la Ciudad de México, cada manzana de la ciudad tiene un Índice de Desarrollo, registrado de acuerdo con el número de región y número de manzana de la cuenta catastral (Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, n.d.). El Índice de Desarrollo es una construcción estadística que, mediante variables de tipo socioeconómico derivadas de información oficial, permite diferenciar territorialmente a la población de la Ciudad de México en función de su nivel de desarrollo económico. Las manzanas, en su conjunto, son clasificadas en cuatro índices: popular, bajo, medio y alto.

Región	Manzana	Índice de Desarrollo por Manzana
038	204	ALTO
038	205	MEDIO
038	207	MEDIO
038	208	MEDIO
038	209	ALTO
038	225	ALTO
038	226	MEDIO
038	227	MEDIO
038	229	BAJO
038	230	ALTO
038	239	ALTO
038	240	MEDIO
038	241	ALTO
038	243	BAJO
038	244	ALTO
038	245	ALTO
038	254	MEDIO
038	255	MEDIO
038	256	ALTO
038	262	ALTO
038	263	ALTO
038	264	ALTO
038	497	MEDIO
038	733	POPULAR

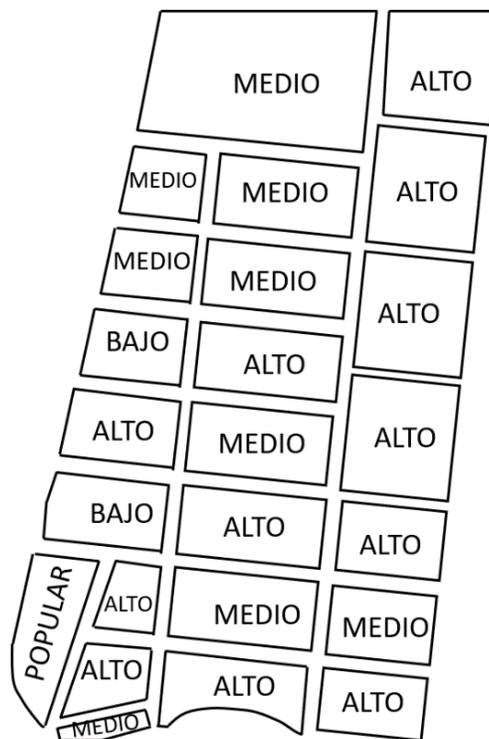


Figura 20. índice de Desarrollo por Manzana.

Dado que la mayoría de las manzanas del sector BJ-02 tienen un índice de desarrollo alto o medio, se puede considerar que los usuarios del sector son de clase socioeconómica media alta.

El clima en la zona de estudio es templado subhúmedo con lluvias en verano y humedad media. La temperatura media anual en la Ciudad de México es de 16°C. De acuerdo con la clasificación de climas por temperatura, la Ciudad de México corresponde a un clima templado y el consumo por habitante por día varía entre 100 y 250 litros de agua (Datos Básicos, 1994).

Para estimar los usuarios de tipo comercial, doméstico, industrial o de servicios públicos se realizaron recorridos en sitio y también virtuales, a través de Google Earth. De acuerdo con lo observado, los usuarios son mayoritariamente domésticos y su densidad poblacional varía dependiendo la zona del sector. Algunos usuarios corresponden a comercios y oficinas. Los comercios se concentran principalmente sobre las avenidas Revolución y San Antonio. El sector no abastece usuarios industriales. Adicionalmente, se cuenta con algunas áreas verdes, escuelas y clínicas de salud.

Para conocer con mayor exactitud la cantidad de usuarios y su ubicación dentro del sector se utilizaron sistemas de información catastral para conocer la cantidad de departamentos en edificios, ubicación de locales, y habitantes estimados por vivienda (Agencia Digital de Innovación Pública, 2022) (INEGI, 2022a) (INEGI, 2022b). La identificación de la cantidad y tipo de usuarios que se encuentran en el sector sirve para asignar una demanda base a cada nodo en el modelo hidráulico del sector. Aunado a esto, cada nodo debe tener su propio patrón de variación horaria del consumo de agua. Este patrón consiste en una serie de factores que aumentan o disminuyen la demanda base y busca representar qué tanto consumen agua los usuarios del sector en las distintas horas del día.

Dado que la mayoría de los usuarios del sector BJ-02 son domésticos y su consumo de agua depende del comportamiento humano, determinar el patrón de variación horaria de la demanda es complejo y muchas veces inexacto, especialmente a una escala tan pequeña como la del sector. No obstante, es un requisito para la modelación. Para generar el patrón se toman en consideración valores de gasto históricos registrados por el medidor a la entrada del sector, la ubicación y el tipo de usuarios que abastecen cada tramo de tubería.

4. Elaboración del modelo hidráulico

Para la determinación de las constantes cinéticas de decaimiento del cloro se requiere conocer el tiempo de permanencia del agua en la red de distribución. La presente investigación hace uso de un modelo computacional que simula el comportamiento hidráulico del sector BJ-02 y permite conocer el tiempo de retención hidráulico.

El organismo operador de la Ciudad de México, SACMEX, proporcionó para esta investigación un modelo hidráulico del sector desarrollado en EPANET. El modelo fue elaborado antes del seccionamiento de la red de distribución, por lo tanto, algunas características físicas de la red y en la calibración de fugas difieren de la red actual. Aunado a esto, todos los nodos del modelo consideran la misma demanda de agua. Dado que el modelo hidráulico proporcionado tiene características que difieren de la red actual para los objetivos de la tesis, se realizaron una serie de modificaciones para refinar el modelo. El modelo original proporcionado por el organismo operador se consideró entonces como un modelo hidráulico preliminar.

Las modificaciones de las características físicas de la red se realizaron con base en planos de construcción proporcionados por el organismo operador SACMEX. La demanda base se calculó y asignó a los nodos a partir de datos estandarizados de consumo y criterio propio, y la identificación de la cantidad y tipo de usuarios en cada tramo del sector.

El patrón de demanda se estimó y calibró a partir de registros históricos de caudal de entrada al sector BJ-02 entre 2021 y 2022, y de aplicación de criterio propio. Cada tramo de tubería realmente tiene patrones de consumo variables. Sin embargo, asignar un patrón de demanda representativo para cada nodo es demasiado complejo y poco práctico. Para simplificar el análisis, se generaron sólo dos patrones de demanda: uno representativo para los usuarios no domésticos y otro para los usuarios domésticos.

Las fugas en la zona de estudio disminuyeron de 13 LPS a 6 LPS desde la delimitación del sector, por lo tanto, se calibró el coeficiente emisor para representar este gasto en fugas (Carmona Paredes, 2020).

4.1. Diámetros y conexiones

Las modificaciones a las características físicas del modelo de la red en EPANET fueron realizadas a partir de los planos de construcción del sector. El modelo hidráulico preliminar tiene algunos tramos de tubería con diámetros diferentes a los que se encuentran en el sector actual (Figura 22), y tiene un nodo que no interconecta tres tramos de tubería, sino que actúa como un nodo sin interconexiones (Figura 23).

Para facilidad de lectura, se cambió el nombre de los nodos de la red en EPANET (Figura 21).

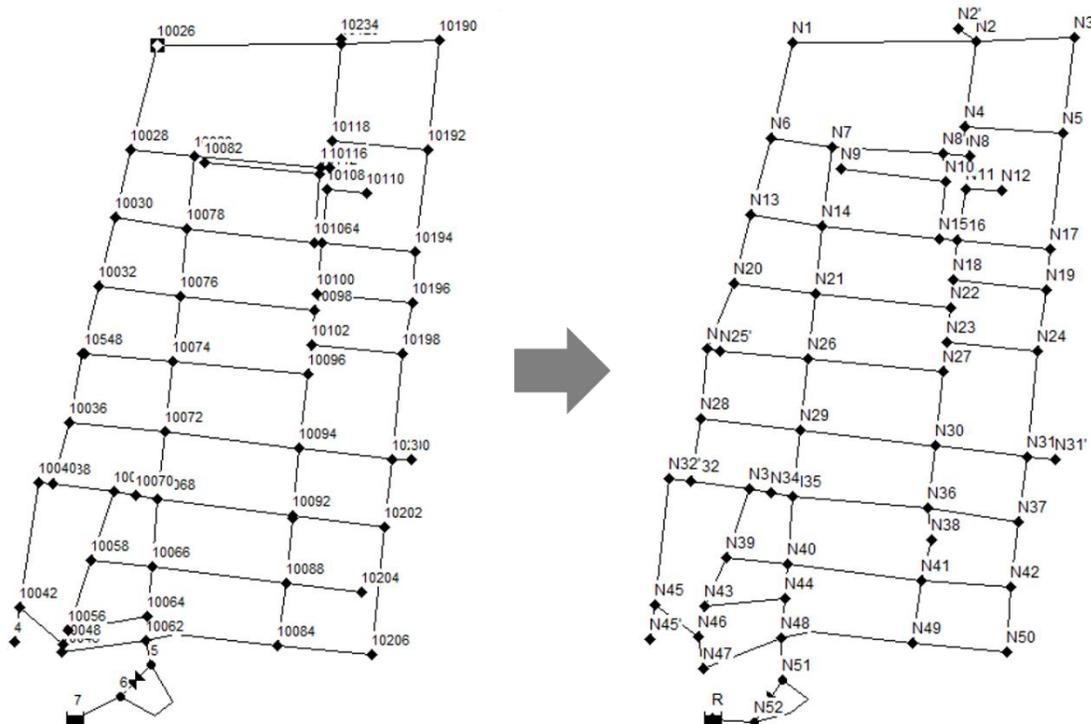


Figura 21. Modificación de identificadores de nodos. Lado izquierdo: supuesto por SACMEX; lado derecho: real. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los planos de construcción, los tramos de tubería N48-N44, N44-N40, N40-N35, N35-N29, N29-N26, N26-N21 y N21-N24 tienen un diámetro de tubería de 304.8 milímetros. Y el nodo N42 debe estar conectado a los nodos N37, N41 y N50.

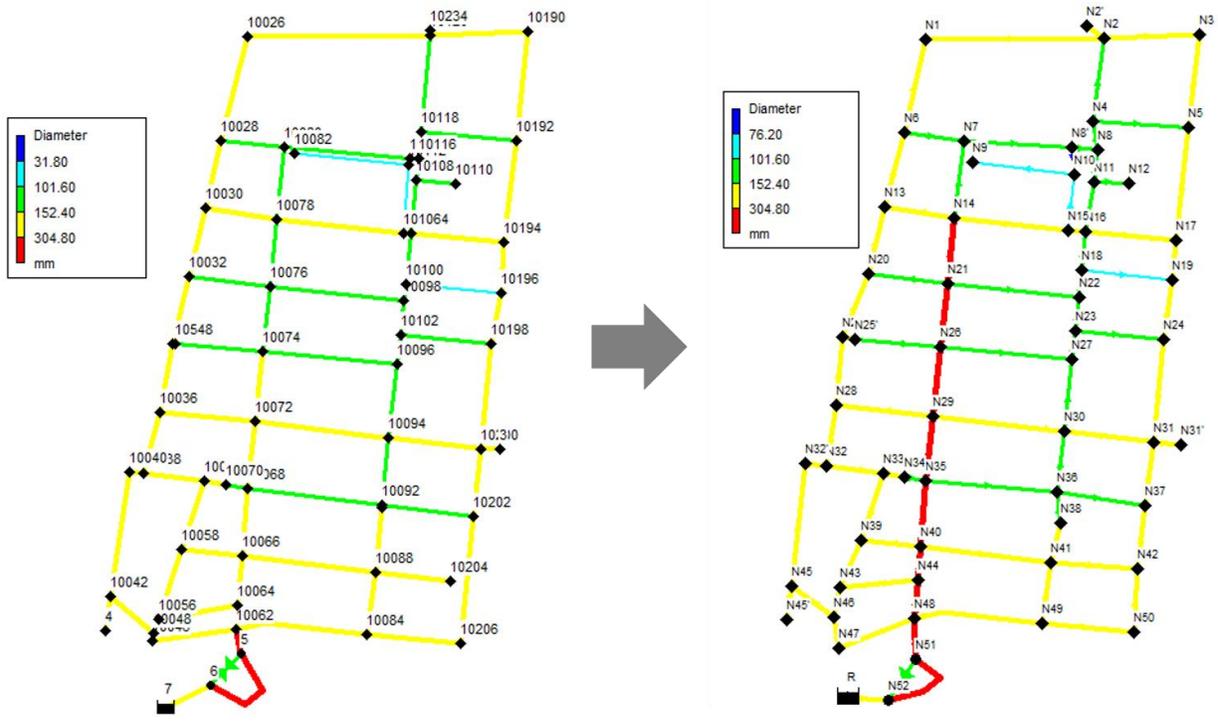


Figura 22. Modificación de diámetros. Lado izquierdo: supuesto por SACMEX; lado derecho: real. Fuente: Elaboración propia.

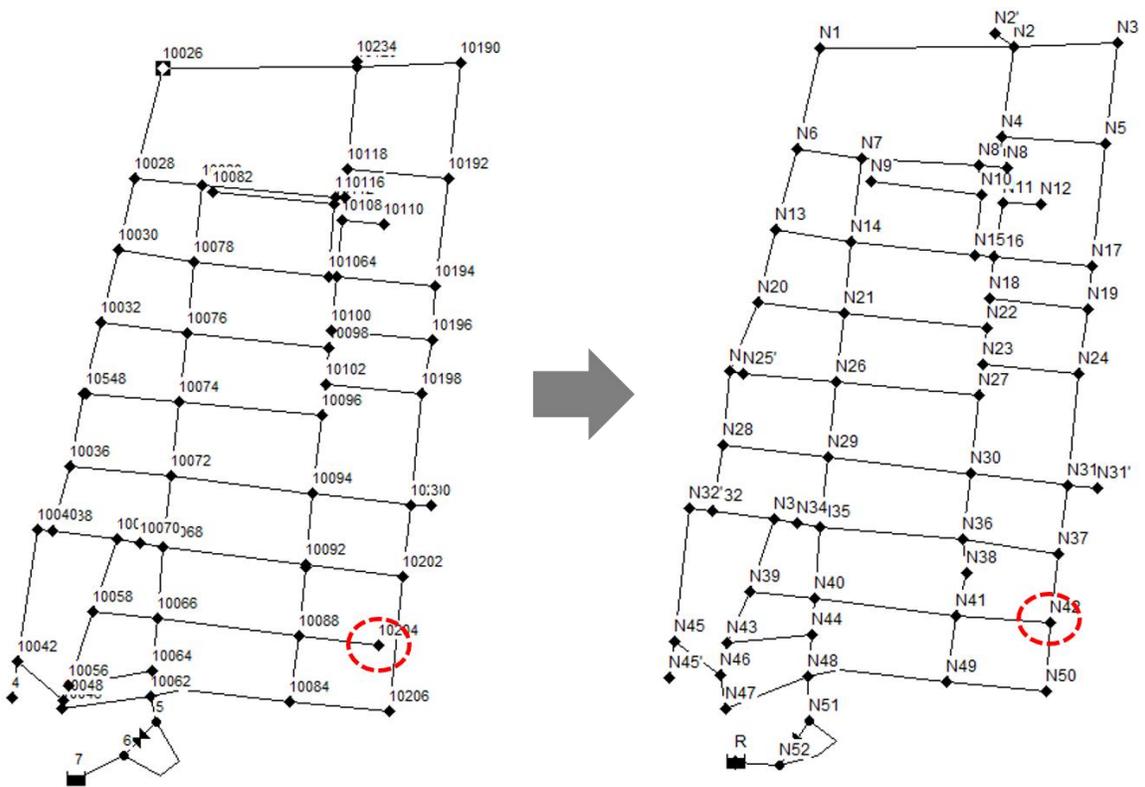


Figura 23. Modificación de conexiones. Lado izquierdo: supuesto por SACMEX; lado derecho: real. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Demanda base

El modelo hidráulico preliminar considera la misma demanda base para todos los nodos. Sin embargo, los usuarios se encuentran ubicados en diferentes concentraciones dentro del sector, por lo tanto, es evidente que existe un diferente consumo de agua en cada nodo. La demanda base de los nodos se asigna en función de la cantidad y tipo de usuarios que abastece cada tramo de la red.

Para asignar la demanda que le corresponde a cada nodo de la red se utilizó el siguiente criterio:

1. La demanda de un tramo de tubería se asigna a un solo nodo de la red.
2. La demanda de un tramo se obtiene sumando el consumo de cada usuario sobre ambos lados del tramo de tubería.
3. La demanda se suma en litros por día.
4. La asignación de demandas sigue la siguiente ruta en el sector:

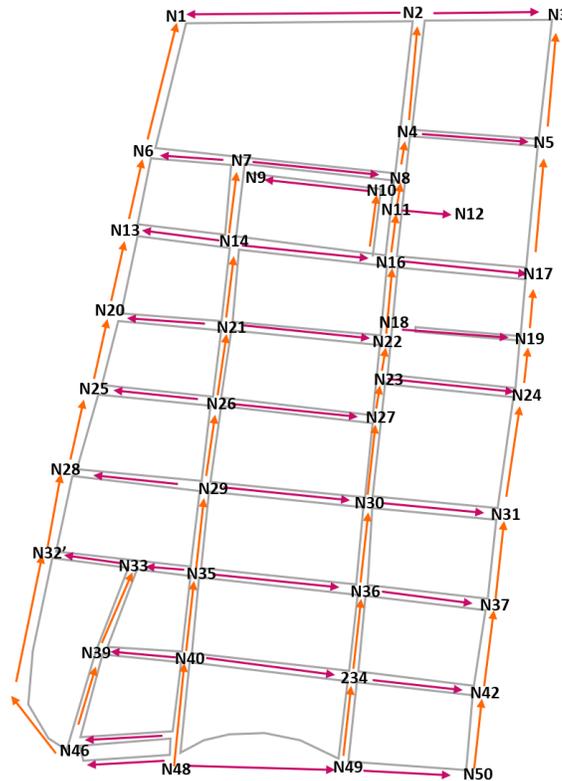


Figura 24. Ruta de la asignación de demandas a nodos de la red del sector BJ-02.

