

Ingeniería y Ciencia, ing. cienc. ISSN 1794-9165
Volumen 8, número 15, enero-junio de 2012, páginas 9-30

Evaluación de las condiciones de mezcla y su influencia sobre el cloro residual en tanques de compensación de un sistema de distribución de agua potable

Evaluation of mixing conditions and its influence over free residual chlorine in a surge tank of a drinking water distribution system

Avaliação das condições de mistura e sua influência sobre o cloro residual em tanques de compensação de um sistema de distribuição de água de abastecimento

C. Montoya¹, C. H. Cruz², P. Torres³
S. Laín⁴ y J. C. Escobar⁵

Recepción: 21-jul-2011/Modificación: 27-mar-2012/Aceptación: 17-abr-2012
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

¹ MSc en Ing.: énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental, caromoto@gmail.com, Asistente de Investigación Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, Cali-Colombia.

² MSc en Ing. Civil: Hidráulica y Saneamiento, camilo.cruz@correounivalle.edu.co, Profesor Asociado, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, Cali-Colombia.

³ PhD en Ing. Civil: Hidráulica y Saneamiento, patricia.torres@correounivalle.edu.co, Profesora Titular, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, Cali-Colombia.

⁴ PhD en Ciencias Físicas, Doctor Habilitado en Ciencias de la Ingeniería: Grupo de investigación en Mecánica de Fluidos, slain@uao.edu.co, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Occidente, Cali-Colombia.

⁵ PhD en Ing. Civil: Hidráulica y Saneamiento, jcescobar@emcali.com.co, Jefe de Operación Planta Puerto Mallarino, Empresas Municipales de Cali (EMCALI EICE ESP)

Resumen

Se llevó a cabo una evaluación a escala real de las condiciones de mezcla y su influencia sobre la calidad del agua en un tanque de compensación del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali (Colombia). El estudio hidrodinámico con aplicación continua de trazador y mediciones de temperatura y de cloro residual libre para identificar el régimen de mezcla en su interior, tiempos de residencia, estratificación térmica y la variación del cloro en el agua almacenada, evidenciaron el comportamiento propio de un tanque de compensación. Se encontró además que la recirculación y el intercambio insuficiente de agua, los bajos de flujo de momento asociados a caudales pequeños y la estratificación térmica puntual pueden causar elevados tiempos de residencia en el tanque, altas edades del agua, mezcla insuficiente y pérdida importante del cloro residual libre. La metodología aplicada en este estudio es apropiada para la evaluación y optimización de tanques de compensación en sistemas de distribución de agua potable.

Palabras claves: edad del agua, calidad del agua, cloro residual libre, decaimiento del cloro, estratificación térmica, régimen de mezcla, tanque de compensación, temperatura, trazador.

Abstract

We performed a real scale evaluation of mixing conditions and its influence on water quality in a compensation tank of drinking-water distribution system located in the city of Cali, Colombia. The hydrodynamic study with continuous injection of tracer, and temperature and free chlorine measurements for identifying the mixing regime in the tank's interior, residence time, thermal stratification, and chlorine variations in the stored water showed the typical characteristics of a compensation tank. We concluded that water recirculation, inadequate water exchange, low moment fluxes associated with low velocity flows, and punctual thermal stratification could lead to high water age, high residence times in the tank, inadequate mixing, and important loss of free residual chlorine. The methodology developed is suitable for evaluation and optimization of compensation tanks of drinking water distribution systems.

Key words: water age, water quality, free residual chlorine, chlorine decay, thermal stratification, mixing regime, compensation tank, temperature, tracer.

Resumo

Foram avaliadas em escala real, as condições de mistura e sua influência sobre a qualidade de água num tanque de compensação do sistema de distribuição de água de abastecimento da cidade de Cali (Colômbia). O estudo da hidrodinâmica com aplicação contínua de traçador e medições de temperatura e de cloro residual livre para identificar o regime de mistura no interior, tempos

de residência, estratificação térmica e a variação do cloro na água armazenada, evidenciaram o comportamento próprio de um tanque de compensação. Encontrou-se também que a recirculação e o intercâmbio insuficiente da água, as quedas de fluxo de momento associadas a pequenas vazões e a estratificação térmica pontual, podem causar elevados tempos de residência no tanque, elevada idade da água, mistura insuficiente e perda importante do cloro residual livre. A metodologia aplicada neste estudo, é apropriada para a avaliação e otimização de tanques de compensação em sistemas de distribuição de água de abastecimento.

Palavras chaves: idade da água, qualidade da água, cloro residual livre, decaimento do cloro, estratificação térmica, regime de mistura, tanque de compensação, temperatura, traçador.

1 Introdução

En los sistemas de abastecimiento de agua se utilizan tanques de almacenamiento al inicio (generalmente denominados tanques de distribución) o ubicados estratégicamente en la red (zonas intermedias o final) con el fin de compensar las variaciones de consumo de agua o regular las presiones de servicio. La calidad del agua en estas estructuras se afecta por la mezcla generada con el chorro de agua que ingresa al tanque en los periodos de llenado, la geometría, el volumen, las variaciones de temperatura y la configuración de la entrada. Los estudios de campo (ensayos de trazadores, mediciones de temperatura y cloro, entre otros) y la modelación son herramientas que permiten evaluar las condiciones de mezcla en tanques [1], pero existe poca información publicada sobre tanques de compensación. Deficiencias en el diseño u operación de los tanques promueven la inadecuada mezcla en su interior y como consecuencia se incrementa la edad del agua, fomentándose así la formación de subproductos de la desinfección y la pérdida del desinfectante residual, lo que favorece el recrecimiento de microorganismos en el sistema (incluyendo patógenos), origina problemas de olor y sabor en el agua y provoca recontaminación en la red [2].

