

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLA EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO PARA AGUA POTABLE MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL –CFD–

Santiago Laín*

Camilo Hernán Cruz**

Yelena Valencia***

Patricia Torres****

Carolina Montoya*****

Recibido: 17/02/2011

Aceptado: 14/07/2011

RESUMEN

Para estimar el comportamiento hidráulico de un tanque de almacenamiento de agua potable se usó un programa para la simulación de dinámica computacional de fluidos, evaluando numéricamente los perfiles de velocidad y el tiempo de mezcla. Los perfiles de velocidad mostraron un valor máximo a la salida de 0,76 m.s-1 y velocidades de 0,2 m.s-1 cerca de las paredes, propiciando zonas de recirculación cerca del chorro de entrada. La inyección del trazador y el coeficiente de variación para 17 puntos de monitoreo en el tanque resultaron en un tiempo de mezcla de 19,06 horas y se verificó que cerca de las paredes la mezcla es menos eficiente que en la trayectoria del chorro de entrada. El volumen necesario que debe entrar al tanque para que haya buena mezcla resultó inversamente proporcional a la masa de agua almacenada.

Palabras clave: dinámica computacional de fluidos (CFD), tanque de almacenamiento de agua potable, tiempo de mezcla, trazador.

* Ing. Ph. D. Grupo de Investigación en Mecánica de Fluidos, Universidad Autónoma de Occidente, Ciudad Universitaria Km 2 vía Cali – Jamundí Calle 25 N° 115-85 Cali – Colombia, Tel. 318 8000 ext. 11882, slain@uao.edu.co

** Ing. M. Sc., Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez Calle 13 N° 100-00 Cali – Colombia, Tel. 321 2266, Fax 331 2175, camilo.cruz@correounivalle.edu.co

*** Ing. Ph. D. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Ciudad Universitaria Meléndez Calle 13 N° 100-00 Cali – Colombia, Tel. 330 2002, patricia.torres@correounivalle.edu.co

**** Ing Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Ciudad Universitaria Meléndez Calle 13 N° 100-00 Cali – Colombia, Tel. 321 2183, Fax 331 2175, caromoto@gmail.com

DETERMINING THE BLEND TIME IN A DRINKING WATER STORAGE TANK THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

ABSTRACT

In order to estimate the hydraulic behavior of a drinking water storage tank, Computational Fluid Dynamic (CFD) simulation program was used to numerically evaluate blend speed and time profiles. Speed profiles showed a maximum value when leaving at 0.76 m.s⁻¹ and 0.2 m.s⁻¹ speeds near walls, creating recirculation areas near the inlet stream. Injection of tracer and the variation coefficient for 17 monitoring points in the tank resulted in a blend time of 19.06 hours and it was found that the blend near walls is less efficient than in the inlet stream trajectory. Necessary volume to enter the tank in order to achieve a good blend was inversely proportional to the water mass stored.

Key words: Computational Fluid Dynamic (CFD); drinking water storage tank; blend time; tracer.

INTRODUCCIÓN

Los tanques de almacenamiento tienen como función hidráulica suministrar agua para consumo humano con las presiones de servicio adecuadas, y en la cantidad necesaria que compense las variaciones de la demanda; asimismo, debe contar con un volumen adicional para suministrar en casos de emergencia como incendios, suspensión temporal de la fuente de abastecimiento y/o paralización parcial de la planta de tratamiento [1-3].

De acuerdo con [4], los tanques de almacenamiento se comportan como reactores y pueden implicar riesgos en la salud de los usuarios, ya que se asocian a diversos problemas como decaimiento del desinfectante, contaminación química, formación de subproductos de la desinfección, generación de olor y sabor en el agua, recrecimiento microbiano en las paredes y fondo de dichas estructuras (biopelícula) y/o en la masa de agua, nitrificación, contaminación con patógenos, corrosión, estratificación térmica y acumulación de sedimentos; todos ellos asociados a deficiencias hidráulicas ocasionadas por determinados patrones de flujo que afectan los tiempos de retención hidráulica, especialmente en aguas con alto contenido de carga orgánica y/o altas temperaturas [5].

Para estudiar los patrones de flujo y la distribución de tiempos de retención de un líquido existen diferentes métodos que van desde los empíricos y experimentales hasta los modelos a escala física o matemática [6]. Uno de los más empleados es el estudio de trazadores y actualmente con el desarrollo de las técnicas computacionales se recurre a soluciones numéricas que pueden ser obtenidas a través de la denominada dinámica computacional de fluidos (CFD en inglés) para realizar aproximaciones numéricas de las ecuaciones de Navier-Stokes [7].

