

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

Escuela de Química



**“Estudio del efecto del almacenamiento sobre la calidad de agua en un tanque de  
distribución”**

Proyecto final de graduación para optar por el título de  
Ingeniería Ambiental con el grado académico de  
Licenciatura

Ana Lorena Gómez Valverde

Cartago Junio, 2014

**HOJA DE FIRMAS**

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL ALMACENAMIENTO SOBRE LA CALIDAD DE  
AGUA EN UN TANQUE DE DISTRIBUCIÓN**

Informe presentado a la Escuela de Química  
del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial  
para optar al título de Ingeniero Ambiental con el grado en Licenciatura

**Miembros del Tribunal**

---

**M.Sc. José Andrés Araya Obando**  
**Director de Tesis**

---

**Lic. Joaquín Jiménez Antillón**  
**Lector 1**

---

**M.Sc Diana Zambrano Piamba**  
**Lector 2**

## **DEDICATORIA**

*Para mi familia, mi padre Carlos Gómez, mi madre Lucrecia Valverde y mi hermana Carolina Gómez; los amo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Para mi tutor, el profesor José Andrés Araya, mi especial agradecimiento por su apoyo, su dedicación y guía en cada una de las fases de la investigación.

Mi más sincero agradecimiento a el Ingeniero Melvin Castro de la Región Central Oeste, AyA, al personal, en especial Susana Fallas. Agradezco además al Centro de Investigación en Vivienda y Construcción, a la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Ambiental, al profesor Macario Pino y al grupo de estudiantes, Braulio Umaña, Jonathan Umaña y Esteban Vásquez; quienes me acompañaron y me brindaron su colaboración cuando así lo necesitaba.

Quiero agradecer a quienes me han acompañado en todo el proceso universitario, a mis amigos, en especial a Juan Carlos, Marilyn, Kenneth y Daylin; a mi jefe Carlos Cerdas por un apoyo y su ayuda durante estos años.

También quiero agradecer de manera muy especial a José Cascante, por su apoyo incondicional tanto en visitas de campo, como el apoyo con mis metas. A mi familia, por toda la paciencia, apoyo y entendimiento.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	1
2.1 Tanques de Contacto de Cloro.....	1
2.2 Tanques de almacenamiento.....	2
2.2.1 Tiempo de Retención.....	3
2.3 Hidrodinámica de los tanques de almacenamiento.....	3
2.3.1 Configuración entrada- salida.....	3
2.3.2 Nivel de agua almacenada en el tanque.....	4
2.3.3 Corto Circuito.....	4
2.3.4 Zonas muertas de mezcla.....	5
2.4 Comportamiento del cloro residual libre.....	5
2.4.1 Edad de Agua del Tanque.....	6
2.4.2 Estratificación Térmica.....	6
2.5 Tipos de flujo de un reactor.....	6
2.5.1 Reactor de flujo de mezcla completa.....	7
2.5.2 Reactor de flujo pistón.....	7
2.5.3 Curvas de trazadores para reactores ideales.....	8
2.6 Modelos Hidrodinámicos.....	9
2.6.1 Análisis de Wolf- Resnick.....	9
2.6.2 Curva de Tendencia.....	10
2.6.3 Número de Peclet.....	11
2.6.4 Tanques en Serie.....	12
3. MATERIALES Y METODOS.....	13
3.1 Criterios de selección del sitio de estudio.....	13
3.2 Descripción del tanque de San Ignacio de Acosta.....	15
3.3 Montaje de Pruebas de campo.....	16
3.4 Métodos de análisis de las variables.....	17
3.5 Selección de puntos de muestreo.....	18
3.6 Prueba de Trazador.....	19
3.6.1 Cantidad de Trazador para el ensayo.....	19
3.6.2 Protocolo de ejecución del ensayo de trazador.....	20
3.7 Variación Espacio - Temporal del Cloro y la Temperatura.....	21
3.7.1 Protocolo para la determinación de la variación espacio - temporal del cloro y la temperatura.....	22
3.8 Recopilación y análisis de la información.....	24
3.9 Recomendaciones operativas y de mantenimiento para la gestión de la calidad de agua en el tanque de almacenamiento.....	24
4. RESULTADOS.....	26
4.1 Parámetros iniciales.....	26
4.1.1 Registro de Caudales y velocidad de flujo de entrada.....	26
4.1.2 Relación de la Conductividad y la Concentración del Trazador.....	27
4.1.3 Niveles de agua para el Tanque.....	27
4.2 Condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento.....	28