La mezcla de un fluido requiere de una fuente de energía; dado que en los tanques de almacenamiento no se cuenta con dispositivos mecánicos para mezclar el agua almacenada, debe aprovecharse la energía del chorro (preferiblemente turbulento con números de Reynolds mayores a 3000) que se forma cuando el agua entra por la tubería hacia la masa de agua [3] y por lo tanto debe evitarse que éste choque contra las paredes o deflectores para no desaprovechar

su energía [1], [4].

Cuando se presentan diferencias entre la temperatura del agua que ingresa y la que está almacenada, se genera otra fuente de movimiento por las diferencias de densidad. Bajo estas condiciones, se habla de chorro flotante y se considera flotabilidad positiva cuando el agua que ingresa es más caliente que la almacenada, provocando que esta última permanezca en el fondo del tanque por ser más densa y la más fresca se sitúe en la superficie. Cuando el agua que ingresa es más fría que la almacenada, sucede lo contrario. De acuerdo con [5], la estratificación térmica puede cambiar el régimen de mezcla de completamente mezclado a flujo pistón, lo cual debe evitarse para mantener la calidad del agua almacenada ya que así se favorece la aparición de zonas muertas.

La investigación en calidad de agua en tanques de almacenamiento de agua potable se ha desarrollado a través de dos herramientas: estudios en campo y modelación (a escala física, de sistemas y la computacional). Diversos autores han aplicado los estudios de campo en tanques de distribución como métodos válidos para evaluar la calidad del agua potable almacenada. En [6], Boulos y colaboradores realizaron un ensayo de trazador y mediciones de cloro residual libre en un tanque cilíndrico con entrada y salida simultánea de agua y volumen de $8815,35 m^3$, encontrándose un incremento significativo del trazador en la parte superior del centro del tanque, tomándose más de 24 horas para que el volumen de agua en el centro fuera reemplazado; las concentraciones de cloro en entrada y salida variaron entre 0,01-0,11 mg/L y los resultados obtenidos indicaron que el tanque estudiado presentó un patrón de flujo conformado por un cilindro anular que se extendió desde las paredes hacia el centro con un núcleo cilíndrico.

En cuanto a los ensayos de trazadores, la mayoría de los estudios que se reportan son ejecutados en tanques de distribución y el procesamiento de los resultados permite la aplicación de diversos modelos empíricos para establecer si los reactores se comportan con mezcla completa, flujo pistón o combinación de ambos. En [7], Grayman y colaboradores presentaron un consolidado de tres estudios que incluyeron ensayos de trazadores y mediciones de cloro residual libre y temperatura en tanques con ciclos de llenado-vaciado; dichos

estudios describieron la distribución del trazador al interior de cada reactor y establecieron que éstos presentaron buena mezcla con identificación de algunas zonas muertas, pérdida de cloro e incremento de la temperatura del agua en aproximadamente 1 °C en las horas del día.

De acuerdo con [5], los autores monitorearon durante 3,5 meses la temperatura del agua almacenada en dos tanques de compensación, usando doce termistores en cada tanque. Los resultados obtenidos se escalaron basados en el cambio de temperatura de un reactor completamente mezclado (RCM) y se determinó el intercambio local y global de agua; el estudio ratificó que la relación de escala de longitud (Fd/H . F: número de Froude; d: diámetro tubería de entrada; H: nivel de agua) controla el inicio del estancamiento en tanques de compensación. También se encontró que la estratificación térmica de la masa de agua pudo cambiar el régimen de RCM a pistón, lo cual ocasionó que el intercambio local de agua se redujera en un 20-30 % en la superficie del agua y en un 80-90 % en el fondo. Los autores indicaron que las relaciones críticas de escala de longitud encontradas en su investigación pueden ser referencia para otros tanques con similares geometrías y relaciones de aspecto (H/D . D: diámetro del tanque).

Mahmood y colaboradores [1] estudiaron tres tanques (superficial, elevado y esbelto) a través del monitoreo en campo de temperatura y del cloro residual y a través de la simulación computacional de la inyección de trazador en los mismos. Los resultados de temperatura mostraron variaciones cíclicas de esta variable de acuerdo con los ciclos de llenado-vaciado de los tanques, identificándose amplia estratificación térmica entre un punto medio del nivel del agua y la superficie libre (entre 0,45 y 1,70 °C). Los autores también encontraron adecuada concordancia entre los datos de cloro y temperatura medidos en campo. La modelación computacional permitió recomendar la reducción del diámetro de la tubería para incrementar el momento y evitar el choque del chorro de agua que ingresa a los tanques contra las paredes para prevenir la pérdida de momento y favorecer la mezcla. Luego de realizar dichas modificaciones, nuevas mediciones en campo de temperatura permitieron establecer que los datos medidos en la superficie y fondo del agua convergieron en la noche, indicando adecuada mezcla.

En la ciudad de Cali existen 34 tanques de almacenamiento de los cuales

12 funcionan como unidades de compensación; de éstos se destaca el sistema ubicado en el extremo sur de la red (sector Ciudad Jardín - Figura 1), el cual cuenta con dos tanques ($T1$ y $T2$), de concreto y volúmenes de 7500 y 1000 m^3 , respectivamente. También hay una estación de bombeo que impulsa el agua desde $T1$ hacia un tanque metálico a través de una tubería de 16" de diámetro y de hierro dúctil. $T1$ es superficial, cilíndrico y tiene un diámetro interno igual a 35,12 m y altura máxima de agua de 7,74 m (relación $D/H = 4,54$), el cual se abastece de una estación de bombeo mediante una tubería de hierro fundido de 20" de diámetro, ubicada cerca del perímetro y a ras del piso, funcionando como entrada/salida.



Figura 1: Ubicación de $T1$ en el sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali.

Dado que $T1$ se encarga de compensar las presiones en el sector que abastece, éste presenta periodos de llenado con duración entre 7 y 17 horas y periodos de vaciado con duración entre 4,75 y 16,75 horas, de acuerdo con lo encontrado en este trabajo. El presente estudio corresponde a la evaluación a escala real de las condiciones de mezcla que se presentan en este tanque de compensación, así como las variaciones de temperatura y de cloro residual libre del agua. También se analizó el fenómeno de recirculación del agua y su efecto sobre el tiempo de retención debido a los ciclos de llenado-vaciado que presentan este tipo de estructuras.