Para inferir de manera más precisa la ubicación del tipo de consumidores, se llevaron a cabo recorridos virtuales mediante la herramienta Google Earth y recorridos en sitio, esto para visualizar el exterior de las fachadas en la zona de estudio. La cantidad de hogares se obtuvo con base en un sistema de información geográfica catastral (Agencia Digital de Innovación Pública, 2022). La cantidad de usuarios domésticos se obtuvo de acuerdo con el número promedio de ocupantes por vivienda registrado por el INEGI (INEGI, 2022b).

La cantidad y tipo de usuarios no domésticos, como oficinas y comercios, se estimó a partir de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2022a) y lo recopilado durante los recorridos.

Los datos de consumo para cada tipo de usuario del sector se asignaron a partir de diferentes fuentes.

Tabla 2. Datos de consumo para usuarios del sector. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Cantidad	Unidad	Fuente	Observaciones
Doméstico	153	L/hab/día	PIGOO, 2022	Consumo promedio entre 2002 y 2017, de acuerdo con el Programa de Indicadores de Gestión de los Organismos Operadores.
Oficinas	10	L/m2/día	SIAPA, 2014	Criterios Básicos de Diseño, Lineamientos Técnicos de Factibilidades.
Locales comerciales	10	L/m2/día	SIAPA, 2014	Criterios Básicos de Diseño, Lineamientos Técnicos de Factibilidades.
Clínicas y centros de salud	10	L/m2/día	Estimación propia	Falta de información para estimar consumo indicadores disponibles. Debido a las características observables en la clínica del sector, se considera la demanda igual a la de oficinas.
Hotel	1000	L/cuarto/día	Datos Básicos. CONAGUA, 1994	Consumo para un hotel en zona urbana de 4-5 estrellas.
Escuela elemental	20	L/alumno/turno	Datos Básicos. CONAGUA, 1994	
Escuela media superior	25	L/alumno/turno	Datos Básicos. CONAGUA, 1994	
Lavanderías	1972	L/lavadora/día	PROFECO, 2019	Estudio de calidad de lavadoras automáticas. Se estima para una lavadora estándar: ciclo de lavado de 1.17 hrs, 130 L por ciclo, uso constante durante jornada de 13 hrs.
Autolavado	40	L/auto	Consumo consultado en sitio, 2022	Alta variabilidad del consumo. Se estima un consumo representativo de 40 L/auto, 15 autos/día.

Tabla 3. Datos cuantitativos del consumo diario de agua en el sector. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Habitantes	Oficinas (m2)	Locales comerciales (m2)	Clínicas y centros de salud (m2)	Hotel (cuartos)	Escuela elemental (alumnos)	Escuela media y superior (alumnos)	Lavandería (lavadoras)	Autolavado (autos)
N1	0						1322		
N2	144	407	30						
N2'	0								
N3	2	14000	20						
N4	50		20	1500					
N5	139	322	451						
N6	110		50						
N7	33								
N8'	0								
N8	22								
N9	69								
N10	82		160						
N11	12								
N12	21								
N13	81		473						15
N14	26							3	
N15	88	2490	230			10			
N16	52		200						
N17	254	351	735						

Nodo	Habitantes	Oficinas (m2)	Locales comerciales (m2)	Clinicas y centros de salud (m2)	Hotel (cuartos)	Escuela elemental (alumnos)	Escuela media y superior (alumnos)	Lavandería (lavadoras)	Autolavado (autos)
N18	87								
N19	48		100						
N20	53	470	400						
N21	89								
N22	154								
N23	5		240						
N24	133	580	100		97				
N25	110		250						
N25'									
N26	17		100						
N27	332		25					1	
N28	167	540	30						
N29	8								
N30	271								
N31	140		120						
N31'	0								
N32'	47		500						
N32	0								
N33	188								
N34	0								
N35	37								
N36	354		30						
N37	79		450						
N38	0								
N39	33					62			
N40	11		50						
N41	234	232							
N42	90	5282	150						
N43	0								
N44	0								
N45	0								
N45'	0								
N46	70		340						
N47	0								
N48	0								
N49	102		280						
N50	0		380						
N51	0								

A continuación, se presenta el resumen de demandas que le corresponde a cada nodo del sector. Debido a que las demandas serán afectadas por un patrón de demanda doméstica y un patrón de demanda no doméstica, el resumen de demandas separa la aportación de ambas. La demanda no doméstica abarca el consumo de agua de oficinas, locales comerciales, centros de salud, escuelas, lavanderías y autolavados; la demanda doméstica abarca el consumo de hogares y hoteles; y la demanda base resultante de la suma de éstas dos. Cabe mencionar que los hoteles se consideran como demanda doméstica porque se asume que tienen un patrón de demanda similar al doméstico.

Tabla 4. Resumen de demandas de la red del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Demanda doméstica (L/día)	Demanda no doméstica (L/día)	Demanda base (LPS)
N1	0	33050	0.3825
N2	22032	4370	0.3056
N2'	0	0	0.0000
N3	306	140200	1.6262
N4	7650	15200	0.2645
N5	21267	7730	0.3356
N6	16830	500	0.2006
N7	5049	0	0.0584
N8'	0	0	0.0000
N8	3366	0	0.0390
N9	10557	0	0.1222
N10	12546	1600	0.1637
N11	1836	0	0.0213
N12	3213	0	0.0372
N13	12393	5330	0.2051
N14	3978	5915	0.1145
N15	13464	27400	0.4730
N16	7956	2000	0.1152
N17	38862	10860	0.5755
N18	13311	0	0.1541
N19	7344	1000	0.0966
N20	8109	8700	0.1945
N21	13617	0	0.1576
N22	23562	0	0.2727
N23	765	2400	0.0366
N24	117349	103800	2.5596
N25	16830	2500	0.2237
N25'	0	0	0.0000
N26	2601	1000	0.0417
N27	50796	2222	0.6136
N28	25551	5700	0.3617
N29	1224	0	0.0142
N30	41463	0	0.4799
N31	21420	1200	0.2618
N31'	0	0	0.0000
N32'	7191	5000	0.1411
N32	0	0	0.0000
N33	28764	0	0.3329
N34	0	0	0.0000
N35	5661	0	0.0655
N36	54162	300	0.6303
N37	12087	4500	0.1920
N38	0	0	0.0000
N39	5049	1240	0.0728
N40	1683	500	0.0253
N41	35802	2320	0.4412
N42	13770	54320	0.7881
N43	0	0	0.0000
N44	0	0	0.0000
N45	0	0	0.0000
N45'	0	0	0.0000
N46	10710	3400	0.1633
N47	0	0	0.0000
N48	0	0	0.0000
N49	15606	2800	0.2130
N50	0	3800	0.0440

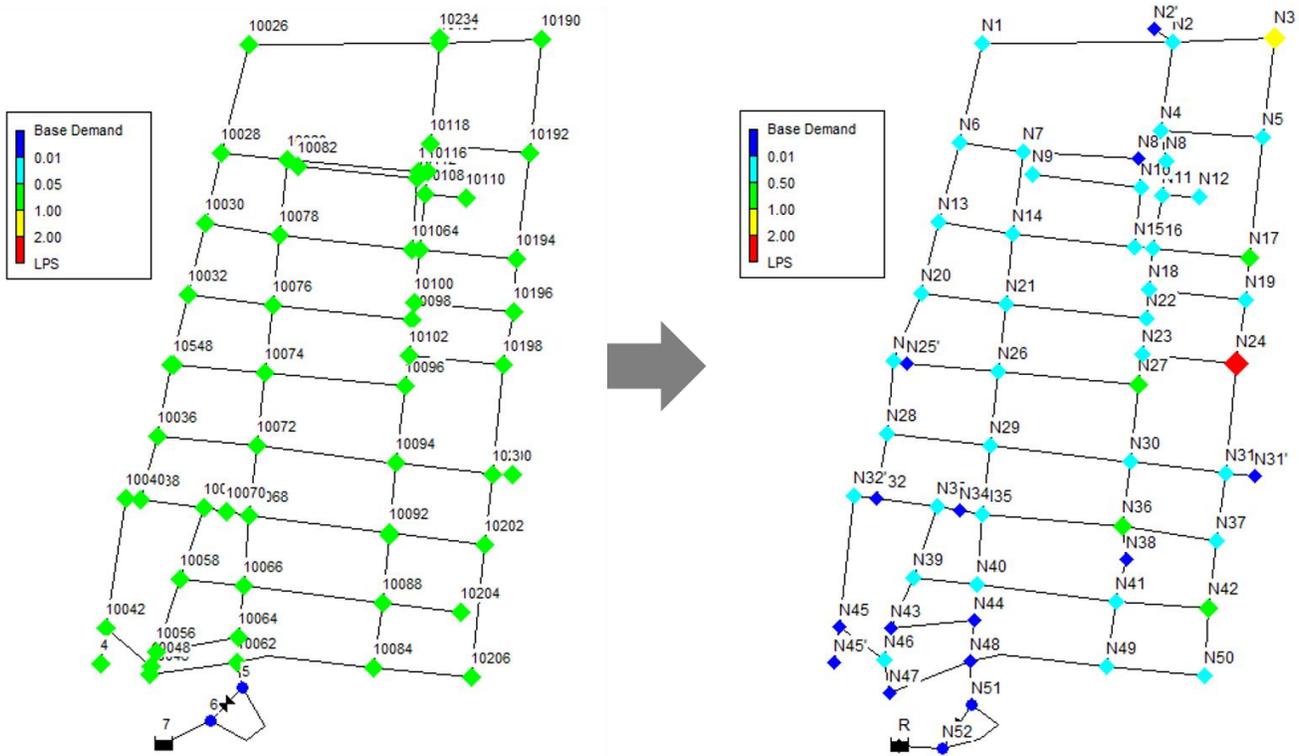


Figura 25. Modificación de demanda base asignada a nodos. Lado izquierdo: supuesto por SACMEX; lado derecho: real. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Patrón de demanda

El patrón de demanda es una serie de factores horarios que multiplican la demanda base de un nodo de la red del modelo hidráulico y con ello simular la variación horaria del consumo. Esta variación es imposible de predecir con certeza, ya que depende del comportamiento humano, no obstante, se puede aproximar. Estrictamente, cada nodo tiene un diferente patrón de demanda, sin embargo, por simplicidad, sólo se desarrollaron dos patrones de demanda:

- Patrón de demanda de los usuarios **domésticos**. Debido a que el sector es habitado por una mayoría significativa de usuarios domésticos, se considera que la variación del gasto a la entrada de la red que abastece todo el sector es representativa para los usuarios domésticos. Se desarrolló este patrón a partir de una muestra de los datos históricos de caudal registrados por el medidor a la entrada del sector BJ-02.
- Patrón de demanda de los usuarios **no domésticos**. Los usuarios no domésticos abarcan comercios, oficinas, escuelas y centros de salud. Este patrón supone un consumo constante durante un horario fijo de operación, en este caso, se generaliza una jornada laboral de las 8:00 a las 20:00 horas.

4.3.1. Procedimiento para generación del patrón de demanda doméstica

1. Se recopiló de una muestra de valores de gasto de entrada al sector entre el 17 de julio y el 16 de agosto de 2021 y 2022.
2. Sólo se tomaron en cuenta los registros de lunes a viernes, esto por considerarse los días con la variación horaria más marcada y recurrente.
3. Se promediaron los gastos por hora para un día promedio para el año 2021 y para el año 2022.
4. En 2020, se publicó que el gasto correspondiente a fugas en el sector BJ-02 es de 6 LPS, por lo tanto, este gasto se restó del caudal de entrada (Carmona Paredes, 2020).
5. Se promediaron los gastos de 2021 y 2022. Cabe mencionar que la variación es muy similar entre ambos años.
6. Los factores del patrón de demanda doméstico se obtuvieron al dividir cada valor de gasto entre el gasto promedio total.

Tabla 5. Patrón de demanda doméstica y no doméstica del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo	Gasto promedio	Patrón de demanda doméstica	Patrón de demanda no doméstica
Horas	LPS		
0	5.40	0.756	0
1	4.58	0.641	0
2	3.63	0.508	0
3	3.34	0.468	0
4	2.51	0.351	0
5	2.47	0.346	0
6	2.61	0.365	0
7	4.02	0.563	0
8	6.25	0.876	1
9	8.13	1.139	1
10	10.07	1.411	1
11	11.24	1.575	1
12	11.58	1.622	1
13	10.36	1.452	1
14	10.57	1.481	1
15	10.11	1.416	1
16	9.05	1.267	1
17	8.63	1.209	1
18	8.52	1.194	1
19	8.57	1.200	1
20	8.01	1.122	0
21	7.52	1.053	0
22	6.22	0.872	0
23	6.20	0.869	0

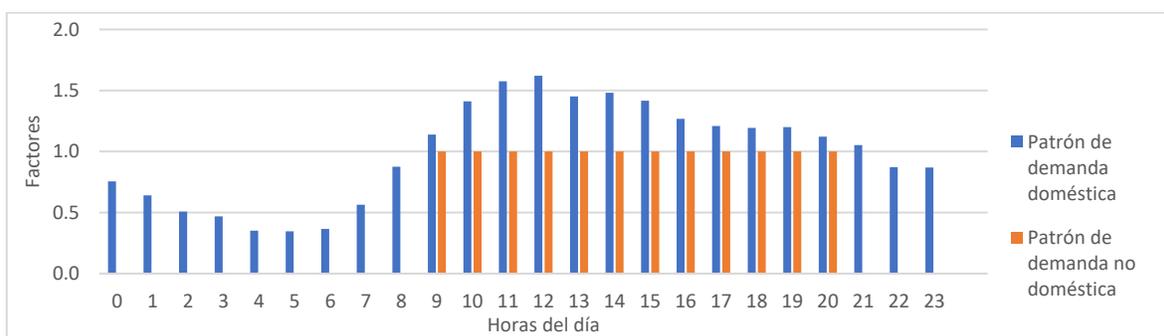


Figura 26. Patrones de demanda para representar consumo doméstico y no doméstico en la red del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Los tramos de tubería en el sector no abastecen sólo usuarios domésticos o no domésticos, sino una combinación de ambos. EPANET no permite considerar más de un patrón de demanda por nodo, por lo tanto, para considerar esta aportación de ambos usuarios, se calculó el porcentaje de aportación de ambos tipos de demanda a la demanda base de cada nodo. Los nodos cuya demanda doméstica es mayor al 50% de la demanda base se asignan con demanda doméstica predominante y viceversa.

Adicionalmente, se calcula el promedio del porcentaje de aportación cuando la demanda doméstica es predominante y cuando lo es la demanda no doméstica.

Tabla 6. Porcentaje de aportación de demandas a la demanda total del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Demanda doméstica (L/día)	Demanda no doméstica (L/día)	% Demanda doméstica	% Demanda no doméstica	Demanda predominante
N1	0	33050	0.00	1.00	no doméstica
N2	22032	4370	0.83	0.17	doméstica
N2'	0	0			
N3	306	140200	0.00	1.00	no doméstica
N4	7650	15200	0.33	0.67	no doméstica
N5	21267	7730	0.73	0.27	doméstica
N6	16830	500	0.97	0.03	doméstica
N7	5049	0	1.00	0.00	doméstica
N8'	0	0			
N8	3366	0	1.00	0.00	doméstica
N9	10557	0	1.00	0.00	doméstica
N10	12546	1600	0.89	0.11	doméstica
N11	1836	0	1.00	0.00	doméstica
N12	3213	0	1.00	0.00	doméstica
N13	12393	5330	0.70	0.30	doméstica
N14	3978	5915	0.40	0.60	no doméstica
N15	13464	27400	0.33	0.67	no doméstica
N16	7956	2000	0.80	0.20	doméstica
N17	38862	10860	0.78	0.22	doméstica
N18	13311	0	1.00	0.00	doméstica
N19	7344	1000	0.88	0.12	doméstica
N20	8109	8700	0.48	0.52	no doméstica
N21	13617	0	1.00	0.00	doméstica
N22	23562	0	1.00	0.00	doméstica

Tabla 7. Patrones de demanda Dom y NoDom del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Horas	Patrón Dom	Patrón No Dom
	88% Demanda Doméstica + 12% Demanda No Doméstica	22% Demanda Doméstica + 78% Demanda No Doméstica
0	0.665	0.166
1	0.564	0.141
2	0.447	0.112
3	0.412	0.103
4	0.309	0.077
5	0.305	0.076
6	0.322	0.080
7	0.496	0.124
8	0.891	0.973
9	1.122	1.030
10	1.361	1.090
11	1.506	1.127
12	1.547	1.137
13	1.398	1.099
14	1.424	1.106
15	1.366	1.091
16	1.235	1.059
17	1.184	1.046
18	1.170	1.043
19	1.176	1.044
20	0.987	0.247
21	0.927	0.232
22	0.767	0.192
23	0.765	0.191

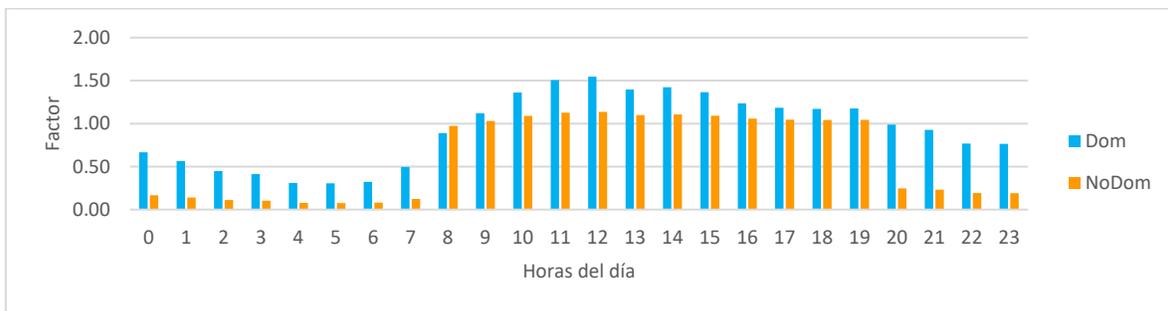


Figura 27. Patrones de demanda Dom y NoDom del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

A cada nodo del modelo hidráulico en EPANET se le asigna el patrón Dom o NoDom, dependiendo de su respectiva demanda predominante.