4.2.1 Método de Wolf- Resnik .....	28
4.2.2 Método Curva de Tendencia .....	30
4.2.3 Número de Peclet .....	33
4.2.4 Método de Tanques en Serie .....	33
4.2.5 Edad de agua del tanque .....	34
4.3 Estudio de la variación espacio - temporal de la Temperatura .....	36
4.4 Estudio de la variación espacio - temporal del Cloro .....	37
4.5 Recomendaciones operativas y de mantenimiento del tanque para garantizar la calidad de agua .....	38
5. DISCUSIÓN .....	41
5.1 Relación de la zona muerta, el corto circuito y los niveles de almacenamiento del Tanque Nuevo .....	42
5.2 Relación del Tiempo de retención real con el tiempo de retención teórico .....	44
5.3 Relación de los resultados del estudio hidrodinámico con el estudio de la variación espacio – temporal del cloro y la temperatura. ....	45
5.4 Recomendaciones para mejorar la calidad del agua almacenada .....	46
6. CONCLUSIONES .....	48
7. RECOMENDACIONES .....	50
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tanque de Contacto La Habana.....	1
<b>Figura 2.</b> Diagrama de dos reactores ideales (a) Reactor de Flujo de Mezcla Completa y (b) Reactor de Flujo Pistón. ....	8
<b>Figura 3.</b> Curvas de trazador para (a) Reactor de Flujo Pistón y (b) Reactor de Flujo de Mezcla Completa.....	9
<b>Figura 4.</b> Curva del método de Wolf-Resnick.....	10
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de un análisis de una curva de tendencia.....	11
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de las curvas resultantes para el método de tanques en serie. ....	12
<b>Figura 7.</b> Esquema metodológico del estudio .....	13
<b>Figura 8.</b> Localización del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta.....	14
<b>Figura 9.</b> Tanque de Distribución de San Ignacio de Acosta .....	14
<b>Figura 10.</b> Vista en planta del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta .....	15
<b>Figura 11.</b> Vista lateral del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta.....	16
<b>Figura 12.</b> Vista interior del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta.....	16
<b>Figura 13.</b> Equipos de muestreo utilizados durante la ejecución del estudio.....	17
<b>Figura 14.</b> Localización de los puntos de muestreo. ....	18
<b>Figura 15.</b> Esquema metodológico del ensayo del trazador.....	19
<b>Figura 16.</b> Esquema metodológico de la variación espacio - temporal del cloro y la temperatura.....	22
<b>Figura 17.</b> Distribución del caudal en la entrada para el tanque .....	26
<b>Figura 18.</b> Conductividad respecto a la Concentración de Trazador.....	27
<b>Figura 19.</b> Niveles de agua del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta.....	28
<b>Figura 20.</b> Curva resultante del modelo circuito de Wolf-Resnick para el tanque.....	29
<b>Figura 21.</b> Curva de concentración de trazador respecto al tiempo .....	30
<b>Figura 22.</b> Curvas resultantes del método de Tanques en Serie para el tanque.....	34
<b>Figura 23.</b> Curva de edad de agua para el tanque.....	34
<b>Figura 24.</b> Curva de la Función acumulativa $F(t)$ . ....	35
<b>Figura 25.</b> Curva de la función $W(t)$ para el tanque Nuevo. ....	36