2 Metodología

2.1 Montaje experimental

Para desarrollar el trabajo de campo fue necesario instalar un montaje al interior del tanque compuesto por dos bombas sumergibles y dos termocuplas en el centro y perímetro, utilizando la ventilación central y el acceso perimetral (Figura 2a), respectivamente. Las bombas tenían un peso sujetado a ellas para garantizar que se mantuvieran sumergidas verticalmente y se manipularon a través de un sistema de guayas y carretes con cuenta vueltas para trasladarlas de un punto a otro (Figura 2b). En el exterior, se contó con un centro de operaciones en el cual se ubicaron los equipos y el personal de campo ejecutando las mediciones y reportando los datos requeridos. Durante todo el trabajo de campo se registraron los niveles de agua en el tanque para establecer los ciclos de llenado-vaciado y calcular los caudales correspondientes.

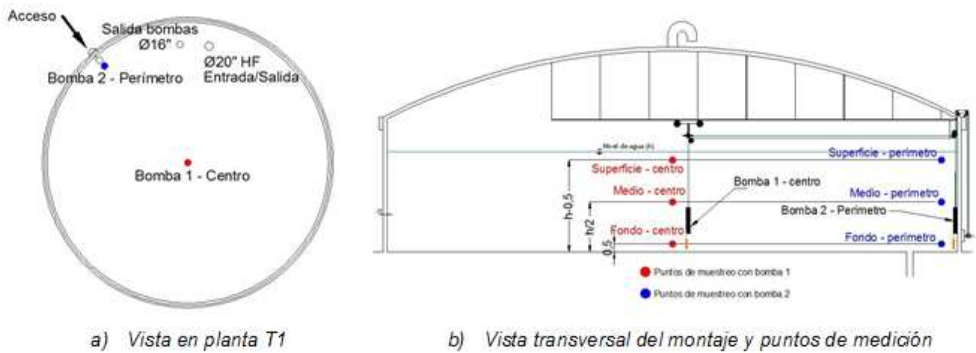


Figura 2: Montaje experimental y puntos internos de medición en T1.

2.2 Ensayo de trazador

El ensayo fue de tipo continuo durante un periodo de llenado que duró 11 horas; el trazador utilizado fue cloruro de sodio; la variable de respuesta fue conductividad, usando un conductivímetro marca HACH hq30D flexi (error de $0,1 \mu S/cm$) y la concentración de sodio se determinó a través de una curva de calibración construida en laboratorio. La inyección se realizó en la tubería de entrada a través de una bomba neumática marca Wilden para regular el caudal de inyección a través del control de la cantidad de aire, teniendo en cuenta que el caudal que ingresa al tanque no es constante. Una vez terminada la inyección del trazador, se continuó la medición de conductividad durante 13 días más, verificando así que el trazador hubiese salido completamente del tanque.

Como se observa en la Figura 2b, se consideraron 6 puntos de muestreo al interior del tanque, 3 en centro y 3 en perímetro, los cuales correspondieron a fondo, medio y superficie de acuerdo con el nivel de agua existente en el momento de la toma de muestras, iniciándose en el fondo del tanque, luego se trasladaban las bombas al medio y por último a la superficie; luego se volvía al fondo, repitiendo el mismo procedimiento durante todo el trabajo de campo. Adicionalmente se midió en la entrada/salida y salida hacia la estación de bombeo.

2.3 Medición de temperatura y cloro residual libre

La medición de temperatura y cloro residual libre se realizó durante 9 días que incluyeron 5 días hábiles y 4 de fin de semana, lo cual coincidió con el momento en el que el trazador había alcanzado la mezcla completa en el tanque. El cloro residual libre se midió con un colorímetro portátil marca HACH (error de 0,01 mg/L) y la temperatura con dos termocuplas tipo J en bulbo de 3/16x15 cm y termómetro marca Fluke (error de 0,1 °C). El montaje y puntos de muestreo fueron los mismos ilustrados en la Figura 2b.

2.4 Análisis de datos

A partir de los resultados del ensayo de trazador se determinó el momento en el que se alcanzó buena mezcla en el tanque a partir del cálculo del coeficiente de variación (CV), tal como lo propusieron [3] y considerando como criterio CV menores a 0,1, representando que el tiempo en el que se alcanza dicho valor no debe ser mayor a la duración de los periodos de llenado del tanque. El análisis de los datos de cloro residual libre y temperatura se apoyó en gráficas y se contrastaron con la Resolución 2115 [8] y con la reglamentación estadounidense [9].

Para los datos de temperatura en cada periodo de operación, se aplicó análisis de varianza -ANOVA- de dos factores para establecer diferencias estadísticamente significativas entre la posición radial, profundidad y la interacción de estos dos y para los modelos que no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se realizó la prueba de aleatorización que es una alternativa no paramétrica para el análisis bifactorial [10]; estas pruebas estadísticas se analizaron con una significancia del 5%.

Para estas mismas dos variables se aplicaron los conceptos desarrollados por [3] sobre intercambio de agua y estratificación térmica. Estos autores establecieron que el porcentaje de intercambio de agua mínimo que debe presentarse para alcanzar buena mezcla, en función del volumen de agua al inicio de los periodos de llenado, nuevo volumen que ingresa y diámetro de tubería de entrada (1) debe ser menor a la duración de los periodos de llenado. En cuanto a la estratificación térmica, definieron una expresión para calcular el diferencial

de temperatura crítico necesario para evitar la estratificación térmica, para un rango de temperatura del agua entre 10-30 °C (2).

$$\frac{\Delta V}{V} > \frac{9d}{V^{1/3}} \quad (1)$$

Donde:

ΔV : Nuevo volumen de agua que ingresa al tanque durante el periodo de llenado (m^3)

V : volumen de agua al inicio del periodo de llenado (m^3)

d : diámetro de tubería de entrada al tanque (m)

$$|\Delta T| < \left(\frac{9,371}{gC^2} \right) \left(\frac{Q^2}{H^2 d^3} \right) \quad (2)$$

Donde:

ΔT : diferencia de temperatura entre el agua almacenada y la que ingresa (°C)

g : aceleración de la gravedad (m^2/s)

C : coeficiente experimental para tanques (1,5 para entrada vertical y flotabilidad positiva, 0,8 para entrada vertical y flotabilidad negativa)

Q : caudal de entrada (m^3/s)

H : nivel de agua (m)

d : diámetro de tubería de entrada al tanque (m).