4.4. Fugas

En 2020, el Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores registra una eficiencia física del 47% para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la eficiencia física, en este caso, es el volumen de agua consumido entre el volumen de agua producido (IMTA, 2022). El modelo hidráulico preliminar de EPANET y los planos de construcción consideran aproximadamente un 50% de pérdidas físicas en las tuberías del sector BJ-02. Sin embargo, desde la construcción del sector, ha existido una reducción de fugas. De acuerdo con un artículo publicado por el Colegio de Ingenieros Civiles de México en 2020, se estima una reducción de fugas de 13 LPS a 6 LPS en el sector BJ-02 (Carmona Paredes, 2020). Por lo tanto, se ha calibrado un nuevo coeficiente emisor para representar las fugas.

En la realidad, las fugas dependen de múltiples factores como las dimensiones de la fuga, la presión en la tubería y el material de esta. El programa EPANET simplifica estos factores y calcula el gasto por fugas en función de la presión, un coeficiente emisor y un exponente emisor, siendo la presión el único valor variable durante el análisis. El exponente emisor depende del material y la presión depende del comportamiento hidráulico del modelo. El coeficiente emisor, por otro lado, debe ajustarse hasta que el gasto por fugas se aproxime lo más posible al deseado (Rossman, 2000).

$$Q_{fugas} = C * P^N$$

Donde

Q_{fugas}	gasto por fugas
C	coeficiente emisor
P	presión en el nodo
N	exponente emisor

Por simplicidad y dado que la presión es muy similar entre los nodos, se optará por obtener un solo coeficiente emisor con la presión promedio de cada nodo y asignarlo a todos los nodos del sector. N representa un exponente emisor dependiente al material, en este caso, se asigna igual a 1 (Rossman, 2000).

Tabla 8. Calibración de coeficiente emisor.

Coeficiente emisor	Presión promedio en cada nodo	Número de nodos	Gasto fugas (LPS)
0.00643	23.16	56	8.33
0.00463	23.16	56	6.00

El coeficiente de emisión que mejor se ajusta a un gasto de 6 LPS por fugas tiene un valor de 0.00463, éste se asignó a todos los nodos de la red de EPANET.

4.5. Calibración y validación del modelo hidráulico

La calibración es el proceso en el que se realizan ajustes en los parámetros del modelo para conseguir que el modelo reproduzca las mediciones observadas a un grado razonable de precisión. Cabe mencionar que no es posible que un modelo de este tipo sea capaz de representar el funcionamiento de la red al 100 por ciento debido a simplificaciones de la red, y limitaciones propias del modelo matemático. El Libro 13 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la CONAGUA enfocado en la modelación hidráulica y de calidad establece que no se podrá pasar a un ajuste fino del modelo hasta que sus resultados comparados con las mediciones en la red de distribución no tengan una diferencia menor al 20% de error (CONAGUA, 2019b). Sin embargo, cabe resaltar que la red de estudio sólo cuenta con un medidor de caudal a la entrada del sector y medidores domésticos, no cuenta con medidores de caudal intermedios. Los medidores domésticos no proveen de datos en tiempo real por lo que no son una fuente de información viable para calibrar el modelo (Lechevallier et al., 2011). Dado que el medidor a la entrada del sector es la única fuente de información, la calibración está limitada.

Para evaluar qué tanto se apega el modelo al comportamiento hidráulico del sector, se compara el gasto obtenido por el modelo con el gasto real medido a la entrada del sector. El gasto real corresponde con el promedio de los gastos medidos a la entrada del sector entre el 17 de julio y el 16 de agosto de 2021 y 2022.

Tabla 9. Evaluación del modelo hidráulico mediante comparación de gastos. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo	Gasto a la entrada del sector		Error
	Real	Modelo	
Horas	LPS	LPS	%
0:00	11.40	12.93	13.44%
1:00	10.58	11.88	12.33%
2:00	9.63	10.66	10.74%
3:00	9.34	10.3	10.23%
4:00	8.51	9.23	8.50%
5:00	8.47	9.18	8.36%
6:00	8.61	9.36	8.72%
7:00	10.02	11.17	11.45%
8:00	12.25	18.49	50.93%
9:00	14.13	20.89	47.86%
10:00	16.07	23.38	45.49%
11:00	17.24	24.88	44.29%
12:00	17.58	25.31	44.01%
13:00	16.36	23.76	45.19%
14:00	16.57	24.02	44.93%
15:00	16.11	23.42	45.41%
16:00	15.05	22.07	46.68%
17:00	14.63	21.54	47.21%
18:00	14.52	21.39	47.31%
19:00	14.57	21.45	47.24%
20:00	14.01	16.28	16.22%
21:00	13.52	15.65	15.78%
22:00	12.22	13.99	14.47%
23:00	12.20	13.96	14.41%

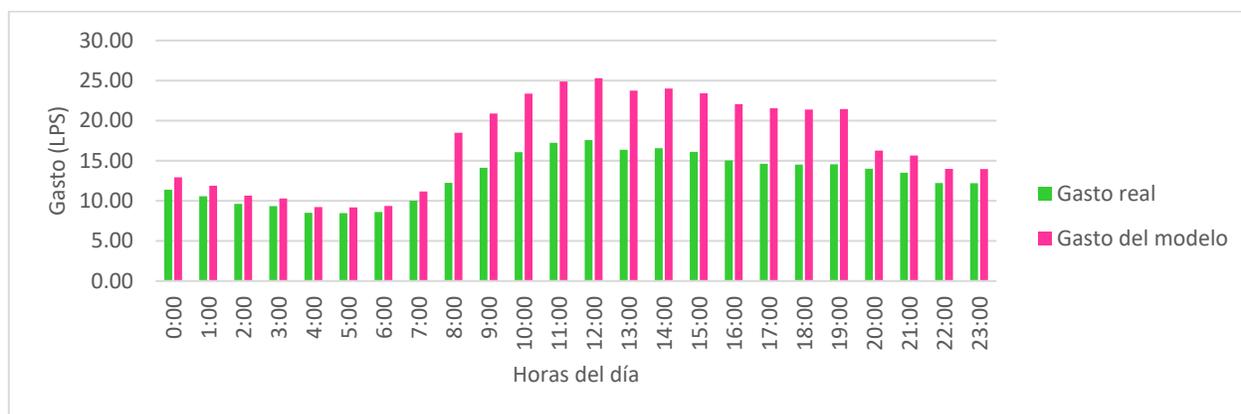


Figura 28. Evaluación del modelo hidráulico mediante comparación de gastos. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia una diferencia significativa entre las 8:00 y las 20:00 horas. El error, calculado respecto a los valores reales, es superior al 40% en este horario. Se concluye que esta diferencia se debe a una sobreestimación de la demanda de usuarios no domésticos, y se opta por reducir el consumo no doméstico hasta contar con un error inferior al 20% entre los valores reales y los valores del modelo para cada hora.

La calibración redujo el 65% de la demanda no doméstica. A continuación, se presentan las tablas y gráficos correspondientes a la nueva demanda base y los nuevos patrones de demanda.

Tabla 10. Calibración de demanda base de la red del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Demanda doméstica (L/día)	Demanda no doméstica (L/día)	Aportación de demanda doméstica	Aportación de demanda no doméstica	Demanda predominante	Demanda base (LPS)
N1	0	11567.5	0.00	1.00	no doméstica	0.134
N2	22032	1529.5	0.94	0.06	doméstica	0.273
N2'	0	0				0.000
N3	306	49070	0.01	0.99	no doméstica	0.571
N4	7650	5320	0.59	0.41	doméstica	0.150
N5	21267	2705.5	0.89	0.11	doméstica	0.277
N6	16830	175	0.99	0.01	doméstica	0.197
N7	5049	0	1.00	0.00	doméstica	0.058
N8'	0	0				0.000
N8	3366	0	1.00	0.00	doméstica	0.039
N9	10557	0	1.00	0.00	doméstica	0.122
N10	12546	560	0.96	0.04	doméstica	0.152
N11	1836	0	1.00	0.00	doméstica	0.021
N12	3213	0	1.00	0.00	doméstica	0.037
N13	12393	1865.5	0.87	0.13	doméstica	0.165
N14	3978	2070	0.66	0.34	doméstica	0.070
N15	13464	9590	0.58	0.42	doméstica	0.267
N16	7956	700	0.92	0.08	doméstica	0.100
N17	38862	3801	0.91	0.09	doméstica	0.494
N18	13311	0	1.00	0.00	doméstica	0.154
N19	7344	350	0.95	0.05	doméstica	0.089
N20	8109	3045	0.73	0.27	doméstica	0.129

Nodo	Demanda doméstica (L/día)	Demanda no doméstica (L/día)	Aportación de demanda doméstica	Aportación de demanda no doméstica	Demanda predominante	Demanda base (LPS)
N21	13617	0	1.00	0.00	doméstica	0.158
N22	23562	0	1.00	0.00	doméstica	0.273
N23	765	840	0.48	0.52	no doméstica	0.019
N24	54299	36330	0.60	0.40	doméstica	1.049
N25	16830	875	0.95	0.05	doméstica	0.205
N25'	0	0				0.000
N26	2601	350	0.88	0.12	doméstica	0.034
N27	50796	876	0.98	0.02	doméstica	0.598
N28	25551	1995	0.93	0.07	doméstica	0.319
N29	1224	0	1.00	0.00	doméstica	0.014
N30	41463	0	1.00	0.00	doméstica	0.480
N31	21420	420	0.98	0.02	doméstica	0.253
N31'	0	0				0.000
N32'	7191	1750	0.80	0.20	doméstica	0.103
N32	0	0				0.000
N33	28764	0	1.00	0.00	doméstica	0.333
N34	0	0				0.000
N35	5661	0	1.00	0.00	doméstica	0.066
N36	54162	120	1.00	0.00	doméstica	0.628
N37	12087	1800	0.87	0.13	doméstica	0.161
N38	0	0				0.000
N39	5049	496	0.91	0.09	doméstica	0.064
N40	1683	200	0.89	0.11	doméstica	0.022
N41	35802	928	0.97	0.03	doméstica	0.425
N42	13770	21728	0.39	0.61	no doméstica	0.411
N43	0	0				0.000
N44	0	0				0.000
N45	0	0				0.000
N45'	0	0				0.000
N46	10710	1360	0.89	0.11	doméstica	0.140
N47	0	0				0.000
N48	0	0				0.000
N49	15606	1120	0.93	0.07	doméstica	0.194
N50	0	1520	0.00	1.00	no doméstica	0.018
N51	0	0				0.000
Doméstica predominante			0.91	0.09		
No doméstica predominante			0.22	0.78		

Tabla 11. Calibración de patrones de demanda Dom y NoDom del sector BJ-02. Fuente: Elaboración propia.

Horas	Patrón Dom	Patrón No Dom
	88% Demanda Doméstica + 12% Demanda No Doméstica	22% Demanda Doméstica + 78% Demanda No Doméstica
0	0.688	0.166
1	0.583	0.141
2	0.462	0.112
3	0.426	0.103
4	0.320	0.077
5	0.315	0.076
6	0.333	0.080
7	0.513	0.124
8	0.887	0.973
9	1.126	1.030
10	1.374	1.090
11	1.523	1.127
12	1.566	1.137
13	1.411	1.099
14	1.438	1.106
15	1.378	1.091
16	1.243	1.059
17	1.190	1.046
18	1.176	1.043
19	1.182	1.044
20	1.021	0.247
21	0.958	0.232
22	0.793	0.192
23	0.791	0.191

Tabla 12. Patrones de demanda Dom y NoDom calibrados. Fuente: Elaboración propia.

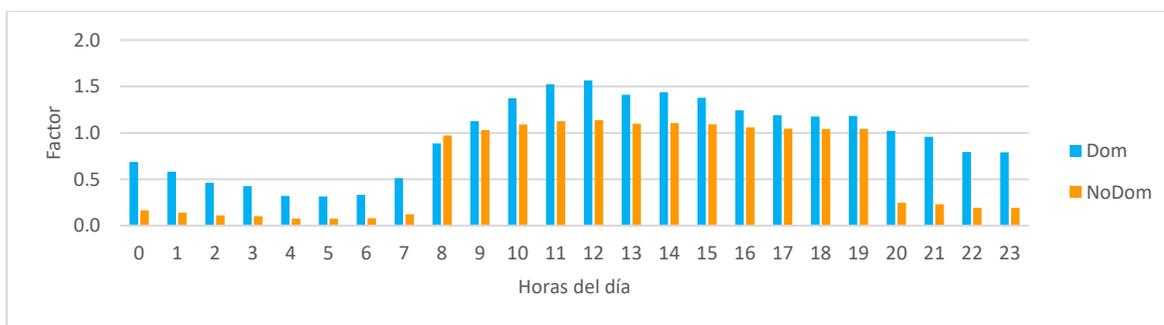


Figura 29. Patrón de demanda Dom y No Dom calibrados. Fuente: Elaboración propia.

Después de la calibración del modelo hidráulico, el error entre el gasto real y el gasto del modelo no sobrepasa el 20%. Tomando en cuenta las limitaciones y simplificaciones del modelo se opta por detener la calibración y se determina como válido el modelo hidráulico en EPANET para el sector BJ-02.

Tabla 13. Validación del modelo hidráulico mediante comparación de gastos. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo	Gasto a la entrada del sector		Error
	Real	Modelo	
Horas	LPS	LPS	%
0:00	11.40	11.92	4.58%
1:00	10.58	11.02	4.20%
2:00	9.63	9.99	3.78%
3:00	9.34	9.68	3.59%
4:00	8.51	8.76	2.97%
5:00	8.47	8.72	2.93%
6:00	8.61	8.87	3.03%
7:00	10.02	10.42	3.97%
8:00	12.25	14.5	18.36%
9:00	14.13	16.56	17.22%
10:00	16.07	18.68	16.24%
11:00	17.24	19.97	15.81%
12:00	17.58	20.33	15.67%
13:00	16.36	19	16.10%
14:00	16.57	19.23	16.03%
15:00	16.11	18.72	16.23%
16:00	15.05	17.56	16.71%
17:00	14.63	17.11	16.94%
18:00	14.52	16.99	17.00%
19:00	14.57	17.04	16.97%
20:00	14.01	14.78	5.51%
21:00	13.52	14.24	5.35%
22:00	12.22	12.83	4.98%
23:00	12.20	12.8	4.90%



Figura 30. Comparación entre el gasto a la entrada del sector real y el generado por el modelo. Fuente: Elaboración propia.

La simulación de la concentración del cloro comienza desde que el agua, con su respectiva cantidad de cloro inicial, sale de la fuente que abastece el sector, el tiempo que toma al cloro estabilizarse dentro de la red depende del tamaño de la red. Por esto, la simulación tiene una duración de 72 horas. La evaluación de calidad para un día promedio se realiza el día en que el comportamiento del cloro es igual al del día siguiente en el modelo.

5. Diseño de experimento

El experimento consiste en determinar los coeficientes cinéticos del sector BJ-02, a partir de mediciones directas de la concentración de cloro del agua que fluye por las tuberías del sector BJ-02 y el posterior procesamiento de los datos. Para llevar a cabo el experimento se requiere establecer claramente la hipótesis que busca comprobar el experimento, el sistema y modelo en el cual se va a realizar el experimento, las variables a determinar y, finalmente, el plan de muestreo que define cómo, cuánto, cuándo y dónde se deben tomar estas mediciones.

5.1. Hipótesis

El decaimiento del cloro libre en redes de distribución se ajusta a un modelo de reacción de primer orden, es decir, el cambio de concentración del cloro respecto al tiempo es proporcional a la concentración inicial elevada a la primera potencia. La constante de proporcionalidad se le conoce como constante de reacción o constante cinética.

$$\frac{dC}{dt} = -kC^1$$

Después de resolver la ecuación diferencial, se obtiene la expresión que se utiliza para describir el decaimiento del cloro en el sector:

$$C = C_o e^{-kt}$$

Donde

- C es la concentración final de cloro libre
- C_o es la concentración inicial de cloro libre
- k es la constante o coeficiente cinético
- t es el tiempo transcurrido entre la concentración inicial y la final

El coeficiente cinético se determina a partir de la medición de la concentración inicial en la entrada de agua del sector y la concentración final en distintos puntos en el sector. El coeficiente cinético (k) tiene dos componentes: el coeficiente de reacción en el seno del fluido (k_b) y el coeficiente de reacción con la pared de la tubería (k_w):

$$k = k_{global} = k_b + k_w$$

El coeficiente en el seno del fluido (k_b) se determina por medio de pruebas en frasco a partir de muestras de agua tomadas de la red de estudio.