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Beneficios de la presencia de un tanque de distribución y los problemas asociados al efecto del almacenamiento de los tanques de almacenamiento. ....	2
<b>Cuadro 2.</b> Descripción de los equipos para medir las variables de la investigación. ....	17
<b>Cuadro 3.</b> Descripción de los métodos utilizados para la medición de las variables. ....	17
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros geométricos del Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta. ....	19
<b>Cuadro 5.</b> Protocolo para la determinación de las condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento por la prueba del trazador. ....	20
<b>Cuadro 6.</b> Protocolo para la determinación de la variación espacio-temporal del cloro y la temperatura del tanque de almacenamiento. ....	22
<b>Cuadro 7.</b> Protocolo de las mejores prácticas de gestión para mejorar la calidad del agua almacenada. ....	24
<b>Cuadro 8.</b> Resultados de la aplicación del modelo circuito de Wolf-Resnick. ....	29
<b>Cuadro 9.</b> Parámetros de la Curva de Tendencia del Trazador. ....	31
<b>Cuadro 10.</b> Interpretación de los criterios para análisis de la Curva de tendencia del trazador. ....	31
<b>Cuadro 11.</b> Análisis de Tukey para la temperatura respecto a las posiciones. ....	36
<b>Cuadro 12.</b> Análisis de Tukey para la temperatura respecto a las alturas. ....	36
<b>Cuadro 13.</b> Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las posiciones. ....	37
<b>Cuadro 14.</b> Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las alturas. ....	37
<b>Cuadro 15.</b> Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las posiciones. ....	38
<b>Cuadro 16.</b> Aspectos evaluados para determinar las recomendaciones operativas y de mantenimiento del tanque. ....	39
<b>Cuadro 17.</b> Recomendaciones operativas y de mantenimiento del Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta. ....	41
<b>Cuadro 18.</b> Resumen de los resultados obtenidos por los métodos hidrodinámicos. ....	42

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Análisis de Varianza de Temperatura y Cloro libre .....	55
<b>Anexo 2.</b> Registro Fotográfico del Tanque de San Ignacio .....	57
<b>Anexo 3.</b> Formatos de Campo .....	61
<b>Anexo 4.</b> Hoja de Seguridad del Cloruro de Sodio .....	67

## RESUMEN

Los tanques de distribución se han relacionado en diferentes investigaciones con el efecto del almacenamiento en la calidad del agua, concerniente a problemas relacionados con el proceso de desinfección por deficiencias en el tiempo de contacto y la hidrodinámica, específicamente, debido a una mezcla deficiente, presencia de corto circuito, zonas muertas y estratificación térmica. Por tanto, es necesario evaluar las condiciones hidrodinámicas, la variación espacio-temporal del cloro libre y la temperatura con protocolos adecuados y aplicables a los diferentes entes administradores de los sistemas de abastecimiento de agua. Para contribuir a esta necesidad, se realizó la presente investigación en el Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta, donde se evaluaron las condiciones hidrodinámicas y la variación espacio - temporal de la concentración del cloro y la temperatura del tanque. Para ello fue necesario la realización del ensayo de trazador con inyección instantánea de cloruro de sodio, se analizaron los datos resultantes por medio de cuatro modelos hidrodinámicos que fueron: análisis de Wolf-Resnick, Curva de Tendencia, Número de Peclet y Tanques en Serie, para evaluar las condiciones hidrodinámicas. Con respecto a la variación espacio - temporal del cloro residual y la temperatura, el estudio incluyó nueve puntos de muestreo al interior del tanque. Además, incluyó dos puntos de muestreo al exterior. Para el análisis de la variación espacio - temporal se utilizó análisis de varianza y la prueba de Tukey. Igualmente se analizó la operación y mantenimiento del tanque para relacionar los resultados de las pruebas con su explicación física y de tal forma generar recomendaciones que mejoren la calidad del agua.