Existen dos tipos ideales de régimen de mezcla en los cuales el agua puede fluir a través del tanque, ya sea completamente mezclada (CM) o flujo pistón (FP); en el primero se produce una mezcla uniforme, y en el segundo, cada volumen de agua

que ingresa al tanque no se mezcla con ningún otro volumen [8], pero en la práctica se encuentra entre estos extremos un amplio espectro de regímenes de mezcla caracterizado por mezcla incompleta o no instantánea, provocada por distintos fenómenos como cortocircuitos, zonas muertas o corrientes de densidad.

También se han definido algunos mecanismos de mezcla en los tanques de agua potable como los chorros de mezcla, los cuales se logran siempre que el agua fluya a través de un orificio (tubería) hacia el volumen de agua y se pueden clasificar en laminar y turbulento de acuerdo con el número de Reynolds (Re). Para que en el tanque se desarrolle una buena mezcla, es preferible un chorro turbulento con $Re \geq 3000$ (McNaughton y Sinclair, 1966; citados por [8]). Por otro lado, las diferencias de temperatura entre el agua que entra al tanque y la que se encuentra en su interior pueden generar fuerzas de arrastre que ocasionan movimiento de capas de diferentes densidades ocasionadas por la estratificación térmica [8].

Un parámetro que es de gran importancia en la hidráulica del sistema es el tiempo de mezcla, definido como el tiempo en el que logra homogeneizarse el flujo de entrada con el que se encuentra en el interior del tanque, gracias al impulso de la corriente de entrada que permite la mezcla.

Para la simulación en estado estacionario, se suponen estacionarias las condiciones del tanque, lo cual puede proporcionar información general sobre la distribución del agua en el interior de este. En los programas CFD, es necesario crear la malla en la que se especifique la geometría del problema, la cual puede ser estructurada o no para luego definir el modelo de flujo, y establecer las propiedades del fluido tales como la viscosidad, la densidad, las propiedades térmicas, y definir las condiciones de frontera e iniciales. Se debe, además, controlar los parámetros que afectan la solución, establecer los tipos de discretización, variar los factores de relajación y fijar criterios de finalización de las iteraciones. Asimismo, es común

monitorear la convergencia y controlar la evolución de las variables en algunos puntos para finalmente comprobar que la solución es correcta y analizar los resultados.

Diferentes autores han hecho investigaciones aplicando modelación CFD para la evaluación del comportamiento de reactores. Shamber y Larock (1981), citados por [9], utilizaron el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en el establecimiento de una ecuación de concentración de sólidos para clarificadores secundarios; [10] estudió diferentes reactores en el tratamiento de agua potable; [11] analizó la mezcla de un trazador en un tanque de almacenamiento esbelto; [9] empleó otro modelo CFD para evaluar la influencia de un deflector como control de flujo de alimentación en tanques de sedimentación de agua potable; [12] establecieron los tiempos de mezcla y efectos de la temperatura en tanques de almacenamiento con diferentes configuraciones de entrada, y [13] aplicaron la modelación CFD a un tanque de almacenamiento de la ciudad de Cali, y encontraron problemas de calidad de agua bajo una condición de estado estacionario.

En esfuerzos previos de modelación, los tanques de almacenamiento fueron representados como un simple tanque con compartimientos completamente mezclados; sin embargo, ha sido poco el estudio de las características de mezcla en tanques de sistemas de distribución de agua potable; [14-16] realizaron una modelación del tiempo de mezcla, y encontraron una relación entre el diámetro del chorro y el tiempo de mezcla. Patwardhan [17] desarrolló un modelo de predicción del comportamiento de un trazador en tanques de mezcla a chorro, el cual predijo el tiempo de mezcla y se comparó el perfil de la concentración con datos experimentales.

En este trabajo se determinó el tiempo de mezcla teórico en un tanque del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali, empleando los datos de la modelación CFD en estado estacionario como una aproximación a las características de

mezcla con una configuración de chorro definida y tomando como referencia los resultados de [12, 15]. Los resultados incluidos en este documento corresponden al componente de simulación numérica de un proyecto de investigación que también abarcó la evaluación experimental de este tanque a través de un ensayo de trazador y mediciones de cloro y temperatura del agua.

1 MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Caso estudiado

Se empleó la modelación CFD para hacer una aproximación del comportamiento de mezcla de un tanque de almacenamiento, manteniendo numéricamente el volumen del tanque completamente lleno para establecer condiciones de estado estacionario, es decir, con una masa de agua constante dentro del mismo.