El coeficiente de pared único (k_w) para toda la red de distribución se determina a partir del coeficiente cinético total (k_{global}) y el coeficiente en el seno del fluido (k_b).

5.2. Identificación del sistema y modelo

El sistema es el conjunto de elementos interconectados que existe en la realidad y que se busca estudiar y caracterizar. En este caso, el sistema consiste en un sector de la red de distribución de agua potable de la Ciudad de México ubicado en la Alcaldía Benito Juárez en la colonia San Pedro de los Pinos, delimitado por la Avenida San Antonio, Avenida Revolución, Calle 4 y Periférico. El sistema actualmente abastece usuarios mayoritariamente domésticos de clase socioeconómica media alta y en menor medida abastece comercios, oficinas y escuelas, entre otros. No abastece usuarios industriales.

El modelo es una representación simplificada de la realidad que se desarrolla para ejecutar y evaluar el experimento. En este caso, se trata de un modelo de calidad que se genera a partir de un modelo hidráulico de la red del sector, y, una vez determinadas, la concentración inicial y los coeficientes cinéticos. El modelo hidráulico se desarrolla en el programa EPANET a partir de las características físicas conocidas, la identificación y cuantificación de usuarios para asignar la demanda, la calibración de la variación de la demanda y la calibración de fugas a partir de datos conocidos.

5.3. Selección de variables

Una variable es una característica del sistema que puede tomar distintos valores. Existen dos tipos principales de variables: variables dependientes y variables independientes.

Se le denomina *variable dependiente* a la que se usa para describir o medir el problema de estudio. Las variables dependientes del experimento actual son los coeficientes cinéticos del sector BJ-02 (k_{global} , k_b y k_w). Si los coeficientes cinéticos describen funciones de reacción que se ajustan adecuadamente a los datos recopilados, se podrán establecer como característicos del sector BJ-02. Por otro lado, las *variables independientes* son aquellas que se usan para describir o medir factores que se asume que afectan o causan el problema. En este caso, las variables independientes son la concentración de cloro (medida en distintos puntos y horarios) y el tiempo que transcurre entre mediciones de concentración. La concentración de cloro y el tiempo entre mediciones son las variables a través de las cuales se determinan los coeficientes cinéticos. (Degu & Yigzaw, 2006)

También existen otras variables independientes que afectan el comportamiento del cloro, como la temperatura, el material de tubería y la concentración de materia orgánica en el agua. En general, estas características se consideran homogéneas dentro del sector BJ-02, de modo que no se incluyen en el experimento. Sin embargo, la temperatura se registra en cada toma de muestra como una variable contextual, es decir, una variable sin intervención en el experimento que aporte información acerca del momento en que se tomó la muestra. (Degu & Yigzaw, 2006)

Para obtener los coeficientes cinéticos se llevan a cabo dos muestreos, uno para la obtención de k_{global} y otro para obtener k_b .

5.4. Plan de muestreo

5.4.1. Primer plan de muestreo

Muestreo para obtener K global

La K global se refiere a la constante que considera tanto las reacciones que ocurren entre el cloro y la materia en el seno del fluido como las reacciones entre el cloro y las paredes de la tubería. La constante se obtiene a partir de un modelo de reacción de primer orden, en el cual se conoce la concentración de cloro libre residual en un punto inicial (C_o) y en un punto final de la red (C), y el tiempo de retención hidráulico que transcurre entre el punto inicial y final (t).

$$C = C_o e^{-k_{global}t}$$

El sector BJ-02 cuenta con un medidor que registra la concentración de cloro libre residual de en tiempo real cada 15 min. El registro de concentraciones puede ser exportado a un procesador de datos, y, de este modo, se pueden consultar las concentraciones de cloro durante cualquier horario y en cualquier día del año.

El presente plan de muestreo considera siempre como punto inicial de la red la caja de válvulas a la entrada del sector, y como punto final cualquier toma de agua dentro del sector.



Figura 31. Punto inicial, entrada de agua al sector BJ-02.

En muchas distribuciones de probabilidad de las variables cuantitativas, los valores tienen a encontrarse alrededor de la media y una minoría en los extremos del rango de valores. Si el número de valores recopilados es grande, la distribución adopta una forma de campana: campana de Gauss o también llamada distribución Normal. El teorema central del límite establece que, si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, la distribución de probabilidad puede aproximarse a una distribución normal. Una guía común es que para muestras de tamaño mayor a 30, la distribución puede aproximarse razonablemente bien a una distribución normal (Triola, 2004), por lo tanto, se propone recopilar 30 unidades de muestreo. Cabe mencionar, que una

muestra de 30 unidades corresponde a una primera estimación, en caso de que los datos presenten demasiada variación entre sí, se debe aumentar el tamaño de muestra.

Una **unidad de muestreo** incluye la concentración de cloro inicial medida en la entrada del sector, la concentración final medida en un punto distinto del sector, y el tiempo entre mediciones. La **unidad de estudio** se refiere al coeficiente cinético global (k_{global}) obtenido de compilar una unidad de muestreo en la ecuación de reacción de primer orden. La muestra involucra recopilar 30 unidades de muestreo.

Las mediciones de concentración son medidas con un colorímetro de cloro de marca HANNA Instruments. El tiempo entre mediciones será el tiempo de retención hidráulico entre el punto inicial y el punto final, es decir, el tiempo que le toma al agua desplazarse del punto inicial al punto final. Este tiempo se obtiene a partir del modelo hidráulico con un parámetro de calidad denominado edad del agua. La edad del agua varía espacial y temporalmente de acuerdo con el consumo de agua en el modelo.

Cada medición directa de concentración final de cloro (C) se toma en alguna de las tomas domiciliarias del sector. Por cada toma de muestra, se identifica el nodo y horario más cercano al lugar y momento de la medición, y se registra. Posteriormente, de acuerdo con el nodo y horario en el que ocurra la toma de muestra, se obtiene la edad del agua. Por ejemplo, si una toma de muestra ocurre cerca del nodo N17 a las 13:00 horas, se busca en el modelo hidráulico el nodo N17 y se revisa la edad del agua a las 13:00 horas. Digamos que, de acuerdo con el modelo hidráulico, en ese lugar y momento, el tiempo de retención hidráulico (t) es de 1.5 horas. Para conocer la concentración inicial (C_o), se debe buscar la concentración de cloro registrada por el medidor a la entrada del sector a las 11:30 horas. Finalmente, se insertan las concentraciones en la ecuación de reacción de primer orden y se iteran distintos valores del coeficiente cinético (k_{global}) hasta que se obtenga el que mejor se ajuste a los datos.

El procedimiento se repite hasta obtener al menos 30 coeficientes cinéticos. Una vez completada la muestra, se revisa el promedio y la desviación de los valores, si la variación es significativa, se aumenta el tamaño de muestra.

Requerimientos

- Colaboradores: Personal del organismo operador para tener acceso a la base de datos del medidor de cloro libre a la entrada del sector. Colaboradores del Laboratorio de Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería para proveer parcialmente de material para el muestreo. Al menos una persona capacitada para realizar las mediciones en distintos puntos de la red.
- Equipo: Un colorímetro HANNA Instruments, modelo HI701, con sus dos frascos de 10 ml. Al menos 30 reactivos de cloro libre para el uso del medidor de cloro HANNA. Piseta con agua destilada para limpiar el material, una pipeta para aforar los frascos, una microfibra para secar el material y guantes de látex para manipular los frascos.



Figura 32. Medidor de cloro HANNA Instruments HI701-0 (lado izquierdo) y paquete de reactivo para uso del medidor (lado derecho).

Consideraciones

- El modelo hidráulico de EPANET fue aproximado con base en las características y datos de consumo del sector, por lo tanto, se espera que el tiempo de retención hidráulico simule el comportamiento real lo mejor posible. Cabe aclarar que, el tiempo de retención hidráulico real depende en gran medida del comportamiento humano y simular el consumo a una escala tan reducida es altamente variable y depende de factores imposibles de controlar o predecir con exactitud.
- La elección de la ubicación de puntos de muestreo puede realizarse mediante análisis de sensibilidad que permitan escoger los puntos. (Xie, 2015). Sin embargo, para tomar una muestra de las tomas de agua domiciliarias se debe solicitar acceso a la residencia en cuestión, un análisis de sensibilidad se considera poco práctico ya que los horarios y puntos de muestreo están limitados a la disponibilidad de acceso.
- Para que exista la mayor variación espacial y temporal entre mediciones, se debe buscar, en la medida de lo posible, tomar las muestras en intervalos de tiempo significativos y en puntos alejados entre sí.

5.4.2. Reporte de primer muestreo

El muestreo para la obtención de K global se realizó durante cinco días entre diciembre de 2022 y febrero de 2023 y se recopilaron un total de 27 muestras.

Procedimiento para la recolección de muestras

1. Dejar salir dos litros de agua de la llave en la toma. Descargar el agua entre la tubería de la red y la tubería de la toma minimiza la probabilidad de tomar una medición errónea de agua estancada.
2. Tomar la temperatura del agua con un termómetro y registrar la medición.
3. Llenar dos frascos de 10 ml con agua de la toma y registrar la hora. Para la medición se recomienda hacer uso de guantes para manipular los frascos y de una pipeta para aforar correctamente los 10 ml.
4. Vaciar el contenido de un sobre de reactivo en uno de los frascos y agitar, la agitación debe ser suave para minimizar la formación de burbujas y no debe tomar más de un minuto.
5. Encender el medidor de cloro presionando el botón, insertar el frasco sin reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón. Cuando lo indique el medidor, extraer el primer frasco e insertar el segundo frasco con reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón una última vez, el medidor deberá arrojar la

concentración de cloro en la pantalla. Los frascos deben estar cerrados, limpios y secos antes de ser insertados al medidor.

6. Registrar la concentración de cloro.
7. Limpiar los frascos, y la pipeta con agua destilada antes de realizar la siguiente medición.

En apoyo a la realización del muestreo, Omar Castro y Raúl Varela participaron como voluntarios para auxiliar en el registro de mediciones y manipulación del equipo durante la toma de muestras.



Figura 33. Procedimiento para la recolección de muestras en predios.

Resultados

A continuación, se presenta una tabla con las concentraciones de cloro libre residual medidas en sitio durante el muestreo, así como la ubicación de los puntos de muestreo.

Tabla 14. Tabla de concentraciones de cloro libre residual medidas en campo en distintos puntos del sector BJ-02.

Muestra	Dirección	Día	Hora	Cloro libre (ppm)	Temperatura (°C)
1	Calle 6 #5	2-dic-22	9:58	0.66	21
2	Calle 6 #5	2-dic-22	11:16	0.78	21
3	Calle 6 #5	2-dic-22	12:37	0.87	21
4	Calle 6 #5	2-dic-22	13:42	0.86	20.5
5	Calle 6 #5	2-dic-22	15:01	0.87	20.5
6	calle 10 # 25	29-ene-23	16:23	1.05	20
7	los pinos #17	29-ene-23	16:56	0.52	21
8	Calle 6 #7	30-ene-23	10:46	1.03	19.5
9	revolución #531	30-ene-23	11:09	0.91	19
10	Calle 10 # 53	30-ene-23	11:31	0.87	19.5
11	1ro de mayo #205	30-ene-23	12:05	0.88	19
12	calle 18 #26	30-ene-23	12:46	1.02	19

Muestra	Dirección	Día	Hora	Cloro libre (ppm)	Temperatura (°C)
13	calle 20 #50	30-ene-23	13:40	0.94	18
14	calle 22 #23	30-ene-23	14:09	0.99	19
15	1ro de mayo #262	31-ene-23	10:42	0.85	18.5
16	calle 20 #48	31-ene-23	11:04	1.05	19
17	1ro de mayo #233	31-ene-23	11:40	1.01	19
18	calle 18 #71	31-ene-23	12:06	0.88	22
19	Pirámide #17	31-ene-23	12:48	1.04	19
20	calle 24 #10	31-ene-23	13:13	1.14	19
21	los pinos #45	31-ene-23	13:58	1.05	19
22	los pinos #19	31-ene-23	14:31	1.05	19.5
23	1ro de mayo #153	1-feb-23	15:34	0.87	19
24	calle 8 #30	1-feb-23	16:16	0.9	18.5
25	calle 10 #06	1-feb-23	16:43	0.91	16.5
26	1ro de mayo #232	1-feb-23	17:37	0.68	18
27	calle 20 #17	1-feb-23	18:22	0.88	19
28					
29					
30					



Figura 34. Ubicación de puntos de primer muestreo.

Observaciones

- El muestreo no se completó hasta las 30 muestras debido a que se identificó que el registro de concentraciones iniciales del medidor de cloro a la entrada del sector mostraba valores incongruentes con las mediciones de cloro realizadas dentro del sector hasta el momento.
- La mayoría de las concentraciones a lo largo de todo el sector, oscilaron entre valores de 0.8 y 1 ppm.
- La temperatura en general oscila entre 18 y 21°C.
- Las primeras cinco muestras fueron tomadas en el mismo punto en intervalos de una hora aproximadamente, se observa que la concentración es menor a las 9:58 y aumenta gradualmente hacia las 15:01. Se puede especular que es debido a que más temprano en el día la concentración es menor porque hay menos consumo de agua, es decir, menos movimiento del agua y mayor tiempo de retención hidráulico, conforme comienza la rutina cotidiana de los usuarios del sector aumenta el consumo y la concentración es mayor.

Complicaciones

En febrero de 2023 se solicitó al organismo operador el acceso a la base de datos del registro de concentraciones de cloro. Ésta mostró valores incongruentes con los medidos en sitio: la concentración a la entrada era continua y significativamente inferior a la medida en distintos puntos del sector. Dado que las mediciones directas fueron realizadas con el medidor de cloro HANNA calibrado, se concluye que las concentraciones erróneas eran las registradas por el medidor a la entrada del sector.

Para revisar esta aseveración se acudió a la caja de válvulas donde se encuentra el medidor de cloro. Se manipuló superficialmente el medidor de cloro y los datos registrados en tiempo real cambiaron de manera considerable. La disparidad en los resultados puede deberse a falta de mantenimiento, de acuerdo con el manual del sensor, la membrana microporosa que se emplea en el medidor puede acumular cubiertas de hierro, manganeso y otras partículas en el agua, y el ritmo al que ocurre es altamente variable (*O&M Manual, Metrinet Controller, n.d.*). Por practicidad, se concluye que el medidor es un recurso poco confiable para continuar con el muestreo actual y se determina la necesidad de crear un nuevo plan de muestreo.

Por otro lado, después de solicitar acceso a la toma de agua de múltiples residencias en el sector BJ-02, se reporta que la mayoría de los habitantes no permiten el ingreso a sus propiedades, o bien, no responden a la solicitud. Durante el muestreo, se tocaron más de 100 puertas en el sector para la recopilación de muestras, de las cuales sólo 23 lo permitieron. Se concluye que la toma de muestras en el sector mediante la solicitud de acceso a propiedades privadas resulta inconveniente para la gran mayoría de los residentes, y, dada la extensión del sector, esta limitante puede resultar problemática para realizar un segundo muestreo.

En vista de las complicaciones expuestas, se generó un segundo plan de muestreo independiente del medidor de cloro y del acceso a los predios.

5.4.3. Segundo plan de muestreo

Muestreo para obtener K global

La K global se refiere a la constante de reacción de la ecuación de primer orden que describe la cinética del cloro libre residual que considera tanto las reacciones que ocurren en el seno del fluido como las reacciones con las paredes de la tubería. La constante se obtiene a partir de un modelo de reacción de primer orden, en el cual se conoce la concentración de cloro libre residual en un punto inicial (C_o) y en un punto final de la red (C), y el tiempo de retención hidráulico que transcurre entre el punto inicial y final (t).

$$C = C_o e^{-k_{global}t}$$

Este muestreo considera el punto inicial siempre en la caja de válvulas a la entrada del sector, y el punto final como alguno de los tres medidores de presión que se ubican en el sector. Cada uno de los cuatro puntos cuenta con llaves de agua para recolectar las muestras directamente de las tuberías de la red. Afortunadamente, debido a que el acceso a los medidores de presión entra en la jurisdicción del organismo operador, la recolección de muestras no está limitada a la accesibilidad de los residentes del sector, sino a la disponibilidad del personal del organismo operador a contribuir en el presente experimento. Estos puntos se encuentran significativamente espaciados entre sí, tomando en cuenta las limitaciones, se determinan como puntos con suficiente variación para demostrar valores característicos de todo el sector BJ-02.