Se encontró que el Tanque Nuevo posee porcentajes de 33 % de flujo de mezcla completa, 11 % de flujo pistón y un 56 % de zonas muertas de acuerdo con el Método de Wolf-Resnick. Igualmente se confirmó con tres de los métodos antes mencionados la presencia de un corto circuito. Se encontró que, producto del corto circuito y la deficiencia en mezcla, el tiempo de retención real fue de 498,0 min, inferior por 15 min al teórico. Aunado a ello, la variación de los niveles en el tanque no supera el 30 %, registrando valores mínimos de 2 m, lo cual en conjunto con el corto circuito posiblemente son las causas del 56 % de las zonas muertas. No se encontró una variación espacio-temporal en la concentración de cloro residual ni presencia de estratificación térmica, pero si un efecto en el tiempo de contacto producto del corto circuito. La configuración de entrada y salida permite la presencia del corto circuito y por lo tanto es necesario reubicar una de las tuberías; regular los caudales de ingreso para controlar los niveles mínimos para propiciar la variación de volúmenes e impedir el envejecimiento del agua.

Finalmente, se comprobó la factibilidad de realizar estudios hidrodinámicos relacionados con la calidad del agua en tanques de almacenamiento mediante un procedimiento aplicable al contexto local. Se evidencia la problemática de mantener altos porcentajes de agua almacenada, de no tomar en cuenta como la configuración de las tuberías de entrada y de salida del tanque pueden afectar la calidad del agua, demostrando a su vez que el tanque de almacenamiento no es la estructura ideal para realizar eficientemente el proceso de desinfección, constituyendo así, un valioso aporte en términos de la minimización del riesgo en la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de San Ignacio de Acosta.

**Palabras clave:** Tanque de almacenamiento, condiciones hidrodinámicas, corto circuito, cloro, estratificación térmica.

## ABSTRACT

Distribution of tanks have been linked in various studies with the effect of storage in water quality related problems concerning the disinfection process by deficiencies in the chlorine time of contact and hydrodynamics, specifically, because poor mixing, short circuit, dead zones mixing and thermal stratification; however, Costa Rica are few or no studies to confirm or refute such scenarios occur in distribution tanks. Therefore it is necessary to begin by assessing the hydrodynamic conditions, the spatiotemporal variation of free chlorine and temperature with appropriate and applicable to different administrative entities of the water supply systems protocols. To contribute this need the present research was conducted in the New Tank in San Ignacio de Acosta, where the hydrodynamic conditions and the spatiotemporal variation of the concentration of chlorine and temperature tank were evaluated. It was necessary to perform the test with instantaneous tracer injection of sodium chloride, the resulting data using four hydrodynamic models were analyzed: analysis of Wolf-Resnick, Trend Curve, Peclet number and Tanks in Series to evaluate the hydrodynamic conditions. With regard to space variation-temporal residual chlorine and the temperature, the study included nine sampling points into the tank through the use of water traps and a suction pump. Also we included two points abroad, one at the inlet and one at the outlet pipe. The set of data obtained for the study of variation space - time were analyzed with analysis of variance and Tukey's test. Moreover, analyzed the operation and maintenance of the tank related the test results with their physical explanation and so generate recommendations that we will improve water quality was performed.

It was found that the new tank had percentages of 33% of mixed flow, plug flow 11% and 56% of dead zones in accordance with the method of Wolf- Resnick. It was also confirmed with the four methods aforementioned, the flow reactor was the ideal complete mixing reactor operation more approached the tank , but misses in all this behavior to be three methods the presence of a short circuit. That proceeds of short circuit and deficiency in the mixture was found actual holding time was 498.0 min, 15 min to less theoretical. Added to this the variation of the levels in the tank didn't exceed 30 %, recording minimum values of 2 m, which together with possibly short circuit causes 56% of dead zones. The input and output configuration allows the presence of short circuit and therefore was recommended relocate one pipeline; regulating flow of income was recommended in conjunction with control levels to prevent foster varying volumes and prevent aging water.