El tanque posee una capacidad máxima de aproximadamente 15.000 m^3 y se alimenta por una tubería ascendente con diámetro de 609 mm; esta tiene una extrusión de 570 mm que funciona también como salida de agua en los períodos de vaciado y se encuentra ubicada a 3 m del perímetro de la estructura. Se colocó numéricamente una tubería de salida como parte de la geometría del tanque para simular el llenado y vaciado simultáneo. Los cálculos se hicieron con una velocidad media de flujo de $0,48 \text{ m.s}^{-1}$ y flujo másico de $141,14 \text{ Kg.s}^{-1}$ en la entrada de agua, calculados a partir de la mediana de los valores históricos medidos de lunes a sábado para el mes de mayo de 2008, debido a que en este mes no se reportaron paradas de la planta de tratamiento que pudieran afectar el comportamiento del tanque.

1.2 Modelo computacional

La malla se construyó con el programa ICEM 11.0, en tres dimensiones y basada en elementos hexaédricos, no estructurada, más densa en aque-

llos puntos de mayor relevancia (conducciones de entrada y salida, proximidades a la pared del depósito como se muestra en la figura 1). Los cálculos se realizaron utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes complementadas con el modelo de turbulencia clásico k-ε estándar [18], empleando el programa Fluent 6.3.26, basado en métodos de volúmenes finitos que permiten combinar las ecuaciones diferenciales parciales del flujo de un fluido con modelos de transporte de masa y evolución de concentraciones.

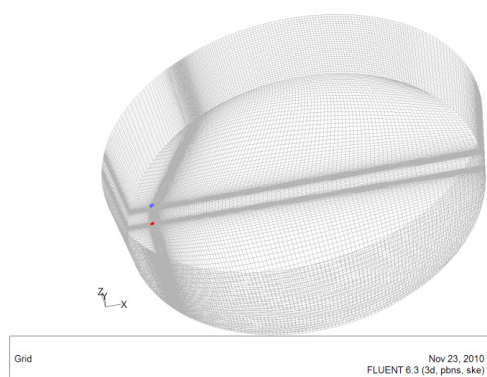


Figura 1. Malla tanque de almacenamiento con 623487 elementos

Fuente: elaboración propia

Dado que el flujo en la entrada es turbulento (Re entre 91.455 y 731.641), los cálculos se hicieron utilizando el modelo de turbulencia k-ε estándar. No obstante, para asegurar que los resultados obtenidos no dependieran apreciablemente del modelo de turbulencia empleado, se utilizó también el modelo k-ε realizable [18], y se obtuvo un patrón de flujo cuantitativamente muy similar al arrojado por el modelo k-ε estándar.

1.3 Verificación de la discretización espacial

Se construyeron tres tamaños de malla (aproximadamente 200.000, 600.000 y 1'000.000 elementos) que fueron simuladas en estado estacionario, de las cuales se seleccionó la malla del tamaño intermedio, de acuerdo con el análisis estándar de verificación de independencia de la malla [19].

Como variable objetivo se seleccionó el valor máximo de la velocidad a la salida en función del tamaño relativo de malla (figura 2) definido como $\|x\|/x_{\text{malla fina}}$ ($\|x\|$ es el tamaño característico de la celda en la malla considerada y $x_{\text{malla fina}}$ es el tamaño característica de la celda en la malla más fina evaluada), donde el valor 1 corresponde a la malla más fina considerada (alrededor de 1'000000 elementos). En la gráfica también se muestra el valor de la extrapolación de Richardson para el límite de número de nodos tendiendo a infinito.

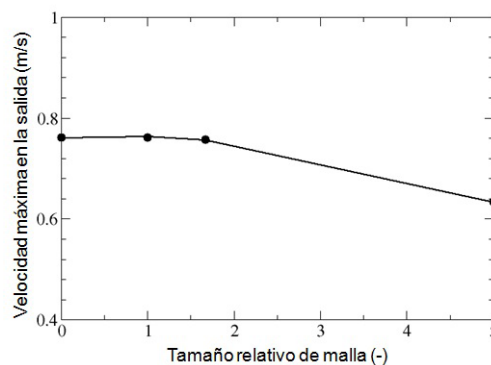


Figura 2. Variación de la variable objetivo (velocidad máxima a la salida) en función de la densidad de la malla. La extrapolación de Richardson se muestra para el tamaño relativo de la malla igual a cero

Fuente: elaboración propia

Las simulaciones se hicieron asumiendo un volumen constante de 14.975,09 m³ (9,5 m de nivel de agua) con entrada y salida simultánea. El flujo másico asumido a la entrada fue de 141,14 Kg.s⁻¹, mientras que en la salida se asumió un valor de presión de 0 Pa. Las paredes del tanque se tomaron como paredes sin deslizamiento y la superficie libre se definió como una pared sin rugosidad con cero esfuerzo cortante. El umbral de convergencia para el residuo máximo de todas las variables fue 1x10⁻⁴, recomendado para simulaciones de este tipo; adicionalmente, se controló la convergencia de las simulaciones con el monitoreo de la velocidad y flujo másico en la salida.