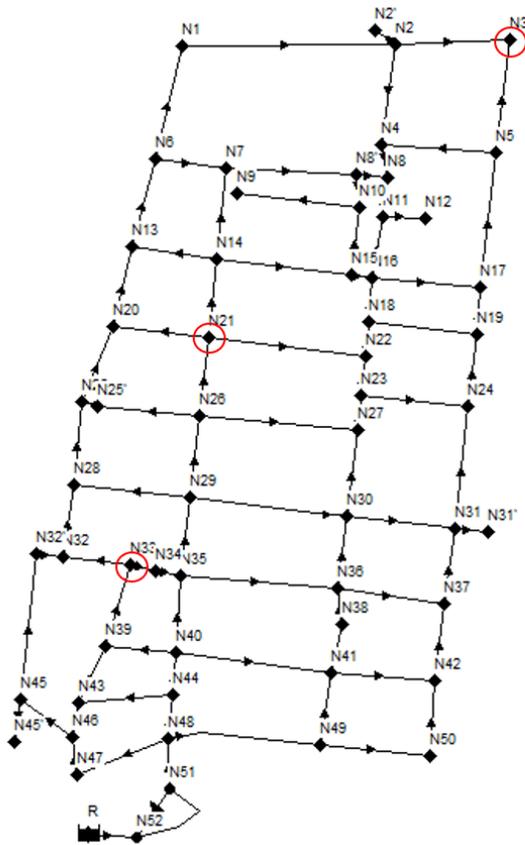


Figura 35. Ubicación de puntos de muestreo en el sector BJ-02

La cantidad de muestras a recolectar nuevamente se establece a partir del teorema del límite central, el cual establece que, si una muestra es lo bastante grande, la distribución seguirá aproximadamente una distribución Normal. En general, si una muestra es mayor o igual a 30 se aproxima a una distribución Normal.

Nuevamente, una **unidad de muestreo** incluye la concentración de cloro inicial medida en la entrada del sector, la concentración final medida en un punto distinto del sector, y el tiempo entre mediciones. La **unidad de estudio** se refiere al coeficiente cinético global (k_{global}) obtenido de compilar una unidad de muestreo en la ecuación de reacción de primer orden. La muestra involucra recopilar 30 unidades de muestreo.

Las mediciones de concentración son medidas con un medidor de cloro HANNA Instruments (Figura 32). El tiempo entre mediciones es el tiempo de retención hidráulico entre el punto inicial y el punto final, es decir, el tiempo que le toma al agua desplazarse del punto inicial al punto final. Este tiempo se obtiene a partir del modelo hidráulico con un parámetro de calidad denominado edad del agua. La edad del agua varía espacial y temporalmente de acuerdo con el consumo de agua en el modelo. Como la toma de muestras ocurre en cuatro puntos bien identificados, se opta por identificar la edad del agua para cada uno de los cuatro puntos durante distintos horarios, antes del muestreo. De este modo, se conoce el tiempo que debe transcurrir entre la medición inicial a la entrada y la medición final.



Tiempo Horas	Edad del agua		
	N33 Horas	N21 Horas	N3 Horas
10:00	0.9	0.7	4.3
11:00	0.9	0.7	3.2
12:00	0.9	0.6	2.9
13:00	0.9	0.7	2.9
14:00	0.9	0.7	3.0
15:00	0.9	0.7	3.1
16:00	0.9	0.7	3.1
17:00	1.0	0.8	3.2
18:00	1.0	0.8	3.3

Figura 36. Nodos de muestreo y sus respectivas edades de agua en diferentes horarios.

Al estar previamente establecidos los horarios de medición, la toma de muestra consiste en seleccionar y medir en un horario, y posteriormente integrar la unidad de muestreo con el tiempo de retención hidráulico (t) que corresponde al punto de muestreo y horario en que se llevó a cabo la medición. Por ejemplo, si se escoge medir la concentración de cloro inicial (C_0) a las 10:00 horas a la entrada del sector (Punto 1) y posteriormente

medir en el Punto 2, se debe medir la concentración final (C) en el Punto 2 a las 11:00 horas. Si, por otro lado, se busca medir la concentración final (C) en el Punto 4, se toma a las 13:00 horas.

Por practicidad y para procurar una variación temporal, se opta por sólo medir en un punto de muestreo por día, es decir, por cada día de muestreo sólo se medirá en punto 1 y 2, punto 1 y 3, o bien, punto 1 y 4. Por conveniencia, los horarios de medición simplifican a horas cerradas, o cuartos de hora.

Para que el muestreo provea de 30 unidades de muestreo uniformemente distribuidas, se busca recolectar entre 8 y 10 muestras en cada uno de los tres puntos de muestreo dentro del sector. Una vez completada la muestra, se revisa el promedio de los coeficientes cinéticos obtenidos y la desviación de los valores; si la variación es significativa, se aumenta el tamaño de muestra.

Requerimientos

- Colaboradores: Personal del organismo operador para tener acceso a los puntos de muestreo. Colaboradores del Laboratorio de Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería para proveer parcialmente material para el muestreo. Al menos una persona capacitada para realizar las mediciones en cada punto de muestreo.
- Equipo: En algunos casos, una medición inicial en la entrada del sector puede ocurrir al mismo tiempo que una medición final en un punto dentro del sector. Por lo tanto, se necesitan dos medidores de cloro HANNA, modelo HI701, con sus dos respectivos frascos y al menos 60 reactivos para realizar las mediciones. Agua destilada para limpiar el material, dos pipetas para aforar los frascos, dos microfibras para secar el material, guantes de látex para manipular los frascos.

Consideraciones

- El modelo hidráulico de EPANET fue aproximado con base en las características y datos de consumo del sector, por lo tanto, se espera que el tiempo de retención hidráulico simule el comportamiento real lo mejor posible. Cabe aclarar que, el tiempo de retención hidráulico real depende en gran medida del comportamiento humano y simular el consumo a una escala tan reducida es altamente variable y depende de factores imposibles de controlar o predecir con exactitud.

Muestreo para obtener K_b

La K_b se refiere a la constante que considera sólo las reacciones en el seno del fluido. No existe un método estandarizado para obtenerla, no obstante, en el pasado otros investigadores la han determinado a partir de pruebas en frasco. Estas pruebas consisten en recolectar muestras de agua en frascos de vidrio no reactivo, mantener el frasco a una temperatura constante y medir la concentración de cloro en intervalos regulares. Así, el decaimiento en la concentración es sólo el que ocurre por la reacción del cloro con la materia en el agua. (Tzatchkov et al., 2004)

Para cubrir todos los puntos del sector, se recolectan cuatro muestras de agua, una en cada punto de muestreo (Figura 35) y se toma una muestra por día. La toma de muestras consiste en recolectar una muestra de agua y almacenarla en un frasco Winkler de 250 ml; se debe medir la concentración de cloro al momento de recolectar la muestra, así como su temperatura. Posteriormente, la muestra de frasco se transporta en un recipiente aislante al Laboratorio de Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería para colocarla en una incubadora a una temperatura constante. La temperatura de la incubadora debe ser lo más próxima posible a la

registrada al momento de tomar la muestra para mantener las condiciones representativas del sector. En el Laboratorio, se mide la concentración cada hora o con intervalos constantes en los cuales se aprecie el decaimiento del cloro libre. Las mediciones se realizan de forma continua hasta que la concentración se aproxime a cero o hasta que se cumplan 10 mediciones en el laboratorio.

Por cada muestra, se grafica la concentración de cloro contra tiempo. Posteriormente, se grafica una función de ajuste que corresponde a la ecuación de primer orden. Para obtener k_b se iteran distintos valores hasta que el error se minimice.

$$\frac{dC}{dt} = -k_b C^1$$

En el muestreo para la obtención de k_b , una unidad de muestreo se compone de las mediciones de concentración de cloro asociadas a una muestra de agua y el tiempo que transcurre entre mediciones. La unidad de estudio, por otro lado, se refiere a la k_b resultante de la ecuación de ajuste. Si la k_b promedio resultante de los cuatro puntos de muestreo no presenta demasiada variación, se considera característica del sector BJ-02, de otro modo, se aumenta la cantidad de unidades de muestreo.

Requerimientos

- Colaboradores: Personal del organismo operador para tener acceso a los medidores, personal del Laboratorio de Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería para dar acceso a la incubadora y proveer parcialmente del material necesario, y al menos una persona capacitada para realizar la recolección de muestras y las mediciones.
- Equipo: Un medidor de cloro HANNA Instruments, modelo HI701, con sus dos respectivos frascos. Al menos 50 reactivos para realizar las mediciones. Frasco Winkler de 250 ml. Una piseta de agua destilada para limpiar el material, una pipeta para aforar los frascos, una microfibra para secar el material. Termómetro para tomar la temperatura inicial de las muestras.

Consideraciones

- Existe la posibilidad de error o variabilidad por el transporte que sufren las muestras desde el sector hasta el laboratorio.
- La incubadora puede no estar siempre a la misma temperatura que el agua al momento de ser recolectada, sin embargo, se debe realizar un esfuerzo por aproximarse lo más posible, de lo contrario no se podrá utilizar la incubadora.

5.4.4. Reporte de segundo muestreo

El muestreo para la obtención de K global y Kb se realizó durante siete días entre mayo y junio de 2023 y se recopilaron un total de 30 muestras.

Procedimiento para la recolección de muestras para obtención de K global

1. Abrir registros de agua potable, abrir llave de agua, recolectar suficiente en un recipiente de plástico para realizar la medición.
2. Tomar la temperatura del agua con un termómetro y registrar la medición.
3. Llenar dos frascos de 10 ml con el agua recolectada y registrar la hora. Aforar frascos a 10 ml con pipeta.
4. Vaciar el contenido de un sobre de reactivo en uno de los frascos y agitar, la agitación debe ser suave para minimizar la formación de burbujas y no debe tomar más de un minuto.
5. Encender el medidor de cloro presionando el botón, insertar el frasco sin reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón. Cuando lo indique el medidor, extraer el primer frasco e insertar el segundo frasco con reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón una última vez, el medidor deberá arrojar la concentración de cloro en la pantalla. Los frascos deben estar cerrados, limpios y secos antes de ser insertados al medidor.
6. Registrar la concentración de cloro.
7. Limpiar los frascos, y la pipeta con agua destilada antes de realizar la siguiente medición.

En apoyo a la realización del muestreo, Alejandro Corte, Josselyn González y Daniela Aguirre participaron como voluntarios para auxiliar en el registro de mediciones y manipulación del equipo, y los colaboradores del organismo operador SACMEX, Miguel Anaya Ramírez, Francisco Manuel Zúñiga Castellanos, y el ingeniero encargado del proyecto de sectorización, M.I. Ricardo Zárate Mendoza, participaron en la autorización de acceso y apertura de los registros de agua potable, y en la recolección de muestras.



Figura 37. Apertura de registros de agua potable en el sector BJ-02 con el apoyo del personal de SACMEX.



Figura 38. Vaciado de reactivo para medir concentración de cloro libre en muestra de agua.

Procedimiento para la recolección de muestras para obtención de Kb

1. Abrir registros de agua potable, abrir llave de agua, recolectar suficiente en un recipiente de plástico para llenar el frasco Winkler, registrar la hora.
2. Tomar la temperatura del agua con un termómetro y registrar la medición.
3. Llenar dos frascos de 10 ml con el agua recolectada y registrar la hora. Aforar frascos a 10 ml con pipeta.
4. Vaciar el contenido de un sobre de reactivo en uno de los frascos y agitar, la agitación debe ser suave para minimizar la formación de burbujas y no debe tomar más de un minuto.
5. Encender el medidor de cloro presionando el botón, insertar el frasco sin reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón. Cuando lo indique el medidor, extraer el primer frasco e insertar el segundo frasco con reactivo, cerrar el medidor y presionar el botón una última vez, el medidor deberá arrojar la concentración de cloro en la pantalla. Los frascos deben estar cerrados, limpios y secos antes de ser insertados al medidor.
6. Registrar la concentración de cloro.
7. Limpiar los frascos, y la pipeta con agua destilada antes de realizar la siguiente medición.
8. Transportar el frasco Winkler en recipiente aislante al Laboratorio, realizar segunda medición de cloro siguiendo los pasos anteriores, almacenar frasco Winkler en incubadora.
9. Repetir las mediciones durante intervalos regulares hasta que la concentración de cloro se aproxime a cero o se completen 10 mediciones dentro del laboratorio.

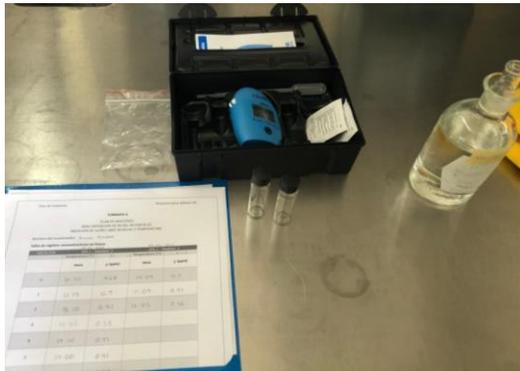


Figura 39. Registro de concentración de cloro libre en Laboratorio de Sanitaria y Ambiental.

Resultados del muestreo para obtener K global

A continuación, se presenta una tabla de las concentraciones de cloro libre residual medidos in situ durante el muestreo, así como la ubicación de la toma de muestras (Ver Figura 35).

Tabla 2. Tabla de concentraciones iniciales de cloro libre residual medidas en el sector BJ-02. Muestreo para obtener K global.

18/05/2023 Medidor 1			25/05/2023 Medidor 1			01/06/2023 Medidor 1		
Ruta M1 – M2			Ruta M1 – M3			Ruta M1 – M4		
HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)
10:00	0.73	21	10:20	0.61	21	11:00	0.46	22
11:00	0.75	22	11:20	0.49	22	12:00	0.45	22
12:00	0.75	22	12:20	0.65	22	13:00	0.5	22
13:00	0.77	22	13:20	0.57	22	14:50	0.52	22.5
						14:40	0.49	23
08/06/2023 Medidor 1			15/06/2023 Medidor 1			22/06/2023 Medidor 1		
Ruta M1 – M2			Ruta M1 – M3			Ruta M1 – M4		
HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)
10:00	0.53	21.5	10:20	0.55	23.5	11:00	0.72	22.8
11:00	0.54	22	11:20	0.45	24	12:00	0.76	23
12:00	0.65	22	12:20	0.52	25	13:00	0.73	23
13:00	0.55	22	13:20	0.47	24	14:50	0.78	24
						14:40	0.81	23
			29/06/2023 Medidor 1					
			Ruta M1 – M3					
HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)	HORA	(ppm)	T (°C)
			10:20	0.8	23			
			11:20	0.75	23			
			12:20	0.87	22.5			
			13:20	0.85	22.8			

Tabla 3. Tabla de concentraciones finales de cloro libre residual medidas en el sector BJ-02. Muestreo para obtener K global.

18/05/2023 Medidor 2			25/05/2023 Medidor 3			01/06/2023 Medidor 4		
Ruta M1 – M2			Ruta M1 – M3			Ruta M1 – M4		
HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)
11:00	0.63	23	11:00	0.39	21	14:00	0.38	23
12:00	0.63	22	12:00	0.59	21	15:00	0.4	22.8
13:00	0.58	23	13:00	0.56	23	16:00	0.37	22.8
14:00	0.68	22	14:00	0.61	22	17:00	0.39	22.8
						18:00	0.35	22
08/06/2023 Medidor 2			15/06/2023 Medidor 3			22/06/2023 Medidor 4		
Ruta M1 – M2			Ruta M1 – M3			Ruta M1 – M4		
HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)
11:00	0.42	23	11:00	0.5	21	14:00	0.42	22
12:00	0.48	23	12:00	0.54	22	15:00	0.38	21
13:00	0.58	23	13:00	0.55	21	16:00	0.32	21
14:00	0.7	23	14:00	0.58	21	17:00	0.35	21
						18:00	0.36	21.5
			29/06/2023 Medidor 3					
			Ruta M1 – M3					
HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)	HORA	C (ppm)	T (°C)
			11:00	0.35	20			
			12:00	0.4	20			
			13:00	0.37	20			
			14:00	0.37	20			

Tabla 4. Tabla de concentraciones de cloro libre residual medidas en laboratorio. Muestreo para obtener Kb.

MEDICIÓN	19-05-2023 – Medidor 1		26-05-2023 – Medidor 2		02-06-2023 – Medidor 3		09-06-2023 – Medidor 4	
	Temperatura (°C)	21	Temperatura (°C)	21.5	Temperatura (°C)	22	Temperatura (°C)	22.5
	Hora	C (ppm)						
0	10:20	0.68	10:09	0.5	10:26	0.54	10:06	0.51
1	11:15	0.5	11:09	0.42	11:25	0.4	11:05	0.38
2	12:10	0.42	12:05	0.36	12:20	0.41	12:02	0.35
3	13:05	0.38	12:59	0.34	13:13	0.42	13:09	0.31
4	14:10	0.43	14:00	0.31	14:11	0.38	13:56	0.31
5	15:00	0.42	15:00	0.29	15:06	0.31	15:00	0.29
6	16:01	0.35	16:01	0.3	16:04	0.31	16:01	0.28
7	17:04	0.36	17:01	0.26	17:01	0.32	17:04	0.31
8	18:00	0.37	18:00	0.35	17:57	0.25	18:02	0.25
9	19:05	0.3	19:00	0.27	19:01	0.28	19:03	0.27
10	20:00	0.33	20:01	0.37	19:59	0.29	20:00	0.20

Observaciones y complicaciones del muestreo para obtener K_{global}

- La mayoría de las concentraciones a lo largo de todo el sector, oscilaron entre valores de 0.45 y 0.8 ppm.
- En algunos casos, la concentración inicial es menor a la concentración final, lo cual contradice la hipótesis.
- La temperatura en general oscila entre 20 y 24°C.
- Todas las concentraciones de cloro medidas se encuentran dentro del límite permisible establecido por la NOM-127-SSA1-2021.
- Los días de muestreo en que se midió el punto 3 tienden a presentar datos incongruentes con el resto de los valores en el muestreo, ya sea un aparente aumento en la concentración o una disminución más rápida de lo esperado.