3 Resultados y Discusión

3.1 Niveles y caudales

En la Figura 3 se presentan los niveles de agua y caudales calculados para el tanque, en la cual los caudales negativos representan los periodos de vaciado. La curva de nivel muestra que los niveles al final de los periodos de vaciado se encontraron entre 1,93 y 6,00 m y al final de los periodos de llenado entre 4,44 y 7,62 m, destacándose que durante los primeros nueve días de mediciones se intercalaron día de por medio niveles mínimos altos (4,13 - 5,95 m) con niveles mínimos bajos (2,21 - 3,34 m). Posterior al día noveno, se repitieron niveles mínimos bajos (1,77 y 2,42 m) y los últimos dos días del estudio se presentaron niveles mínimos altos (4,35 y 4,71 m).

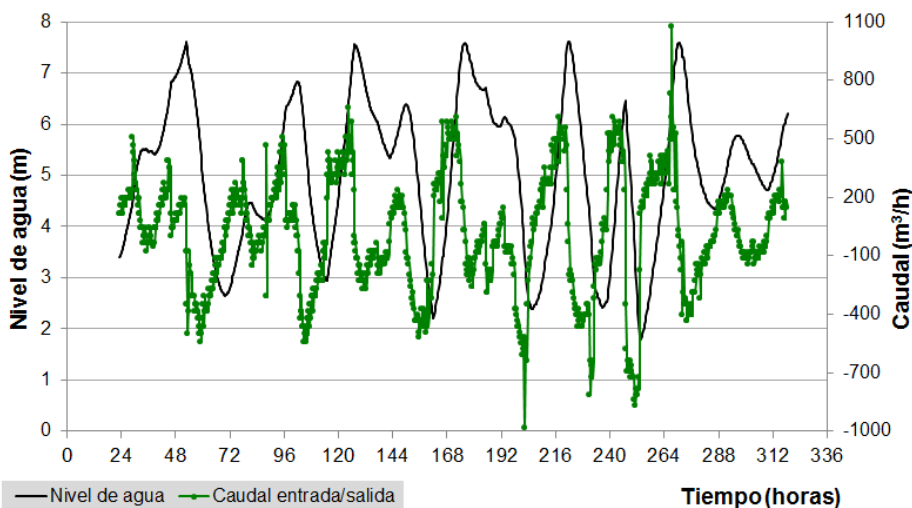


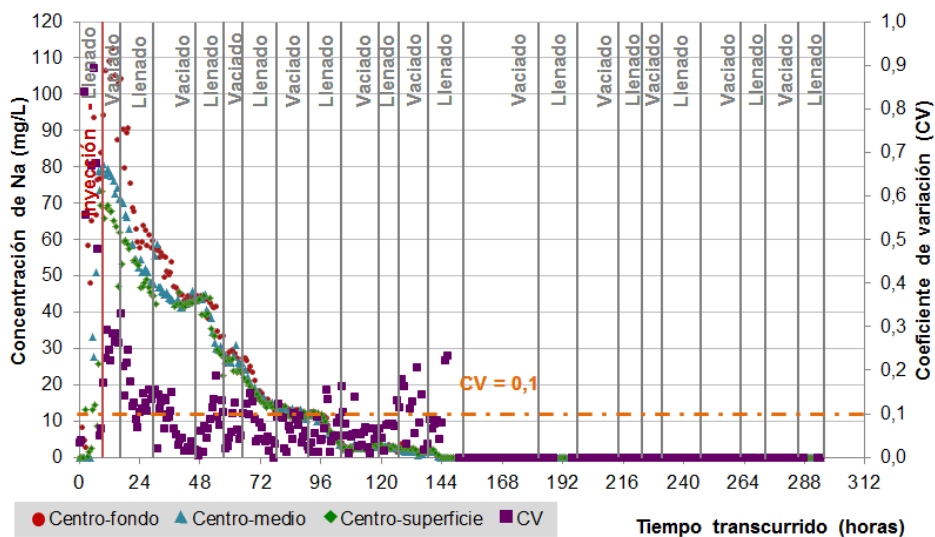
Figura 3: Variación de niveles y caudales en el tanque.

De la Figura 2 se resalta que la duración de los periodos operativos del tanque fue heterogénea, pues la duración de un periodo de llenado varió entre 7 y 17 horas y la del vaciado entre 4,75 y 16,75 horas; durante los días domingo se presentaron menores consumos de agua que en otros días de la semana, situación que históricamente se ha dado debido al cambio de hábitos rutinarios de la población abastecida por este tanque. Lo anterior permite verificar lo