Tabla 1. Fórmulas empíricas para la estimación de tiempos de mezcla en tanques

Investigador	Fórmula	Constante	Comentario
Fossett y Prosser (1949)	$\frac{K \cdot D^2}{M^{1/2}}$	K = 8	D = Diámetro del tanque
Van de Vusse (1959)	$\frac{K \cdot D^2}{M^{1/2}}$	K = 9	M = Momento a la entrada = Velocidad x Caudal
Okita y Oyama (1963)	$\frac{K \cdot H^{1/2} \cdot D^{3/2}}{M^{1/2}}$	K = 4,9	H = Nivel del agua

Fuente: elaboración propia

1.4 Distribución del trazador en el tanque

A partir del patrón de flujo, se inyectó numéricamente el trazador durante 24 horas, sin solucionar las ecuaciones del flujo y turbulencia y un valor del escalar igual a 1 en la entrada, y se calculó su evolución transitoria con un paso temporal suficientemente pequeño para asegurar la convergencia del esquema numérico. Se monitoreó el trazador a la salida y en diferentes puntos establecidos en un plano generado sobre la entrada del tanque (desde P10 hasta P27 según la convención de la figura 3). Adicionalmente, se monitoreó el comportamiento del trazador en el tanque durante otras 24 horas luego de suspender su inyección (cambio a 0 en el valor del escalar en la entrada), y se conservaron las demás características de la simulación.

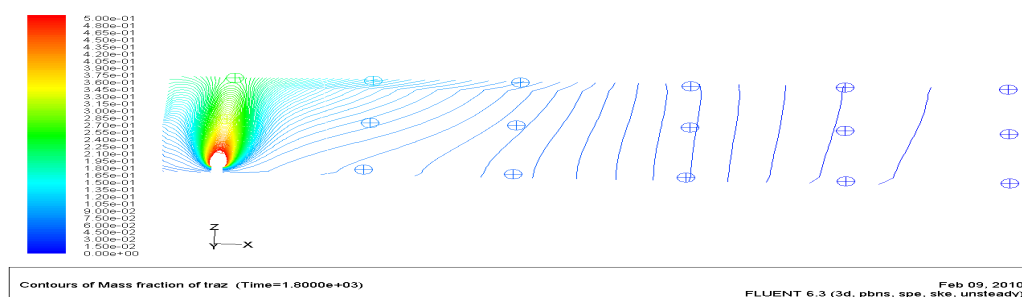


Figura 3. Plano y puntos de monitoreo al interior del tanque

Fuente: elaboración propia

1.5 Tiempo de mezcla en el tanque

La tabla 1 resume varias fórmulas empíricas desarrolladas en las industrias químicas para la estimación del tiempo de mezcla teórico en tanques, las cuales fueron empleadas para calcular el tiempo de mezcla teórico según ecuaciones y compararlas con los resultados de la simulación [15].

Con la ayuda del modelo de transporte del escalar es posible calcular la rapidez con la que el agua de entrada se extiende a diferentes partes del volumen (tiempo de mezcla). Se pudo observar entonces cómo el flujo de trazador entrante se extiende por todo el volumen de agua y también se calculó la relación entre el agua que ingresa y la almacenada dentro del tanque; el tiempo de mezcla puede ser diferente dependiendo de cómo se expresa la diferencia de concentración entre los puntos y del límite de las pequeñas desviaciones necesarias para que prevalezcan condiciones homogéneas en el depósito. Para este caso se asumió que no hay diferencia de densidad entre el agua entrante y la del interior.

El tiempo de mezcla en el tanque se determinó teniendo en cuenta los estudios hechos por [12, 15], calculando la desviación estándar de los datos monitoreados en los diferentes puntos para cada período de monitoreo y dividiendo por el promedio de estos datos. Este valor, conocido como coeficiente de variación (CV), proporciona una medida relativa de la dispersión de los datos. [15]

establecieron que el tiempo de mezcla corresponde cuando el CV es menor a 0,05 (buena mezcla); para la presente investigación se consideró el tiempo de mezcla para CV menores a 0,1, que representa que el grado de uniformidad del trazador en el tanque fue del 90% [12, 20].