Observaciones y complicaciones del muestreo para obtener K_b

- Salvo algunas excepciones, el comportamiento del cloro durante los cuatro días de muestreo fue una apreciable disminución en la concentración.
- A pesar de que la agua tuvo una permanencia en el frasco durante casi 10 horas desde la toma de muestra, todas las concentraciones de cloro medidas se encuentran dentro del límite permisible establecido por la NOM-127-SSA1-2021.
- No fue posible calibrar la incubadora del laboratorio exactamente a la temperatura de las muestras. La temperatura de la incubadora durante los cuatro días de muestreo fue aproximadamente 20.3°C. Tomando en cuenta el primer muestreo realizado en diciembre y enero, y el segundo muestreo realizado en mayo y junio, se considera esta temperatura como suficientemente representativa del sector.

6. Resultados y Discusión

6.1. Determinación de constante de reacción global (k_{global})

El muestreo para la obtención de K_{global} considera cada unidad de muestreo como el conjunto de la concentración de cloro inicial medida en la entrada del sector (C_o), la concentración final medida en un punto del sector (C), y el tiempo que permanece el agua en la red desde el punto inicial al punto final (t). Los valores de cada unidad de muestreo se integran en la ecuación de primer orden:

$$C = C_o e^{-k_{global}t}$$

En este caso, se utiliza la función objetivo en procesador de datos Excel para obtener la k_{global} que mejor se ajusta a los datos (Tabla 5). Una vez obtenidos los coeficientes, se obtiene el promedio, la varianza, y el error estándar de la muestra. El error estándar se calcula mediante la siguiente expresión (Hernández Sampieri et al., 1991):

$$\text{Error estándar de muestra} = \frac{\text{varianza de la muestra}}{\text{tamaño de muestra}}$$

Tabla 5. Coeficientes cinéticos (K global) para cada unidad de muestreo.

Ruta	Día	Hora inicial	Hora final	Ci (ppm)	Cf (ppm)	t (horas)	K global	C	Co e ^{-kt}	Diferencia
M1-M2	18/05/2023	10:00	11:00	0.73	0.63	1	-0.147	0.63	0.630	0.000
		11:00	12:00	0.75	0.63	1	-0.174	0.63	0.630	0.000
		12:00	13:00	0.75	0.58	1	-0.257	0.58	0.580	0.000
		13:00	14:00	0.77	0.68	1	-0.123	0.68	0.681	0.001
	8/6/2023	10:00	11:00	0.53	0.42	1	-0.232	0.42	0.420	0.000
		11:00	12:00	0.54	0.48	1	-0.118	0.48	0.480	0.000
		12:00	13:00	0.65	0.58	1	-0.114	0.58	0.580	0.000
		13:00	14:00	0.55	0.7	1	0.241	0.7	0.700	0.000
M1-M3	25/05/2023	10:20	11:00	0.61	0.39	0.7	-0.685	0.39	0.391	0.001
		11:20	12:00	0.49	0.59	0.7	0.286	0.59	0.590	0.000
		12:20	13:00	0.65	0.56	0.7	-0.229	0.56	0.560	0.000
		13:20	14:00	0.57	0.61	0.7	0.097	0.61	0.610	0.000
	13/06/2023	10:20	11:00	0.55	0.5	0.7	-0.147	0.5	0.500	0.000
		11:20	12:00	0.45	0.54	0.7	0.281	0.54	0.540	0.000
		12:20	13:00	0.52	0.55	0.7	0.086	0.55	0.550	0.000
		13:20	14:00	0.47	0.58	0.7	0.301	0.58	0.580	0.000
	29/6/2023	10:20	11:00	0.8	0.35	0.7	-1.271	0.35	0.350	0.000
		11:20	12:00	0.75	0.4	0.7	-0.967	0.4	0.400	0.000
		12:20	13:00	0.87	0.37	0.7	-1.314	0.37	0.370	0.000
		13:20	14:00	0.85	0.37	0.7	-1.188	0.37	0.370	0.000
M1-M4	1/6/2023	11:00	14:00	0.46	0.38	3.0	-0.064	0.38	0.380	0.000
		12:00	15:00	0.45	0.4	3.0	-0.039	0.4	0.400	0.000
		13:00	16:00	0.5	0.37	3.0	-0.100	0.37	0.370	0.000
		14:50	17:00	0.52	0.39	3.0	-0.095	0.39	0.390	0.000
		14:40	18:00	0.49	0.35	3.0	-0.112	0.35	0.351	0.001
	22/6/2023	11:00	14:00	0.72	0.42	3.0	-0.180	0.42	0.420	0.000
		12:00	15:00	0.76	0.38	3.0	-0.231	0.38	0.380	0.000
		13:00	16:00	0.73	0.32	3.0	-0.275	0.32	0.320	0.000
		14:50	17:00	0.78	0.35	3.0	-0.267	0.35	0.350	0.000
		14:40	18:00	0.81	0.36	3.0	-0.270	0.36	0.360	0.000

$$\begin{aligned}
 K \text{ global promedio} &= -0.243 \quad h^{-1} \\
 \text{Varianza de la muestra} &= 0.184 \\
 \text{Tamaño de la muestra} &= 30 \\
 \text{Error estándar} &= 0.61\%
 \end{aligned}$$

Tomando en consideración todas las constantes de reacción obtenidas durante el muestreo, se obtiene que el error promedio para un tamaño de muestra de 30 constantes de decaimiento es de 0.61%. Se considera este error como aceptable para continuar con el análisis y no aumentar el tamaño de muestra. Sin embargo, algunos resultados contradicen la hipótesis o muestran valores mayores al promedio, por tanto, primero se deben discriminar algunos resultados.

En algunos casos, la concentración en el punto inicial es menor que en el punto final. El cloro no puede aumentar su concentración a menos que se inyecte cloro, lo cual no ocurre en el sector. Los medidores de cloro HANNA utilizados están calibrados y comúnmente se realiza más de una medición para procurar la mayor precisión posible, por tanto, se descarta que la causa sea un error en la medición del cloro. En cambio, el tiempo de retención hidráulico se obtiene a partir del modelo hidráulico, el cual, a pesar de ser calibrado con un alto

grado de detalle, aún resulta la variable más incierta. Es posible que en el tiempo entre dos mediciones en la entrada del sector pasara un bloque de agua con mayor concentración que no fue medido. No hay forma de asegurar una explicación para estos valores, sin embargo, se determinan como valores no representativos y se excluyen del análisis.

Por otro lado, algunas constantes resultan significativamente más altas que el promedio. Nuevamente, se puede atribuir a la incertidumbre que persiste en el modelo hidráulico, por ejemplo, un decaimiento más pronunciado puede deberse a que el agua ha permanecido más tiempo en la red del que se calcula en el modelo. Con el propósito de minimizar estos errores, también se descartan los coeficientes cinéticos que tengan una diferencia mayor a 0.5 respecto al promedio.

Tabla 6. Coeficientes cinéticos (K global) filtrados para cada unidad de muestreo.

Ruta	Día	Hora inicial	Hora final	Ci (ppm)	Cf (ppm)	t (horas)	K global	C	Co e ^{-kt}	Diferencia
M1-M2	18/05/2023	10:00	11:00	0.73	0.63	1	-0.147	0.63	0.630	0.000
		11:00	12:00	0.75	0.63	1	-0.174	0.63	0.630	0.000
		12:00	13:00	0.75	0.58	1	-0.257	0.58	0.580	0.000
		13:00	14:00	0.77	0.68	1	-0.123	0.68	0.681	0.001
	8/6/2023	10:00	11:00	0.53	0.42	1	-0.232	0.42	0.420	0.000
		11:00	12:00	0.54	0.48	1	-0.118	0.48	0.480	0.000
12:00		13:00	0.65	0.58	1	-0.114	0.58	0.580	0.000	
M1-M3	25/05/2023	10:20	11:00	0.61	0.39	0.7	-0.685	0.39	0.391	0.001
		12:20	13:00	0.65	0.56	0.7	-0.229	0.56	0.560	0.000
	13/06/2023	10:20	11:00	0.55	0.5	0.7	-0.147	0.5	0.500	0.000
M1-M4	1/6/2023	11:00	14:00	0.46	0.38	3.0	-0.064	0.38	0.380	0.000
		12:00	15:00	0.45	0.4	3.0	-0.039	0.4	0.400	0.000
		13:00	16:00	0.5	0.37	3.0	-0.100	0.37	0.370	0.000
		14:50	17:00	0.52	0.39	3.0	-0.095	0.39	0.390	0.000
		14:40	18:00	0.49	0.35	3.0	-0.112	0.35	0.351	0.001
	22/6/2023	11:00	14:00	0.72	0.42	3.0	-0.180	0.42	0.420	0.000
		12:00	15:00	0.76	0.38	3.0	-0.231	0.38	0.380	0.000
		13:00	16:00	0.73	0.32	3.0	-0.275	0.32	0.320	0.000
		14:50	17:00	0.78	0.35	3.0	-0.267	0.35	0.350	0.000
		14:40	18:00	0.81	0.36	3.0	-0.270	0.36	0.360	0.000

$$\begin{aligned}
 K \text{ global promedio} &= -0.193 \quad h^{-1} \\
 \text{Varianza de la muestra} &= 0.029 \\
 \text{Tamaño de la muestra} &= 20 \\
 \text{Error estándar} &= 0.14\%
 \end{aligned}$$

Se determina la constante de reacción global del sector BJ-02 con un valor de -0.193 h^{-1} , con un error estándar de 0.14%.

Durante la toma de muestra, las concentraciones se miden con buena precisión gracias al uso del medidor de cloro HANNA, sin embargo, estimar el tiempo de permanencia del agua en un medio no controlado como es la red de estudio, es complejo. Para aproximar el comportamiento hidráulico de la red se refinó un modelo en el programa EPANET de acuerdo con un estudio de la demanda en el sector, no obstante, el modelo

tiene un margen significativo de incertidumbre ya que el comportamiento hidráulico de la red depende fundamentalmente del comportamiento humano de los usuarios al consumir agua. El muestreo para determinar esta constante cinética discriminó 10 constantes obtenidas como incongruentes o demasiado alejadas de la media, estas incongruencias se atribuyen principalmente a la incertidumbre que arrastra el modelo. Por lo tanto, se concluye que la constante k_{global} (-0.193 h^{-1}) es aproximada más no necesariamente representativa del sector BJ-02.

6.2. Determinación de constante de reacción en el seno del fluido (k_b)

El muestreo para la obtención de K_b considera cada unidad de muestreo como el conjunto de la concentración de cloro inicial medida en uno de los cuatro puntos de muestreo de la red (C_o), las 10 concentraciones medidas en el laboratorio en intervalos de una hora aproximadamente (C), y el tiempo entre mediciones (t). Los valores de cada unidad de muestreo se grafican y posteriormente ajusta una ecuación de primer orden:

$$\frac{dC}{dt} = -kC^1 \quad \rightarrow \quad C = C_o e^{-k_b t}$$

La ecuación de ajuste se obtiene a partir del método de mínimos cuadrados, este método intenta minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias en las ordenadas (o residuos) entre los puntos generados por la función elegida y los valores en los datos. En este caso, se hace uso de la función Solver en el procesador de datos Excel, esta función permite obtener el coeficiente cinético k_b tal que la suma de los residuos sea mínima.

A continuación, se presentan las tablas y gráficas utilizadas para la obtención de k_b para cada punto de muestreo.

Tabla 7. Obtención de coeficiente cinético K_b para el punto de muestreo 1.

t	Cf real	Cf calculado	$(Cf_{real} - Cf_{calc})^2$
horas	mg/L	mg/L	
0.0	0.68	0.680	0.000
0.9	0.5	0.618	0.014
1.8	0.42	0.561	0.020
2.8	0.38	0.509	0.017
3.8	0.43	0.454	0.001
4.7	0.42	0.416	0.000
5.7	0.35	0.374	0.001
6.7	0.36	0.335	0.001
7.7	0.37	0.304	0.004
8.8	0.3	0.271	0.001
9.7	0.33	0.246	0.007
		$\Sigma =$	0.064

T =	21	°C
Ci =	0.68	mg/L
Kb =	-0.105	h^{-1}

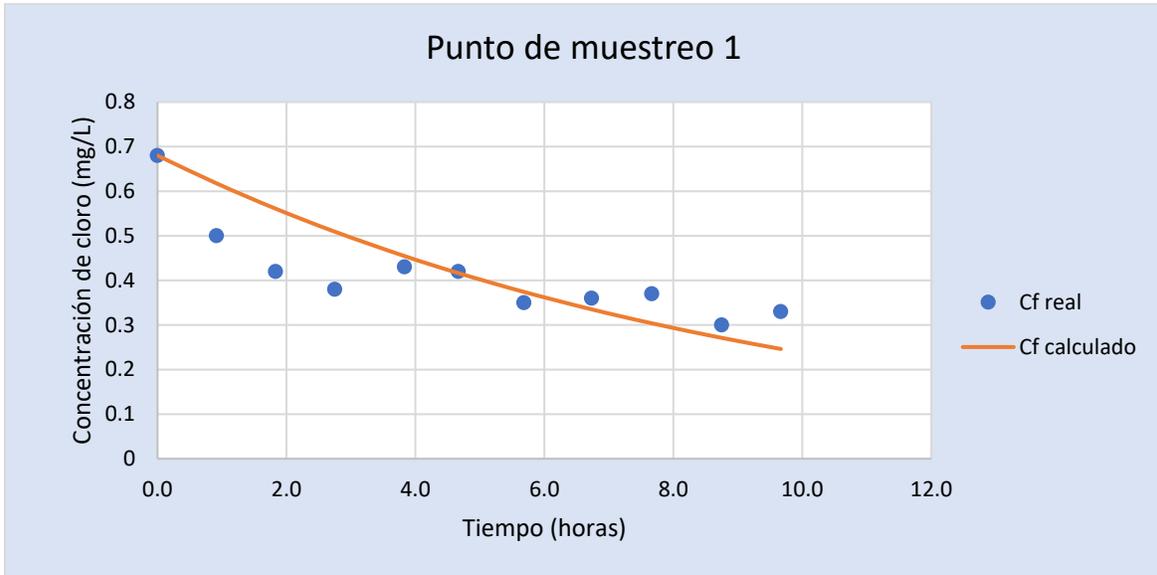


Figura 40. Gráfica de ajuste para la obtención de Kb en el punto de muestreo 1.

Tabla 8. Obtención de coeficiente cinético Kb para el punto de muestreo 2.

t	Cf real	Cf calculado	$(Cf_{real} - Cf_{calc})^2$
horas	mg/L	mg/L	
0.0	0.5	0.500	0.000
1.0	0.42	0.464	0.002
1.9	0.36	0.433	0.005
2.8	0.34	0.406	0.004
3.9	0.31	0.376	0.004
4.9	0.29	0.349	0.004
5.9	0.3	0.324	0.001
6.9	0.26	0.301	0.002
7.9	0.35	0.280	0.005
8.9	0.27	0.260	0.000
9.9	0.37	0.241	0.017
		$\Sigma =$	0.043

T =	21.5	°C
Ci =	0.5	mg/L
Kb =	-0.074	h ⁻¹

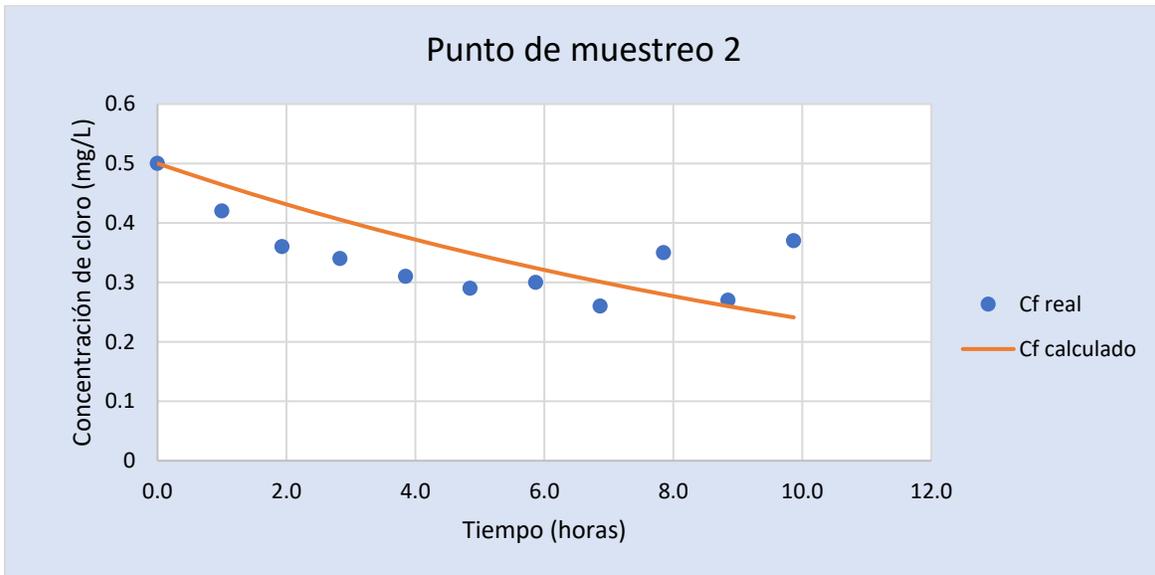


Figura 41. Gráfica de ajuste para la obtención de K_b en el punto de muestreo 2.