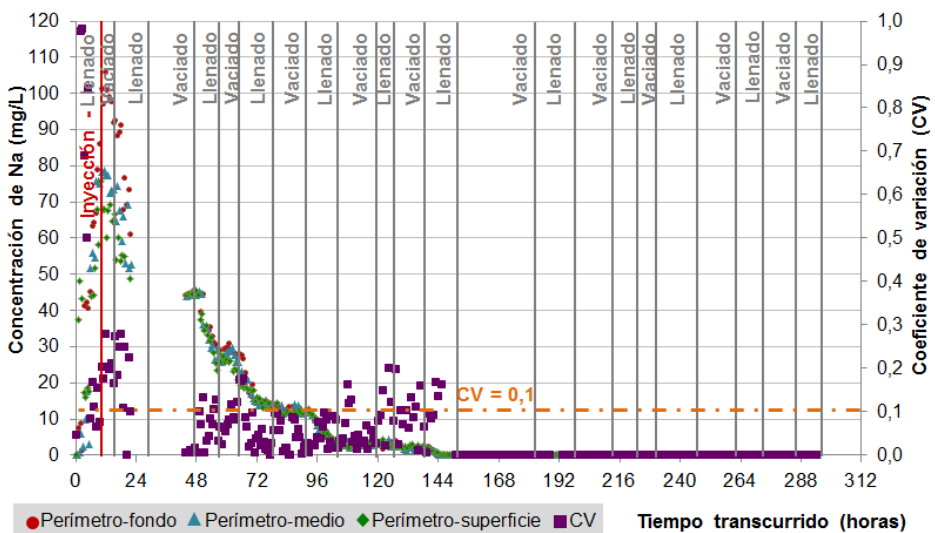
establecido para la operación del tanque que considera mantenerlo lleno y sostener niveles mínimos altos, lo cual podría provocar altas edades del agua y aumento del decaimiento del cloro residual libre, como se verá más adelante. Los valores de caudales están en concordancia con los niveles de agua medidos, pues cuando se presentaron los niveles más bajos se produjeron los caudales de salida más altos y viceversa. Durante los periodos de llenado, los caudales oscilaron entre 29,1 y 1075,3 m^3/h , dando lugar a flujos de momento entre 3×10^{-4} y 0,44 m^4/s^2 y durante los periodos de vaciado los caudales oscilaron entre 29,1 y 988,1 m^3/h .

3.2 Ensayo de trazador

La Figura 4 muestra el comportamiento del trazador en los perfiles verticales de centro y perímetro del tanque, en la cual se observa que el trazador llegó casi al mismo tiempo a las tres profundidades evaluadas tanto en centro como en perímetro. Adicionalmente, en el perfil vertical de trazador de centro y perímetro se observa que durante las primeras 40,5 horas del ensayo la concentración de trazador es mayor en el fondo, seguido por el medio y luego por la superficie, evidenciando que el trazador se transporta de abajo hacia arriba durante este periodo de tiempo, lo cual podría estar asociado con la permanencia del agua fresca en el fondo del tanque y la más antigua en la superficie como se explicará más adelante. Luego de la hora 40,5, la mayoría de los CV son menores a 0,1, indicando buena mezcla. Sin embargo, debe prestarse atención a la interpretación del tiempo de mezcla, ya que el encontrado para este tanque a partir de los perfiles verticales de centro y perímetro no necesariamente es el mismo para toda la masa de agua, tal como lo planteó [11].



a) Perfil vertical del centro



b) Perfil vertical del perímetro

Figura 4: Comportamiento del trazador en centro y perímetro de T1.

La comparación del trazador entre centro y perímetro a las mismas profundidades permitió establecer que no se observan diferencias entre estos puntos. Por otra parte y como se observa en la Figura 5, las mayores concentraciones de trazador se presentaron en la salida hacia la estación de bombeo (valor máximo: 123,82 mg/L), mientras que en la entrada/salida del tanque se presentó un valor máximo de 64,75 mg/L en el primer periodo de vaciado, pero en los siguientes las concentraciones de trazador en ambas salidas de agua fueron similares. Lo anterior refleja que al interior del tanque se presentaron corrientes de flujo que podrían haber transportado el trazador en mayor o menor cantidad hacia ciertas zonas del tanque. El comportamiento del trazador al interior, en la salida hacia la estación de bombeo y en la entrada/salida del tanque muestra que éste salió totalmente del tanque sobre las 133 horas (5,5 días).

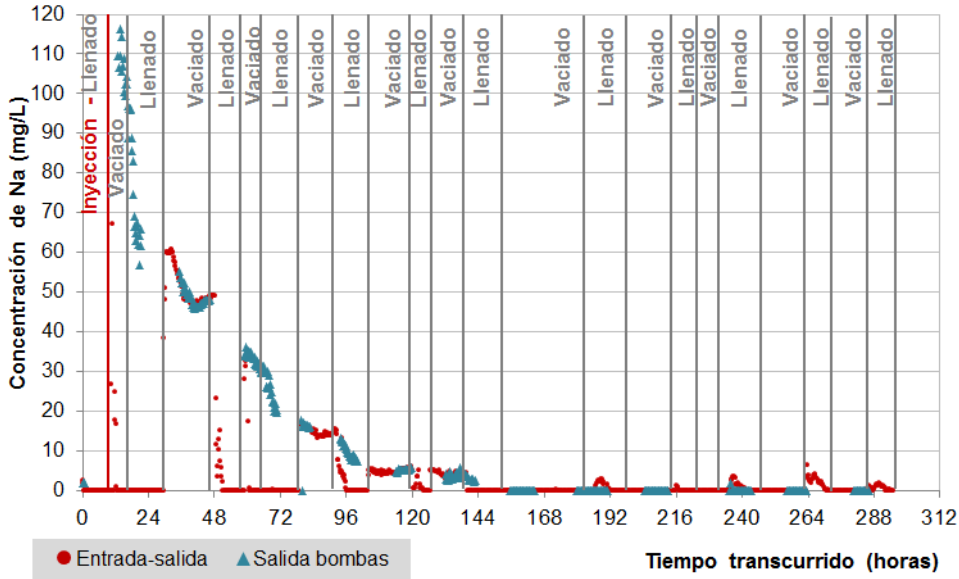


Figura 5: Comportamiento del trazador en centro y perímetro de T1.