También se efectuó una comparación entre la ecuación de Okita y Oyama, citados en [15], y la modificada por estos autores en el mismo estudio, y se obtuvo una constante K para condiciones específicas del estudio, las cuales son similares a este caso.

1.6 Volumen de mezcla en el tanque

Se estimó el volumen de agua necesario para que haya mezcla al ingresar al tanque, empleando la ecuación 1 sugerida por [12, 15]:

$$\frac{\Delta V}{V_{(0)}} = \frac{K \cdot d}{V_{(0)}^{1/3}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

ΔV : volumen de agua a ingresar para que haya buena mezcla

$V_{(0)}$: volumen inicial de agua

K: constante igual a 9, de acuerdo con [15]

d: diámetro de tubería de entrada

Cuando hay condiciones de estado estacionario, $V_{(0)}$ equivale al volumen del tanque pero, para condiciones variables, corresponde al volumen inicial del periodo evaluado, y la relación $\Delta V/V_{(0)}$ indica la fracción o porcentaje de agua que ingresará al tanque para que se garantice una buena mezcla en su interior.

2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Patrón de flujo

Las velocidades en el interior del tanque muestran que se presenta una velocidad máxima de 0,88 m.s⁻¹ a la salida del tanque (figura 4), e indican que

siempre habrá energía de mezcla proveniente de la entrada con evacuación de agua constante por la zona de salida. La desventaja de esta condición radica en la complejidad del flujo formado por un cono de entrada, lo cual provoca zonas de estancamiento y zonas de recirculación, dependiendo de los caudales del ciclo analizado. Debido a la expansión de la capa de mezcla turbulenta a lo largo de las fronteras del chorro, el líquido que las rodea es arrastrado con el impulso de entrada, diluye la corriente del chorro hacia el ambiente y cambia en algunos momentos de dirección; con el tiempo, alguna porción de esta agua se re-circulará dentro del chorro y se mezclará con nueva agua a través de la entrada.

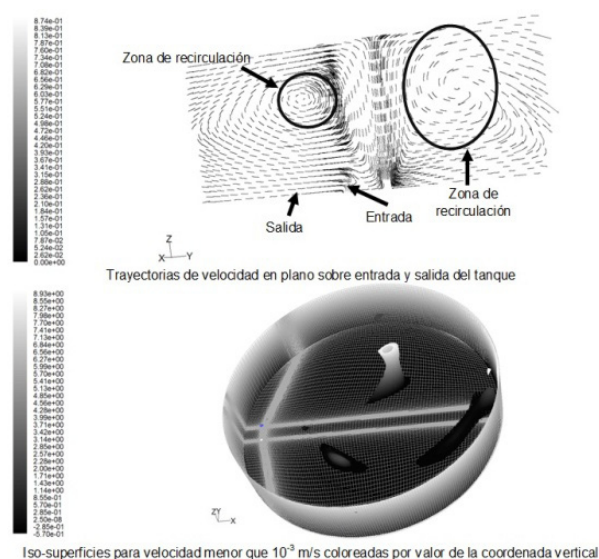


Figura 4. Trayectorias e isosuperficies de velocidad – plano sobre entrada y salida (m-s-l)

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, la figura 4 muestra la existencia de zonas muertas (definidas aquí como las zonas del interior del tanque donde el módulo de la velocidad es inferior a 1×10^{-3} m/s en el tanque), en las cuales el agua permanece más tiempo dentro del tanque, lo que disminuye su calidad, pues largos tiempos de residencia del agua potable generan pérdidas significativas del cloro residual libre, recrecimiento

microbiológico y formación de subproductos de la desinfección [8].

Debido a las bajas velocidades, se generan vórtices particularmente a lado y lado de la entrada y salida, así como en las cercanías a las paredes; disminuyen, por lo tanto, la capacidad de mezcla del tanque; resultados similares obtuvieron [13] para el mismo tanque con escenario de caudal mínimo y nivel de agua máximo.

2.2 Comportamiento del trazador en estado transitorio

La figura 5 muestra el comportamiento del trazador en el interior del tanque luego de una simulación en estado transitorio durante 48 horas, de las cuales 24 fueron con una fracción de masa igual a 1 y las otras 24 con fracción de masa 0 en la inyección. Luego de 30 minutos de inyección, se observó poca dispersión del trazador en las zonas más alejadas de la entrada y luego de 24 horas, solo se alcanza una fracción de trazador de 0,67 cerca de las paredes; posteriormente, después de las 24,5 horas, al suspender la inyección del trazador, se observa una disminución más rápida de la fracción de masa cerca de la paredes, fenómeno que se da posiblemente porque a la salida del tanque se presentan mayores velocidades.