Tabla 9. Obtención de coeficiente cinético K_b para el punto de muestreo 3.

t	Cf real	Cf calculado	$(Cf_{real} - Cf_{calc})^2$
horas	mg/L	mg/L	
0.0	0.54	0.540	0.000
1.0	0.4	0.495	0.009
1.9	0.41	0.457	0.002
2.8	0.42	0.422	0.000
3.8	0.38	0.388	0.000
4.7	0.31	0.358	0.002
5.6	0.31	0.328	0.000
6.6	0.32	0.302	0.000
7.5	0.25	0.278	0.001
8.6	0.28	0.253	0.001
9.6	0.29	0.232	0.003
		$\Sigma =$	0.019

T =	22	°C
$C_i =$	0.54	mg/L
$K_b =$	-0.088	h^{-1}

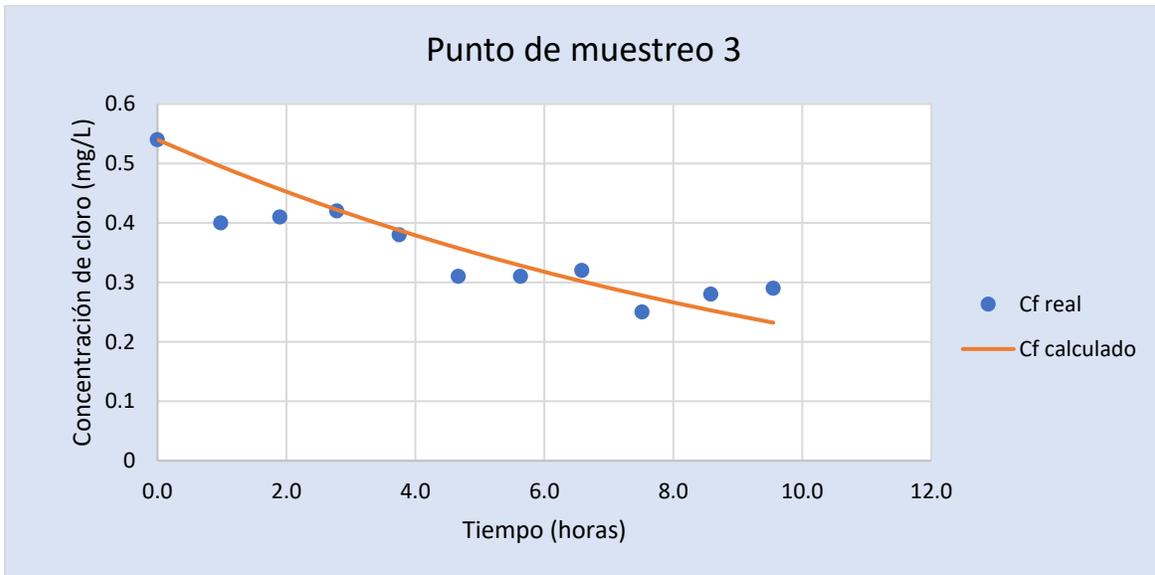


Figura 42. Gráfica de ajuste para la obtención de Kb en el punto de muestreo 3.

Tabla 10. Obtención de coeficiente cinético Kb para el punto de muestreo 4.

t	Cf real	Cf calculado	$(Cf_{real} - Cf_{calc})^2$
horas	mg/L	mg/L	
0.0	0.51	0.510	0.000
1.0	0.38	0.462	0.007
1.9	0.35	0.421	0.005
3.1	0.31	0.377	0.004
3.8	0.31	0.348	0.001
4.9	0.29	0.313	0.001
5.9	0.28	0.283	0.000
7.0	0.31	0.255	0.003
7.9	0.25	0.232	0.000
9.0	0.27	0.209	0.004
9.9	0.2	0.190	0.000
		$\Sigma =$	0.025

T =	22.5	°C
Ci =	0.51	mg/L
Kb =	-0.100	h ⁻¹

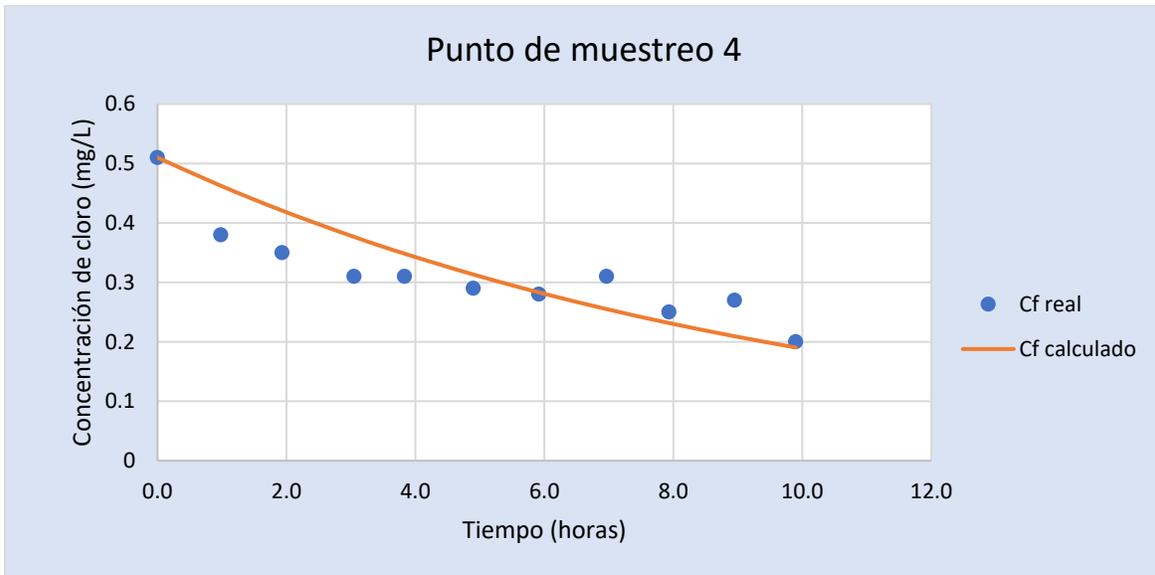


Figura 43. Gráfica de ajuste para la obtención de K_b en el punto de muestreo 4

Los parámetros estadísticos del muestreo para obtener K_b son:

K_b promedio	=	-0.092	h^{-1}
Varianza de la muestra	=	0.000189	
Tamaño de la muestra	=	4	
Error estándar	=	0.005%	

Se determina la constante de reacción en el seno del fluido k_b con un valor de $2.21 d^{-1}$ ($0.092 h^{-1}$), con un error estándar de 0.005%. Dado que el experimento se llevó a cabo en laboratorio en un medio controlado, los resultados son congruentes a lo esperado, y se tiene poca variación entre los resultados del muestreo, se concluye que la constante es representativa del sector BJ-02.

La constante k_b obtenida para el sector BJ-02 de la Ciudad de México es superior a la obtenida para una red en Connecticut, Estados Unidos ($k_b=0.55 d^{-1}$) (Rossman et al., 1994), y a la obtenida para una red en la ciudad 6 de octubre en Egipto ($k_b=0.79 d^{-1}$) (Mostafa et al., 2013). Por otro lado, es inferior a la obtenida para la ciudad de Azogues en Ecuador ($k_b=3.71 d^{-1}$) (García Ávila, 2019). Sin embargo, es muy similar a la obtenida para la ciudad de Culiacán en Sinaloa ($k_b=2.35 d^{-1}$) (Tzatchkov et al., 2004).

6.3. Determinación de constante de reacción de pared (k_w)

El coeficiente de reacción con la pared puede variar de acuerdo con el material, edad, diámetro y longitud de tubería, condiciones de flujo, y temperatura. Por practicidad, se asumen condiciones homogéneas de temperatura, material y calidad de tubería en la red y se obtiene un coeficiente de pared único para todo el sector BJ-02. Éste se obtiene como el complemento de la constante de reacción en el seno del fluido para obtener la constante de reacción global. Esta relación se expresa en la siguiente ecuación (CONAGUA, 2019b):

$$K_{global} = k_b + k_w = k_b + k_{pared}$$

La reacción del cloro en la pared de la tubería se ven afectados por tres factores:

- La capacidad reactiva de la superficie de la tubería en contacto con el agua
- El área de la pared disponible a reaccionar
- El movimiento de agua en la pared.

Para una reacción de primer orden, los términos que describen los tres factores se combinan para formar:

$$k_{pared} = \frac{2k_w k_f}{r (abs(k_w) + k_f)}$$

La transferencia de masa entre el volumen de agua y la pared del tubo está representada por el coeficiente k_f que depende del número de Sherwood (Sh):

$$k_f = Sh \left(\frac{D_m}{D} \right)$$

Donde D_m es la difusividad molecular del transporte de solutos y D es el diámetro de la tubería. La difusividad molecular es una propiedad física de las sustancias, en el caso del ácido hipocloroso (HOCL-), la especie dominante del cloro libre, es $1.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (CONAGUA, 2019b) El número de Sherwood es adimensional y para régimen turbulento se usa la siguiente relación empírica:

$$Sh = 0.0149 Re^{0.88} Sc^{1/3}$$

donde Sc es el número de Schmidt (ν/D_m), y Re es el número de Reynolds ($\nu D/\nu$).

Debido a la significativa variación espacial y temporal que presenta la velocidad de flujo en la red, se opta por obtener una velocidad promedio en los horarios de mayor y menor demanda.

Velocidad (menor demanda) =	0.0428 m/s
Velocidad (mayor demanda) =	0.1033 m/s
Velocidad promedio =	0.0730 m/s

Por otro lado, el coeficiente de decaimiento de pared varía de acuerdo con el diámetro, por lo tanto, para obtener el coeficiente representativo se aplica un promedio ponderado en función del porcentaje de tuberías en la red con un determinado diámetro. Cada k_w es una constante cinética en una ecuación de reacción de primer orden, por lo que sus unidades son metros/hora.

Tabla 11. Coeficientes cinéticos de pared en función de velocidad de flujo y diámetro de tubería.

Diámetro	Contribución porcentual	Velocidad	Re	Sc	Sh	k_f		k_w	k_{pared}	k_{pared} calc	Diferencia
mm		m/s				m/hr		m/hr	día ⁻¹	día ⁻¹	
76.2	5.12%	0.0428	3258	800.0	170.7	0.0101		-0.0024	-0.101	-0.1006	-0.001
101.6	29.73%	0.0428	4344	800.0	219.9	0.0097		-0.0035	-0.101	-0.1011	0.000
152.4	57.77%	0.0428	6516	800.0	314.2	0.0093		-0.0066	-0.101	-0.1011	0.000
304.8	7.37%	0.0428	13031	800.0	578.2	0.0085		-0.0765	-0.101	-0.1008	0.000
Promedio ponderado =								-0.0106			
76.2	5.12%	0.1033	7868	800.0	370.9	0.0219		-0.0021	-0.101	-0.1011	0.000
101.6	29.73%	0.1033	10491	800.0	477.8	0.0212		-0.0029	-0.101	-0.1009	0.000
152.4	57.77%	0.1033	15737	800.0	682.6	0.0202		-0.0048	-0.101	-0.1011	0.000
304.8	7.37%	0.1033	31474	800.0	1256.3	0.0185		-0.0132	-0.101	-0.1011	0.000
Promedio ponderado =								-0.0047			
76.2	5.12%	0.0730	5563	800.0	273.4	0.0161		-0.0022	-0.101	-0.1010	0.000
101.6	29.73%	0.0730	7417	800.0	352.1	0.0156		-0.0030	-0.101	-0.1004	-0.001
152.4	57.77%	0.0730	11126	800.0	503.1	0.0149		-0.0052	-0.101	-0.1011	0.000
304.8	7.37%	0.0730	22252	800.0	925.9	0.0137		-0.0176	-0.101	-0.1010	0.000
Promedio ponderado =								-0.0053			

Con base en los coeficientes cinéticos previamente determinados, se establece k_{pared} con un valor de 2.428 día⁻¹ (0.101 hr⁻¹) y k_w con un valor de -0.128 m/día (-0.0053 m/hr). En vista de que la constante de reacción con la pared de la tubería fue parcialmente obtenida a partir de las constantes k_b y k_{global} , el error que arrastren estas constantes afecta a la constante k_w , y, por tanto, la constante k_w también se considera aproximada.

En comparación con otros estudios, la constante de pared obtenida en este estudio (k_w), es inferior a la obtenida para una red en Connecticut, Estados Unidos, donde la k_w se encuentra entre 0.15 m/día y 0.45 m/día (Rossman et al., 1994); y es superior a la obtenida para la ciudad de Azogues en Ecuador ($k_w=0.066$ m/día) (García Ávila, 2019).

6.4. Evaluación del modelo de calidad

Las constantes cinéticas determinadas se insertan en el modelo hidráulico en EPANET y se evalúa el desempeño del modelo de acuerdo con dos indicadores estadístico: la desviación estándar o error medio (s) y el coeficiente de correlación de Pearson (r). El error medio mide la diferencia promedio entre los valores que predice el modelo y los valores reales medidos, y se calcula mediante la siguiente expresión (Kreyszig, 1973):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, x_i es el valor medido (o real) y y_i es el valor calculado por el modelo.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la correlación lineal entre dos grupos de datos y se calcula como el cociente de la covarianza entre las dos variables y el producto de sus desviaciones estándar.

El coeficiente varía entre -1 y 1, entre más se acerca a cero se tiene una nula correlación, mientras que un coeficiente igual a 1 demuestra una perfecta correlación (Triola, 2004).

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde x_i es el valor medido (o real) y y_i es el valor calculado por el modelo, \bar{x} es el promedio de los valores medidos y \bar{y} es el promedio de los valores calculados.

Las concentraciones iniciales asignadas en el modelo varían de acuerdo con los datos medidos en campo a la entrada del sector, es decir, se insertan valores desde 0.8 hasta 0.45 ppm, con variaciones de 0.05 ppm entre sí.

Tabla 12. Evaluación de modelo de calidad del sector BJ-02.

Ruta	Día	Hora inicial	Hora final	Ci (ppm)	Real	Calculada
					Cf (ppm)	Cf (ppm)
M1-M2	18/05/2023	10:00	11:00	0.73	0.63	0.58
		11:00	12:00	0.75	0.63	0.6
		12:00	13:00	0.75	0.58	0.6
		13:00	14:00	0.77	0.68	0.6
	8/6/2023	10:00	11:00	0.53	0.42	0.42
		11:00	12:00	0.54	0.48	0.43
12:00		13:00	0.65	0.58	0.52	
M1-M3	25/05/2023	10:10	11:00	0.61	0.39	0.53
		12:10	13:00	0.65	0.56	0.56
	13/06/2023	10:10	11:00	0.55	0.5	0.47
M1-M4	1/6/2023	9:30	14:00	0.46	0.38	0.21
		10:40	15:00	0.45	0.4	0.2
		11:40	16:00	0.5	0.37	0.23
		12:30	17:00	0.52	0.39	0.23
		13:30	18:00	0.49	0.35	0.21
	22/6/2023	9:30	14:00	0.72	0.42	0.33
		10:40	15:00	0.76	0.38	0.34
		11:40	16:00	0.73	0.32	0.32
		12:30	17:00	0.78	0.35	0.34
		13:30	18:00	0.81	0.36	0.35

Promedio	0.4585	0.4035
-----------------	--------	--------

s	0.0950
r	0.843

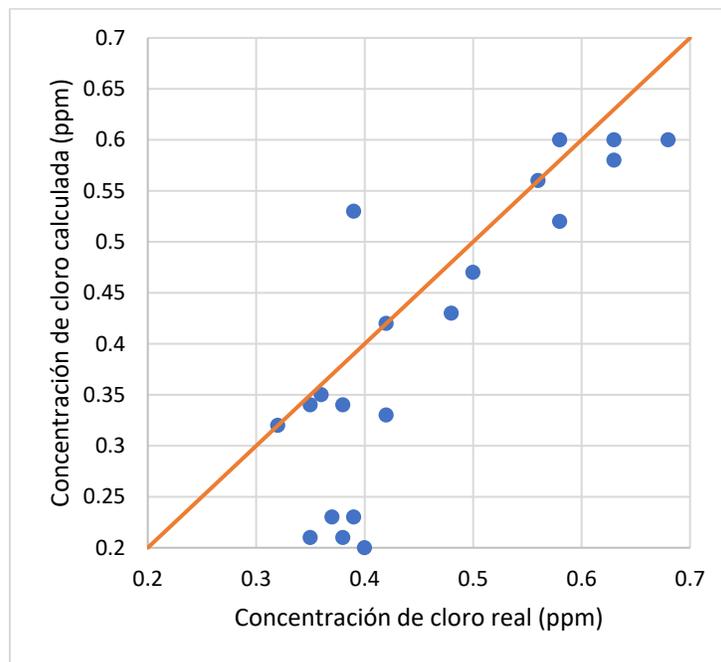


Figura 44. Correlación entre valores medidos y valores calculados por el modelo.

Finalmente, se obtiene un error de 9.50% y una correlación de 84.3%, estos indicadores se consideran suficientes para determinar las constantes como representativas del sector BJ-02.

El experimento estuvo sujeto a limitaciones de tiempo y recursos, y es posible llegar a mejores resultados estadísticos mediante un diseño de experimento más refinado y amplio. No obstante, se reconoce como un modelo suficientemente característico de la zona de estudio para explorar el comportamiento hidráulico y de calidad en el sector BJ-02.

6.5. Exploración del modelo de calidad

Una vez establecidos los coeficientes cinéticos de decaimiento de cloro en el sector, se pueden generar una serie de gráficos que muestren la variación temporal y espacial de la concentración de cloro, y permitan determinar los nodos más vulnerables.