Teniendo en cuenta los desarrollos conceptuales de [3] sobre tiempos de mezcla e intercambio de agua, puede afirmarse que este tanque presenta deficiencias en cuanto a su mezcla pues el tiempo en el que se alcanzan condiciones

adecuadas de ésta ($CV < 0,1$) es mayor que la duración de los periodos de llenado (29,5 horas vs. 7-17 horas). Adicionalmente y como ya se preveía con el comportamiento de los niveles finales de los periodos de vaciado, la operación del tanque no permite un intercambio de agua adecuado ya que éste varió entre el 1 y 20 %, mientras que lo requerido para asegurar condiciones de buena mezcla fue 25-38 %. Lo anterior podría estar asociado a que los flujos de momento generados por los caudales de los periodos de llenado son insuficientes para generar adecuada mezcla al interior del tanque estudiado ($3 \times 10^{-4} - 0,44 \text{ m}^4/\text{s}^2$).

Cabe destacar que, de acuerdo con las mediciones de trazador en la entrada/salida del tanque y como es de esperarse en este tipo de estructuras, se recircula el agua en un 14,7 % en promedio, lo cual representa que los altos tiempos de retención en éste también están asociados con el reingreso de una masa de agua que ha estado previamente almacenada en él. Los resultados del ensayo de trazador evidencian la necesidad de ajustar la operación de este tanque de compensación para mantener niveles más bajos de los actuales al final de los periodos de vaciado.

El trabajo desarrollado por [12] sobre modelación hidráulica de la red en el sector Ciudad Jardín también recomendó cambiar los niveles operativos de T1 con el fin de disminuir la edad del agua en el sector y prevenir el desmejoramiento de la calidad del agua. Para esto los autores ingresaron el tanque a un modelo de EPANET con un tipo de mezcla de doble compartimiento como se sugiere por la literatura para este tipo de estructuras. Adicionalmente, concluyeron que para solucionar el problema de presiones menores a 15 m.c.a en las zonas adyacentes al tanque cuando se cambiara el nivel mínimo de operación, se debía instalar un tramo de tubería de 350 m. y diámetro 6" para abastecer esta parte de la red desde el tanque metálico ubicado en una cota superior.

3.3 Temperatura

La Figura 6 presenta la variación de la temperatura en centro, perímetro, salida hacia estación de bombeo y entrada/salida. En general se nota que la variación de la temperatura en todos los puntos de muestreo

(internos y entrada/salida) presenta un comportamiento cíclico, encontrándose diferencias entre los valores máximos y mínimos entre 2 y 5 °C; dichos valores coinciden con las horas del mediodía (máximos) y de la madrugada (mínimo), reflejando el efecto de la radiación solar sobre el calentamiento del agua durante su almacenamiento.

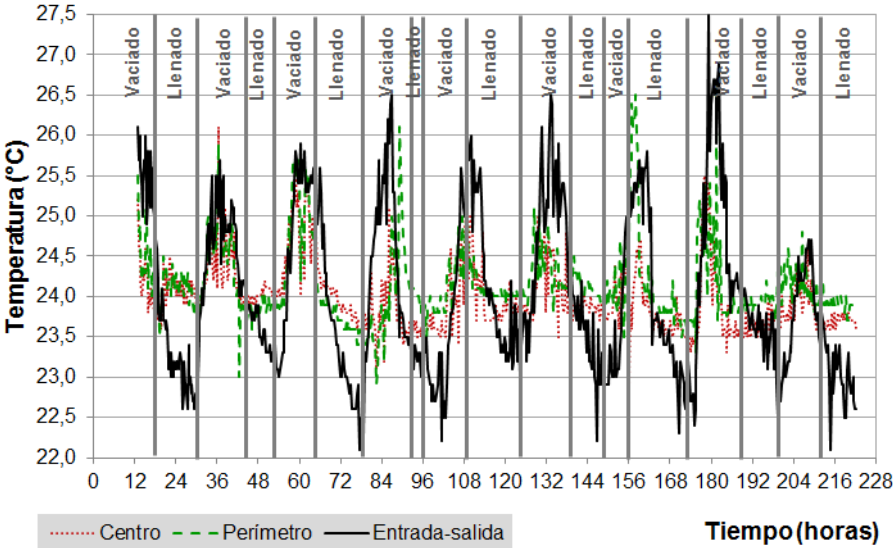


Figura 6: Variación de la temperatura.

En la Figura 6 también se observa que durante los periodos de llenado el agua que ingresa al tanque es más fría que la almacenada. La aplicación del análisis de estratificación térmica desarrollado por [3] muestra que en el tanque estudiado se presentó flotabilidad negativa durante la mayoría de los periodos de llenado que abarcó este trabajo. Dicho análisis permitió identificar que los diferenciales de temperatura entre entrada e interior del tanque oscilaron entre 0,1 y 1,9 °C mientras que el diferencial máximo permitido para evitar la estratificación térmica varió entre 0 y 0,031 °C.

Lo anterior representa que el agua fresca que ingresa al tanque, por ser más fría, es más densa y permanece en el fondo del tanque mientras que la almacenada (de mayor edad) queda encima, provocando que ésta se haga cada

vez más antigua, lo cual puede conllevar a problemas de calidad de agua relacionados con la pérdida del cloro residual. Dicha estratificación podría estar dominando el régimen de mezcla en el tanque ya que el ensayo de trazador indicó que las mayores concentraciones de éste se encontraron en el fondo, seguido por el medio y superficie, durante 40,5 horas.

El análisis de varianza para la temperatura mostró que durante los periodos de llenado existen diferencias estadísticamente significativas entre la superficie y el fondo del tanque (valor-P = $3,4 \times 10^{-3}$) y entre el perímetro y centro (valor-P = $2,6 \times 10^{-10}$), siendo siempre mayor en los primeros por $0,1$ °C en promedio. Esto podría estar asociado con el calentamiento durante el día de la cúpula y paredes del tanque y la transferencia de calor desde éstos hacia la masa de agua y al efecto de la flotabilidad negativa. Durante los periodos de vaciado, se encontró el mismo comportamiento en cuanto a la temperatura de superficie y fondo (valor F percentil 95 = 3,9; valor F observado = 16,5).