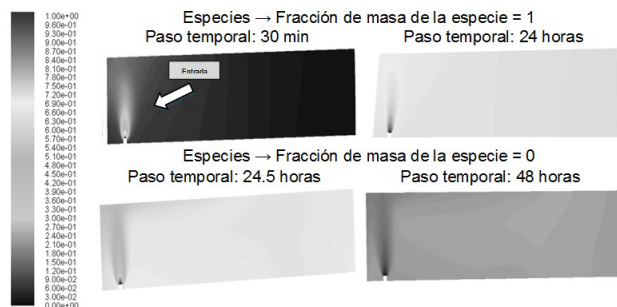


Figura 5. Comportamiento del trazador al interior del tanque

Fuente: elaboración propia

Cuando se suspendió la inyección de trazador, se presentó una fracción de masa aproximada de

0,24 después de 48 horas de simulación. Cabe resaltar que en el interior del tanque se presentó una distribución por capas, con una mayor concentración de trazador en el cono de entrada y una menor concentración en la pared extrema del tanque; sin embargo, lo ideal sería lograr mezcla completa para minimizar los riesgos de calidad en el tanque.

2.3 Tiempo de mezcla

El rendimiento de los mezcladores de chorro es determinado tradicionalmente por el denominado tiempo de mezcla. En la tabla 2 se muestran los resultados de los cálculos teóricos para el tiempo de mezcla del tanque, utilizando las ecuaciones empíricas detalladas en la tabla 1. Para las situaciones de flujo continuo, es decir asumiendo el tanque siempre lleno y con una entrada y salida simultáneas, el tiempo de mezcla requerido teórico es 3,5 veces mayor al tiempo necesario para conseguir una buena mezcla con un ciclo de llenado y vaciado, por tanto, podrían esperarse mejores condiciones para este último caso.

Tabla 2. Tiempo teórico de mezcla en el tanque

Constante K	Tiempo de mezcla (horas)	Tipo de Flujo
8	17,14	Continuo
9	19,28	Continuo
4,9	4,83	Llenado-Vaciado

Fuente: elaboración propia

En la figura 6 se hace referencia al tiempo de mezcla calculado según la fórmula de Okita y Oyama y la modificación hecha por [15], quienes en su experimento elaboraron una definición más estricta de la mezcla completa, es decir con una entrada externa del trazador y una alimentación continua del trazador. Se observa una diferencia en este parámetro, pues con la fórmula original los valores obtenidos son menores a los que se observarían con la modificación, ya que en este último se controlaron más variables.

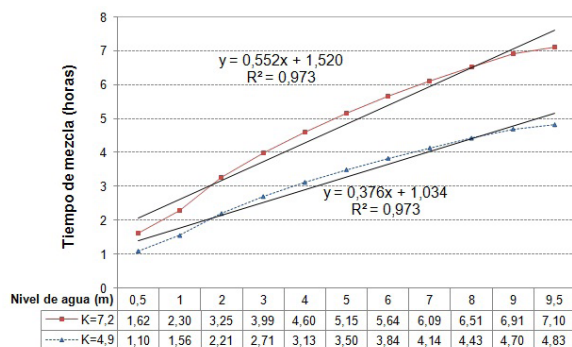


Figura 6. Tiempo de mezcla teórico en función del nivel del tanque

Fuente: elaboración propia

El valor de tiempo de mezcla calculado para el tanque con altura igual a 9,5 m (4,83 horas), empleando la fórmula de Okita modificada con un K de 7,2, es similar al estudiado por [15], pues ellos obtuvieron un tiempo de mezcla estimado de 4,3 horas a una altura de 8,5 m para un tanque con características similares a las del presente estudio. Esto significa que existe una relación directa entre el tiempo de mezcla y la altura del tanque; la situación más crítica se presenta cuando el nivel de agua es máximo, pues ello implica que los volúmenes a mezclar son mayores.

La simulación del trazador permitió establecer un tiempo de mezcla de 19,06 horas, lo que significa que sólo después de este tiempo la mezcla tuvo un 90% de homogeneización, valor que es coherente con el calculado teóricamente con las ecuaciones empíricas para tanques en estado estacionario con entrada y salida simultáneas. En la figura 7 se muestran 5 de los 17 puntos de monitoreo en el tanque (P10, P12, P18, P20, P27), el tiempo de mezcla calculado a partir de los resultados de la simulación y la fracción de masa del trazador a la salida del tanque. Aunque es necesario validar estos resultados con valores experimentales, debe tenerse en cuenta que la simulación numérica de este tanque se hizo con entrada y salida de agua simultánea y este en la realidad opera con ciclos de llenado-vaciado; se refleja así la necesidad de profundizar en la investigación sobre simulación de la variación de niveles de agua en reactores.