A continuación, se simula un escenario bajo el cual la concentración inicial es de 0.3 mg/L. A las 10 AM se observa que los nodos más vulnerables son los que se encuentran más alejados de la entrada de agua. Durante el horario de madrugada, y en particular entre las 5:00 y 6:00 am, se tienen las concentraciones más bajas registradas. Los únicos nodos que aún se encuentran dentro del límite permisible son los próximos a la entrada de agua y el tramo de tubería que conduce la mayor cantidad de agua.

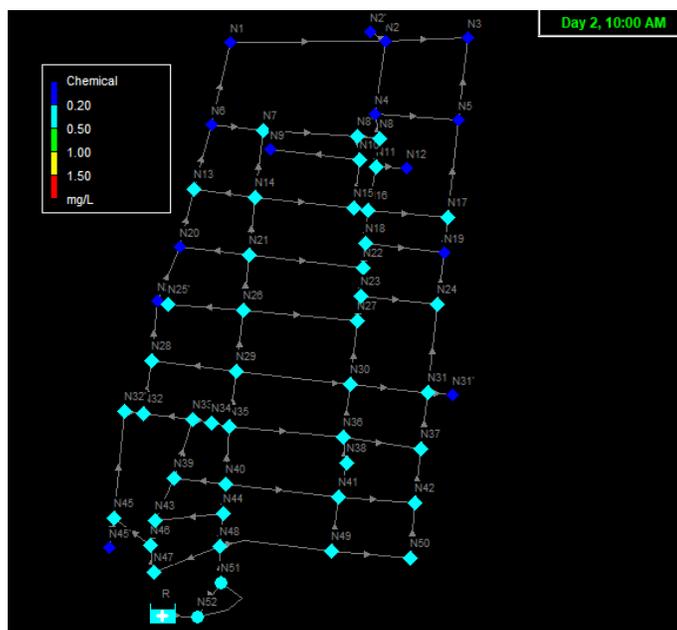


Figura 45. Concentraciones de cloro en modelo, 10 AM, concentración inicial 0.3 mg/L.

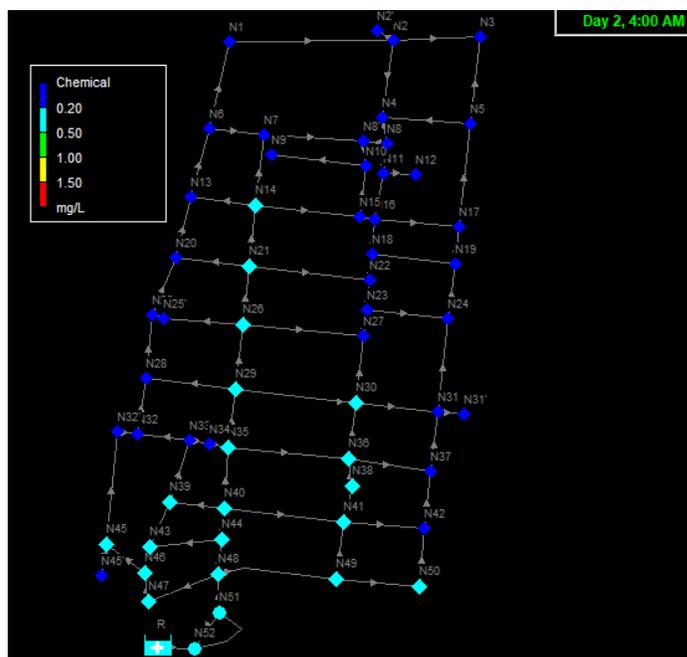


Figura 46. Concentraciones de cloro en modelo, 4 AM, concentración inicial 0.3 mg/L

De acuerdo con el modelo, la concentración de cloro se mantendrá dentro de los límites permisibles en el horario de mayor demanda (11 AM) si el agua a la entrada del sector tiene una concentración mínima de 0.4 mg/L. Sin embargo, para asegurar el límite permisible en todos los nodos a las 4:00 AM, la concentración a la entrada del sector debe ser de al menos 1.15 mg/L.

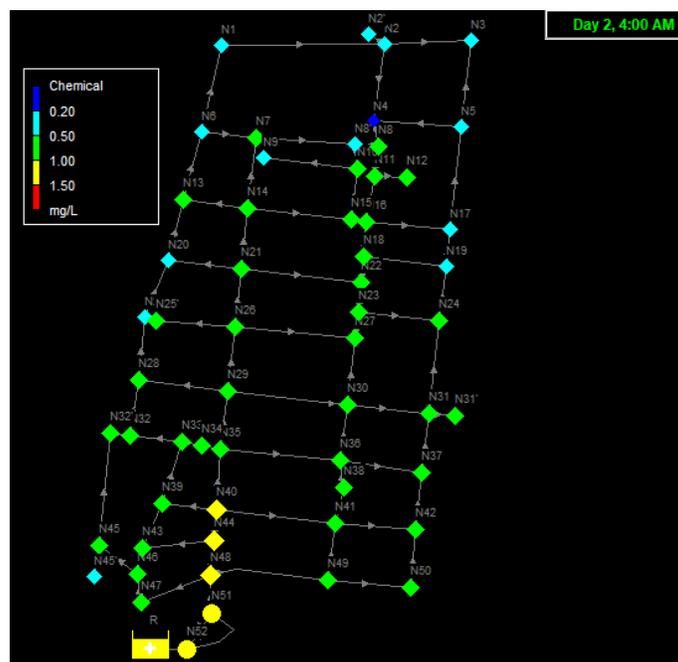


Figura 47. Concentraciones de cloro en modelo, 4 AM, concentración inicial 1.1 mg/L

La cantidad de cloro mínima que debe contener el agua a la entrada para asegurar los límites permisibles de concentración varía significativamente de acuerdo con el horario, esto se debe a la variación en la permanencia del agua en la red.

7. Conclusiones y Recomendaciones

El sector BJ-02 corresponde a una parte de la red de distribución de la Ciudad de México que se ha delimitado como una zona de suministro autónoma, con una sola entrada de agua bien identificada. El sector se ubica en la colonia San Pedro de Los Pinos en la Alcaldía Benito Juárez, abastece una población aproximada de 4,085 habitantes y tiene 6.1 km de tubería. El agua que llega al sector proviene de los sistemas Cutzamala y Lerma. Los usuarios son principalmente domésticos, y en menor medida comercios y servicios públicos.

Las constantes cinéticas que describen el ritmo de decaimiento de cloro libre en el agua que abastece al sector BJ-02, se determinaron a partir de dos experimentos. Para obtener la constante de reacción en el seno del fluido (k_b), se tomaron cuatro muestras en frascos Winkler y se realizaron mediciones en laboratorio en intervalos regulares. Puesto que el experimento se llevó a cabo en un medio controlado, y los resultados son congruentes y presentan poca desviación entre sí, se determina la constante k_b (2.21 d^{-1}) como representativa del sector BJ-02.

El experimento para obtener la constante de reacción global (k_{global}) consistió en medir la concentración de cloro en un punto inicial y final del sector, y el tiempo que toma el agua en recorrer del punto

inicial al punto final, se tomaron 60 muestras y las mediciones se realizaron en sitio. Las concentraciones se miden con suficiente precisión en el momento de la toma de muestra, sin embargo, para estimar el tiempo de permanencia del agua en un medio no controlado como es la red de estudio se hizo uso de un modelo hidráulico en EPANET. El modelo hidráulico preliminar fue proporcionado por el organismo operador SACMEX y posteriormente fue refinado con base en un estudio de la demanda en el sector para alcanzar el nivel de detalle requerido para el experimento. No obstante, el modelo tiene un margen de incertidumbre, ya que el tiempo de permanencia del agua en la red depende del comportamiento humano en el día de muestreo. El muestreo para determinar esta constante cinética discriminó 20 mediciones como incongruentes o demasiado alejadas de la media, estas incongruencias se atribuyen principalmente a la incertidumbre que arrastra el modelo. Por lo tanto, se concluye que la constante k_{global} es aproximada más no necesariamente representativa del sector BJ-02.

La constante de reacción con la pared de la tubería (k_w) fue parcialmente obtenida a partir de las constantes k_b y k_{global} , es decir, el error que arrastran las constantes afecta a la k_w . Dada la incertidumbre que acompaña a la k_{global} obtenida, la k_w (0.128 m/día) también se considera aproximada.

El primer muestreo fue realizado entre diciembre 2022 y febrero 2023, el segundo muestreo se llevó a cabo entre mayo y junio 2023. En ambos muestreos, todas las muestras de agua tomadas directamente de la red tenían una concentración de cloro libre dentro de los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1-2021. En promedio, la concentración de cloro registrada entre diciembre y febrero fue superior a la registrada entre mayo y junio. Se especula que esta variación se debe al cambio de temperatura y cambios en hábitos de consumo estacionales, sin embargo, no se puede concluir la causa con certeza.

Durante los horarios de mayor consumo de agua potable, la permanencia del agua en la red de estudio es relativamente corta, y la disminución en la concentración de cloro es poca. Por otro lado, en la madrugada, es decir, durante los horarios de menor consumo, el agua se mantiene más tiempo en la red y la concentración puede disminuir a valores por debajo de los permisibles. Los muestreos se llevaron a cabo entre las 9:00 am y las 6:00 pm, y las mediciones siempre reflejaron un contenido de cloro dentro de los límites, sin embargo, dado que no se realizaron mediciones durante la madrugada, se desconoce si en estos horarios la concentración de cloro realmente no cumple con la normativa. No obstante, tomando en cuenta las mediciones de cloro directas, el tiempo de retención hidráulico estimado en el modelo y el ritmo de decaimiento descrito por las constantes, se concluye que un monitoreo regular de la concentración de cloro que entra al sector es suficiente para asegurar la concentración permisible de cloro libre residual que llega a los usuarios.

Las constantes de reacción en el seno del fluido y con la pared dan paso a comparar en qué magnitud contribuyen ambos mecanismos de reacción al decaimiento global del cloro, una reacción más significativa en el seno del fluido puede indicar una baja calidad del agua de origen, y una reacción de mayor magnitud en la pared puede indicar material de tubería muy reactivo o diámetros pequeños. En este caso, la k_b (2.21 d^{-1}) y la k_{pared} (2.428 d^{-1}) tienen un porcentaje de aportación similar. Mientras que un estudio similar para una red en la ciudad de Azogues en Ecuador obtuvo una k_b de 3.71 d^{-1} y una k_{pared} de 1.34 d^{-1} , en esta publicación se concluye que el elevado valor para describir la reacción en el seno del fluido puede deberse a la concentración de materia orgánica en el agua (García Ávila, 2019).

El uso de las constantes de decaimiento del cloro en el modelo hidráulico en EPANET para construir un modelo de calidad, da a conocer la concentración de cloro libre residual en alrededor de 50 puntos a lo largo del sector. El modelo de calidad permite auxiliar al organismo operador en el monitoreo y control de la calidad de

agua que abastece al sector BJ-02. El modelo estima la concentración que llega a los usuarios sin la necesidad de muestrear individualmente en los predios, identifica los puntos más vulnerables a no recibir agua potable con los límites permisibles de cloro, estima las concentraciones mínimas para cubrir los límites permisibles en todo el sector, y permite evaluar si la cantidad de cloro suministrada es suficiente.

Otro potencial uso de las constantes de decaimiento del cloro obtenidas y las conclusiones previamente expuestas, es la extrapolación de esos resultados a otros sectores con características similares a las del sector BJ-02. Características como la temperatura, la magnitud del sector y el origen del agua son relativamente sencillas de extrapolar a sectores cercanos, sin embargo, el material, edad y diámetro de tuberías, así como la cantidad y tipo de usuarios requieren una previa revisión de los sectores en cuestión. Si las condiciones bajo las que opera el sector BJ-02 son similares a las de otros sectores cercanos de la Ciudad de México, potencialmente se puede inferir un ritmo de decaimiento de cloro libre similar, y, como es el caso en el sector actual, un monitoreo regular de calidad a la entrada del otro sector puede también ser suficiente para asegurar la concentración de cloro requerida por la normatividad mexicana.

La determinación de las constantes de decaimiento del cloro, así como el desarrollo del modelo hidráulico y de calidad, funcionan como herramientas de información que aportan a una gestión integral del abastecimiento, es decir, que tome en cuenta no sólo la cantidad sino la calidad del agua potable.

Referencias

- Agencia Digital de Innovación Pública. (2022). *Sistema Abierto de Información Geográfica (SIGCDMX)*. <https://sig.cdmx.gob.mx/>
- Arevalo, J. M. (2007). *Modeling Free Chlorine And Chloramine Decay In A Pilot Distribution System* [Doctoral, University of Central Florida]. <http://library.ucf.edu>
- Carmona Paredes, R. B. (2020, April). Empleo de nuevas tecnologías para detectar fugas. *Revista IC, CICM*, 26–29.
- Chang, R. (2010). *Química* (10th ed.). McGraw-Hill.
- CONAGUA. (1994). *Datos Básicos*.
- CONAGUA. (2019a). Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento. In *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. 23). www.conagua.gob.mx
- CONAGUA. (2019b). Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución. In *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. 13). www.conagua.gob.mx
- Degu, G., & Yigzaw, T. (2006). *Research Methodology*. University of Gondar.
- Fisher, I., Kastl, G., Sathasivan, A., & Jegatheesan, V. (2011). Suitability of chlorine bulk decay models for planning and management of water distribution systems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(20), 1843–1882. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.495639>
- García Ávila, F. (2019). *Modelo de decaimiento de cloro libre en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Azogues, Ecuador* [Doctorado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- García-Ávila, F., Sánchez-Alvarracín, C., Cadme-Galabay, M., Conchado-Martínez, J., García-Mera, G., & Zhindón-Arévalo, C. (2020). Relationship between chlorine decay and temperature in the drinking water. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101002>
- Hernández Sampieri, Roberto., Fernández Collado, Carlos., & Baptista Lucio, Pilar. (1991). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- IMTA, C. S. (2022). *Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores*. <http://www.pigoo.gob.mx/organismosoperadores.jsp>
- INEGI. (2022a). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- INEGI. (2022b). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Kiéné, L., Lu, W., & Lévi, Y. (1998). Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems. *Water, Science & Technology*, 38.
- Kim, H., & Kim, S. (2017). Evaluation of chlorine decay models under transient conditions in a water distribution system. *Journal of Hydroinformatics*, 19(4), 522–537. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.082>

- Kowalska, B., Hołota, E., & Kowalski, D. (2018). Simulation of chlorine concentration changes in a real water supply network using epanet 2.0 and watergems software packages. *WIT Transactions on the Built Environment*, 184, 39–48. <https://doi.org/10.2495/FRIAR180041>
- Kreyszig, E. (1973). *Introducción a la Estadística Matemática* (Primera Edición). Limusa Wiley.
- Lechevallier, M. W., Besner, M.-C., Friedman, M., & Speight, V. L. (2011). Microbiological Quality Control in Distribution Systems. In American Water Works Association (Ed.), *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6th Edition, pp. 21.1-21.84). McGraw-Hill. www.accessengineeringlibrary.com
- López, J. (2019, April 8). Gobierno capitalino analiza nueva fuente hídrica. *Excelsior*.
- Monteiro, L., Figueiredo, D., Dias, S., Freitas, R., Covas, D., Menaia, J., & Coelho, S. T. (2014). Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. *Procedia Engineering*, 70, 1192–1200. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.132>
- Mostafa, N. G., Matta, M., Abdel-Halim, H., Matta, M. E., & Halim, H. A. (2013). Simulation of Chlorine Decay in Water Distribution Networks Using EPANET-Case Study. *Civil and Environmental Research*, 3(13), 100–116. <https://www.researchgate.net/publication/272349818>
- Muhammad, N. S., Shin, S. M., & Abdullah, J. (2021). Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System Using EPANET. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(3), 94–99. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.011>
- O&M Manual, Metrinet Controller*. (n.d.). Analytical Technology, Inc.
- Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., & Simms, J. (2000). *FACTORS WHICH CONTROL BULK CHLORINE DECAY RATES*. 117–126. www.elsevier.com/locate/watres
- Ramos, H. M., Loureiro, D., Lopes, A., Fernandes, C., Covas, D., Reis, L. F., & Cunha, M. C. (2010). Evaluation of chlorine decay in drinking water systems for different flow conditions: From theory to practice. *Water Resources Management*, 24(4), 815–834. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9472-8>
- Roberson, J. A., & Burneson, E. G. (2011). Drinking Water Standards, Regulations, and Goals. In American Water Works Association (Ed.), *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6th Edition, pp. 1.1-1.40). McGraw-Hill. www.accessengineeringlibrary.com
- Rodríguez Ruiz, J. (2020). *Coeficiente de decaimiento del cloro en tuberías de diferentes materiales en redes de distribución de agua potable* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 User's Manual* (U.S. Environmental Protection Agency, Ed.).
- Rossman, L. A., Clark, R. M., & Grayman, W. M. (1994). Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 803–820. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1994\)120:4\(803\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1994)120:4(803))
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. (n.d.). *Ciudad MX*. Retrieved August 9, 2022, from <http://ciudadmx.cdmx.gob.mx:8080/seduvi/>
- Singer, P. C., & Reckhow, D. A. (2011). Chemical Oxidation. In American Water Works Association (Ed.), *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6th Edition, pp. 17.1-17.52). McGraw-Hill. www.accessengineeringlibrary.com

Triola, M. F. (2004). *Estadística* (9th ed.). Pearson.

Tzatchkov, V., Hugo, V., Yamanaka, A., Ignacio, F., & Cortés, A. (2004). Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución. *Ingeniería Hidráulica En México, XIX*, 41–51.

Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., & Clark, R. M. (1997). Kinetics of chlorine decay. *Journal / American Water Works Association, 89*(7), 54–65. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x>