Lo anterior resalta la importancia de las mediciones de temperatura tanto al interior como en la entrada/salida de tanques de compensación (y almacenamiento), especialmente en países con clima tropical en los que se presentan variaciones marcadas de esta variable asociadas con los periodos día-noche. Estas mediciones son una herramienta importante para el monitoreo de la hidrodinámica interna de estas estructuras, la cual tiene gran incidencia sobre la calidad del agua almacenada.

Se destaca que mientras estudios como [1] encontraron amplia estratificación térmica en tres tanques con variaciones de temperatura entre un punto medio y la superficie libre entre $0,45$ y $1,70$ °C y que [13] también estableció estratificación térmica por diferenciales verticales de temperatura entre 2 y 3 °C, para el caso de T1 se identificó una estratificación puntual que se presenta en los periodos de llenado mientras se iguala la temperatura del agua que ingresa con la de la almacenada, la cual se calienta en los periodos de vaciado que ocurren durante el día, como se explicó anteriormente.

El análisis de sensibilidad de (2) permitió establecer que sólo al incrementar el caudal cuatro y diez veces, se disminuye el tiempo de estratificación en $1,1\%$ y $19,2\%$, respectivamente; mientras que al reducir sólo el diámetro de

la tubería de entrada a 4" y 2" se disminuye el tiempo de estratificación en 24,9% y 66,7%, respectivamente y, por último, combinando el incremento del caudal cuatro veces y la disminución del diámetro de entrada a 4", se reduce el tiempo de estratificación en un 82,7%; este último escenario origina un promedio de flujo de momento de $19,9 \text{ m}^4/\text{s}^2$, el cual es 45 veces superior al valor máximo obtenido en este estudio.

3.4 Cloro residual libre

La Figura 7 presenta la variación del cloro residual libre en la salida hacia la estación de bombeo y en la entrada/salida del tanque. En general, el cloro residual libre en todos los puntos internos de muestreo y en la entrada/salida presentó el mismo comportamiento de los periodos operativos del tanque, ya que el cloro se incrementa paulatinamente hasta llegar a un valor máximo, luego disminuye hasta un valor mínimo y se repite este ciclo hasta el final del estudio, mostrando el efecto del agua fresca en el periodo de llenado. Así, los valores bajos de cloro obtenidos en cada periodo de llenado se deben al agua proveniente del tanque que quedó retenida en las tuberías y que se devuelve a éste con bajas concentraciones de cloro, luego éstas se incrementan a medida que el tanque empieza a llenarse con agua fresca proveniente de las plantas de potabilización (Figura 7).

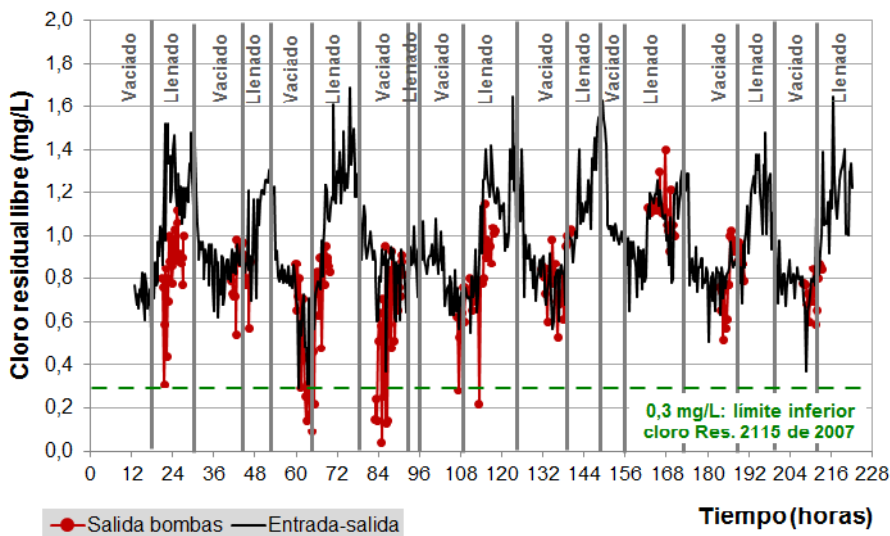


Figura 7: Variación del cloro residual libre.

Las diferencias entre el cloro residual libre en entrada y salida representan el decaimiento de éste en el almacenamiento, como es de esperarse ya que el cloro en el agua es una sustancia no conservativa. Lo anterior también se identificó en los trabajos de [14] y [15]. Tanto en los perfiles verticales como en las posiciones radiales no se observaron diferencias notorias entre la concentración de cloro de cada punto de muestreo. Se destaca que tanto en la entrada/salida como al interior del tanque no se obtuvieron valores de cloro residual menores a 0,3 mg/L (límite inferior para agua potable según la Resolución 2115 de 2007 [8]), exceptuando un dato de la posición perímetro-medio y en la salida del tanque (0,28 y 0,29 mg/L, respectivamente).

La EPA sugiere que el cloro residual libre debe ser al menos 0,2 mg/L, no menor a este valor durante más de 4 horas y no puede ser indetectable en más del 5 % del total de muestras recolectadas en un mes [9]. Dado que se identificaron 16 datos menores a 0,3 mg/L en la salida hacia la estación de bombeo (valor mínimo de 0,04 mg/L) durante los días 3 y 4 del estudio, posiblemente asociado a la evacuación por esta tubería de alguna zona de agua con alta edad del agua, deben tomarse medidas para prevenir el riesgo sanitario. En

este sentido, EMCALI EICE ESP está instalando una estación de recloración en la impulsión de agua hacia el tanque metálico.

Se destaca que el muestreo interno en el tanque no permitió identificar la zona en la que se estaría perdiendo el cloro residual libre, dados los limitados accesos que esta estructura posee, sugiriendo que futuros diseños de tanques deberían contemplar la instalación de accesos para muestreos del agua almacenada en diversos puntos de la estructura. La modelación computacional permitiría la identificación de zonas muertas al interior de los tanques.