En los puntos P10 y P12 se observan las más altas fracciones de masa, pues estos se ubican sobre la trayectoria del chorro de entrada, lo que indica que los chorros son un mecanismo importante para la mezcla de agua; lo contrario, sucede con los puntos P18, P20, P27 que se encuentran más alejados del chorro y cuyas fracciones de masa alcanzan el 67% luego de 24 horas de inyección de trazador. En la salida se presenta también una fracción de masa de aproximadamente 67% después de las 24 horas de inyección a pesar de localizarse muy cerca de la entrada. Con esta configuración se esperaría un posible cortocircuito; sin embargo, como el chorro es de tipo vertical, el agua se desplaza hacia las paredes con velocidades bajas y con predominancia del fenómeno de recirculación y zonas de estancamiento.

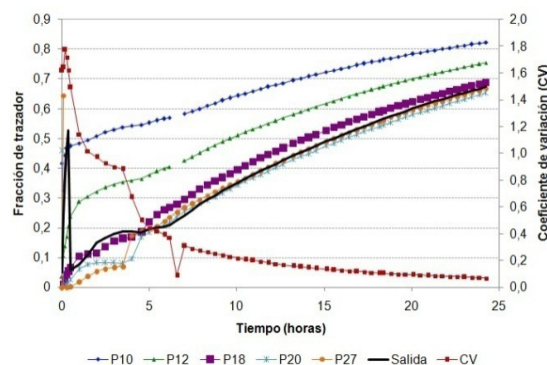


Figura 7. Fracción de trazador en varios puntos del tanque y tiempo de mezcla

Fuente: elaboración propia

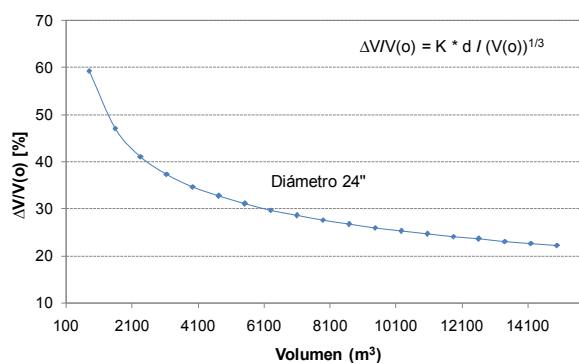


Figura 8. Intercambio de volumen de agua requerido para alcanzar buena mezcla en el tanque – Diámetro de tubería de entrada 24"

Fuente: elaboración propia

2.4 Volumen de mezcla

En la figura 8 se observa el porcentaje de volumen que debe ingresar al tanque para que haya mezcla. Se destaca que este disminuye con el aumento de volumen de almacenamiento en condiciones de estado estacionario. Por ejemplo, cuando el nivel de tanque es de 1 m, su volumen es aproximadamente 1576 m^3 , por lo que se requeriría el ingreso de 742 m^3 , es decir un 47% del volumen almacenado en ese momento para que haya mezcla. Si, por el contrario, el tanque se encontrara al máximo de su capacidad, con un nivel de agua de 9.5 m (14975 m^3), se requeriría un ingreso del 22% del volumen (3330 m^3) para generar una buena mezcla.

3 CONCLUSIONES

La modelación muestra cómo para un tanque de dimensiones importantes, los mecanismos de entrada y de salida generan un flujo hidráulico que corresponde a una combinación de flujo pistón y completamente mezclado. En el tanque se identificaron zonas de estancamiento cerca de las paredes y zonas de recirculación en las proximidades al chorro de entrada que facilitan la reincorporación del agua al flujo de ingreso, lo que puede incrementar los períodos de retención del agua.

Para condiciones de estado estacionario, se requeriría un tiempo de mezcla teórico de 17 horas y el valor simulado fue de 19,06 horas, lo que representa una diferencia de alrededor del 10%, que indica una buena aproximación; sin embargo, debido a que los niveles del agua fluctúan en función de la operación del sistema, la parte experimental debe ser diseñada para reflejar este hecho al igual que los datos de modelación futuros.

Bajo las condiciones de simulación empleadas, existe una relación inversa entre el volumen de agua almacenada y el que debe ingresar al tanque para que se presenten condiciones de mezcla; así se requeriría un 22% del volumen de almacenamiento para que se presente buena mezcla dentro del

tanque cuando el nivel de operación es el máximo posible (9,5 m) y 47% cuando es el mínimo (1,0 m).