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento típico de un tanque de compensación con ciclos de llenado-vaciado y recirculación de agua. El régimen de mezcla al interior del tanque evaluado es ascensional y está dominado por una estratificación térmica puntual; la mezcla completa en el interior se alcanza luego de aproximadamente 29,5 horas y presenta un tiempo máximo de retención de 5,5 días.

El almacenamiento del agua potable en el tanque estudiado ocasiona su calentamiento debido a la transferencia de calor desde la cubierta y paredes hacia la masa de agua. Se identificó estratificación térmica puntual donde el agua que ingresa al tanque permanece en el fondo mientras que la de mayor edad se ubica encima.

El almacenamiento del agua potable en el tanque ocasiona una disminución significativa del cloro residual libre, identificada principalmente en la salida hacia la estación de bombeo y no al interior del tanque. Mediciones en campo en otros puntos internos de $T1$ o la modelación computacional podrían ayudar a identificar las zonas donde estaría ocurriendo dicha disminución.

La operación actual del tanque está afectando negativamente la calidad del agua almacenada, reflejado en un tiempo mezcla mayor a la duración de los periodos de llenado, altos tiempos de residencia del agua, estratificación térmica puntual y pérdida del cloro residual libre por debajo de los límites establecidos en la normatividad. Incrementar el intercambio de agua permitirá mantener

la calidad del agua potable almacenada en términos de cloro residual libre, así como cambiar la configuración de la entrada/salida para generar mayores flujos de momento mejorarán la mezcla.

La metodología de este trabajo permitió identificar las características de mezcla y su influencia sobre la calidad del agua almacenada en un tanque de compensación. Su desarrollo evidenció la necesidad de contar con mayores accesos al interior de esta estructura para identificar posibles zonas de deterioro de la calidad del agua. El diseño de estas estructuras debe incluir mayores puntos de acceso para muestreos internos y los aspectos hidráulicos necesarios para proveer adecuada mezcla del agua, garantizando su calidad hasta el usuario final. Así, la modelación es una herramienta que puede aplicarse para el tanque estudiado, precisando el posible deterioro de la calidad del agua potable almacenada y estudiando la influencia de modificaciones operativas y físicas de éste sobre la calidad del agua.

Agradecimientos

A EMCALI EICE ESP, a Colciencias, a la Universidad Autónoma de Occidente y a la Universidad del Valle por el apoyo técnico y financiero para el desarrollo de este estudio.

Referencias

- [1] F. Mahmood, J. Pimblett, N. Grace, W. Grayman. *Evaluation of water mixing characteristics in distribution system storage tanks*, Journal AWWA, ISSN 2164-4535, **97**(3), 74-88 (2005). Referenciado en 11, 12, 13, 25
- [2] K. Lansey, P. Boulos. *Comprehensive handbook on water quality analysis for distributions systems*, First edition, ISBN 0-9745689-3-7. Ed. MWH Soft, California, 2005. Referenciado en 11
- [3] L. Rossman, W. Grayman. *Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks*, Journal of Environmental Engineering, ISSN 0733-9372, **125**(8), 755-761 (1999). Referenciado en 11, 17, 22, 24
- [4] W. Grayman, L. Rossman, R. Deininger, C. Smith, A. Clifford, J. Smith. *Mixing and aging of water in distribution system storage facilities*, Journal AWWA, ISSN 2164-4535, **96**(9), 70-80 (2004). Referenciado en 12

- [5] O. Nordblom, L. Bergdahl. *Initiation of stagnation in drinking water storage tanks*, Journal of Hydraulic Engineering, ISSN 0733-9429, **130**(1), 49–57 (2004). Referenciado en 12, 13
- [6] P. Boulos, W. Grayman, R. Bowcock, J. Clapp, L. Rossman, R. Clark, R. Deininger, A. Dhingra. *Hydraulic mixing and free chlorine residual in reservoirs*, Journal AWWA, ISSN 2164–4535, **88**(7), 48–59 (1996). Referenciado en 12
- [7] W. Grayman, L. Rossman, C. Arnold, R. Deininger, Ch. Smith, J. Smith, R. Schnipke. *Water quality modeling for distribution system storage facilities*, ISBN-13 978-1583210062. Ed. American Water Works Association, 1999. Referenciado en 12
- [8] Colombia, Ministerio de la Protección Social. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, Resolución 2115. Bogotá D.C, Colombia. 2007. Referenciado en 17, 27
- [9] Environmental Protection Agency EPA. *The Effectiveness of Disinfectant Residuals in the Distribution System*, diciembre de 2010. Referenciado en 17, 27
- [10] E. Edgington. *Randomization Test*, Third Edition, Revised and expanded, ISBN 9780824796693. Ed. Marcel Dekker Inc., New York, 1995. Referenciado en 17
- [11] S. Jayanti. *Hydrodynamics of jet mixing in vessel*, Journal Chemical Engineering Science, ISSN 0009–2509, **56**(1), 193–210 (2001). Referenciado en 20
- [12] J. Rojas, A. Ruiz. *Determinación y evaluación de las constantes de decaimiento de cloro libre y formación de trihalometanos en la red del sistema Nápoles - Ciudad Jardín*, Tesis de Pregrado. Universidad del Valle. Colombia, 2008. Referenciado en 23
- [13] P. Yu-Hung Chuo. *An investigation of a modelling system for assessing the impact of stratification on mixing in drinking water service reservoirs*, Tesis Doctoral. University of New South Wales, 2003. Referenciado en 25
- [14] V. Gauthier, M. Besner, B. Barbeau, R. Millette, M. Prévost. *Storage tank management to improve drinking water quality: case study*, Journal of Water Resources Planning and Management, ISSN 0733–9496, **126**(4), 221–228 (2000). Referenciado en 27
- [15] J. Ecuru, J. Okot-Okumu, T. Okurut. *Monitoring residual chlorine decay and coliform contamination in water distribution network of Kampala, Uganda*, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, ISSN 1119-8362, **15**(1), 167–173 (2010). Referenciado en 27