El análisis CFD puede utilizarse como una aproximación conveniente para determinar el comportamiento hidrodinámico de los tanques de almacenamiento, pues arroja como resultado un mayor conocimiento del campo de velocidades, lo que permite establecer el mejor modelo del tanque para un estudio de la calidad del agua; sin embargo, en ocasiones el patrón de flujo sugerido por la configuración del tanque no coincide con el resultado aportado por la simulación fluidodinámica, lo que es de gran importancia hacer una validación a través de datos de campo. Para lograr esto se requiere profundizar en los esquemas numéricos que permitan simular la variación de niveles de agua en tanques que operan con ciclos de llenado-vaciado para que sea posible validar con resultados experimentales.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y económico prestado por COLCIENCIAS, EMCALI EICE ESP, la Universidad del Valle y Universidad Autónoma de Occidente para el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

- [1] R. E. Mau *et al.*, "Explicit Mathematical Models of distribution Storage Water Quality," *J Hydraul Eng*, vol. 121, no. 10, pp. 699-709, 1995.
- [2] F. P. Boulos *et al.*, "Hydraulic mixing and free chlorine residual in reservoirs," *J AWWA*, vol. 88, no. 7, pp. 48-59, 1996.
- [3] N. R. Council. "Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks. Free Executive Summary. Committee on Public Water Supply Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks," [En línea], acceso noviembre 2010; Disponible: http://www.bvsde.paho.org/CD-GDWQ/Biblioteca/Manuales_Guias_LibrosDW/DWDistribution.pdf, 2006.

- [4] EPA. "Water distribution system analysis: field studies, modeling and management," [En línea], acceso diciembre 2010; Disponible: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r06028/600r06028prelithruchap4.pdf>, 2005.
- [5] F. P. Boulos *et al.*, *Comprehensive water distribution systems analysis handbook for engineers and planners*, 2 ed., Pasadena: MWH Soft, 2006, 584 p.
- [6] O. Levenspiel, *Chemical Reactions Engineering*, 2 ed., Oregon: Reverté S.A., 1987, 668 p.
- [7] S. Abdulnaser. "Computational Fluid Dynamics," [En línea], acceso diciembre 2010; Disponible: <http://www.bookboon.com>, 2009.
- [8] M. W. Grayman *et al.*, "Mixing and aging of water in distribution system storage facilities," *J AWWA*, vol. 96, no. 9, pp. 70-80, 2004.
- [9] A. M. Goula *et al.*, "A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. Case study: The influence of a feed flow control baffle," *Chem Eng J*, vol. 140, no. 1-3, pp. 110-121, 2007.
- [10] J. J. van der Walt, "The modelling of water treatment process tank," tesis de Ph D, Rand Afrikaans University, South Africa, 2002.
- [11] J. M. Duer, "Use of CFD to analyze the effects of buoyant inlet jets on mixing standpipes," presentado en AWWA Annual Conference and Exposition, Anaheim, 2003.
- [12] O. Nordblom, y O. Ljunggren, *Mixing and water exchange in drinking water storage tanks*, Reporte 2007-15, Estocolmo, 2007.
- [13] D. Muriel *et al.*, "La influencia de los patrones de Flujo en las Estructuras de almacenamiento en sistemas urbanos de abastecimiento de agua," *Revista ACODAL*, vol. 224, pp. 27-39, 2009.
- [14] M. S. Kennedy *et al.*, "Assessing the effects of storage tank design on water quality," *J AWWA*, vol. 85, no. 7, pp. 78-88, 1993.
- [15] A. L. Rossman, y M. W. Grayman, "Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks," *J Env Eng*, vol. 125, no. 8, pp. 755-761, 1999.
- [16] O. Nordblom, y L. Bergdahl, "Initiation of stagnation in drinking water storage tanks," *J Hydraul Eng*, vol. 130, no. 1, pp. 49-57, 2004.
- [17] A. W. Patwardhan, "CFD modeling of jet mixed tanks," *Chem Eng Sci*, vol. 57, no. 8, pp. 1307-1318, 2002.
- [18] Fluent-Inc, "Fluent 6.3. User's Guide," Fluent Inc, 2006, p. 2501.
- [19] P. J. Roache, *Verification and validation in computational science and engineering*, Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998, 446 p.
- [20] X. Tian, y P. J. W. Roberts, "Mixing in water storage tanks. I: No buoyancy effects," *J. Env. Eng*, vol. 134, no. 12, pp. 974-984, 2008.