Finally, the feasibility of hydrodynamic studies related to water quality in storage tanks by a process applicable to the local context was found. The problem of maintaining high percentages of stored water, It wasn't taking into account as the configuration of the inlet and outlet of the tank can affect water quality, demonstrating in turn that the storage tank wasn't the structure is evidenced ideal for efficiently performing the disinfection process, constricted a valuable contribution in terms to risk minimization in water quality in the supply system in San Ignacio de Acosta.

**Key Words:** storage tanks, hydrodynamics, short circuit, chlorine, thermal stratification

# 1. INTRODUCCIÓN

Los tanques de distribución en general han sido diseñados para cumplir con las especificaciones hidráulicas dejando de lado las consideraciones relacionadas con la calidad del agua (Clark, 2011; Environmental Protection Agency, 2005; Montoya, Cruz, Torres, Laín, & Escobar, 2012). Comúnmente, el control en los tanques responde a mantener la presión necesaria en la red y garantizar un servicio adecuado (Comisión Nacional del Agua, 2007; Department of Environment and Conservation, 2011); no obstante, está demostrado que constituyen espacios en los cuales ocurren cambios químicos y biológicos en el agua, llegando a ser considerados los reactores de mayor tamaño y con necesidad de estudio (Clark, 2011; Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2005).

Al mismo tiempo, se ha encontrado que la configuración de entrada y salida del tanque de almacenamiento tiene efectos en la calidad del agua (Boulos et al., 1999; Department of Environment and Conservation, 2011; Kennedy, Moegling, Sarikelle, & Suravallopp, 1993) al incrementar la edad de agua por medio de los tiempos de retención o alterar los procesos hidrodinámicos que se dan a lo interno del tanque. Asimismo, la forma del tanque influye en el tipo de mezcla del agua (Kennedy et al., 1993) y en la presencia de zonas muertas de mezcla (J. Sánchez & Cardona, 2009). De igual forma, la presencia de estratificación térmica influye en la calidad del agua ya que genera zonas muertas por diferencias de densidad (Montoya, 2012; L. D. Sánchez, Marin, Visscher, & Rietveld, 2012). A lo anterior se suma el efecto de la operación y el mantenimiento del tanque (Araya, 2012; Laín, Cruz, Valencia, Torres, & Montoya, 2011; Muriel, 2008) dado que al no existir protocolos establecidos, muchas veces estos espacios constituyen fuentes de contaminación del agua. Aunado a ello, el control del caudal de entrada al tanque, los niveles de almacenamiento, el estado de las paredes internas del tanque, el mantenimiento de las tuberías, generalmente disminuyen la calidad de agua distribuida (Comisión Nacional del Agua, 2007). Conjuntamente los accesos a puntos de muestreo, la frecuencia de estudios de calidad y procesos de desinfección erróneos propician un riesgo a la salud (Cordero, 2014; Montoya, 2012).

Evidentemente, es necesario el apoyo y desarrollo de estrategias de gestión para la minimización del riesgo del abastecimiento de agua potable en los sistemas de distribución de Costa Rica, como insumo al “Programa Nacional de Mejoramiento y Sostenibilidad de la Calidad de los Servicios de Agua Potable en Costa Rica 2007-2015” (Mora & Feoli, 2007; Mora, Mata, & Portuguez, 2012). Surge la necesidad de generar protocolos que puedan ser continuados en el tiempo, minimicen costos y a un nivel de comprensión simple a los operarios de los acueductos. Para ello el desarrollo matemático, sin la implementación de software complejo puede ser utilizado efectivamente para predecir la calidad del agua al interior del tanque y los problemas de degradación asociados. De ahí la importancia de la presente investigación en el cual se aplicó un procedimiento adecuado al contexto nacional, de bajo costo, utilizado anteriormente y con resultados satisfactorios (Montoya *et al.*, 2012). Además permitió generar una serie de recomendaciones con el fin de mejorar los procesos de mezcla del agua dentro del tanque y contribuir al entendimiento del proceso de desinfección y su relación con el tanque de almacenamiento de San Ignacio de Acosta.

## **ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Objetivo General**

Contribuir al conocimiento del efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable en un tanque de distribución.

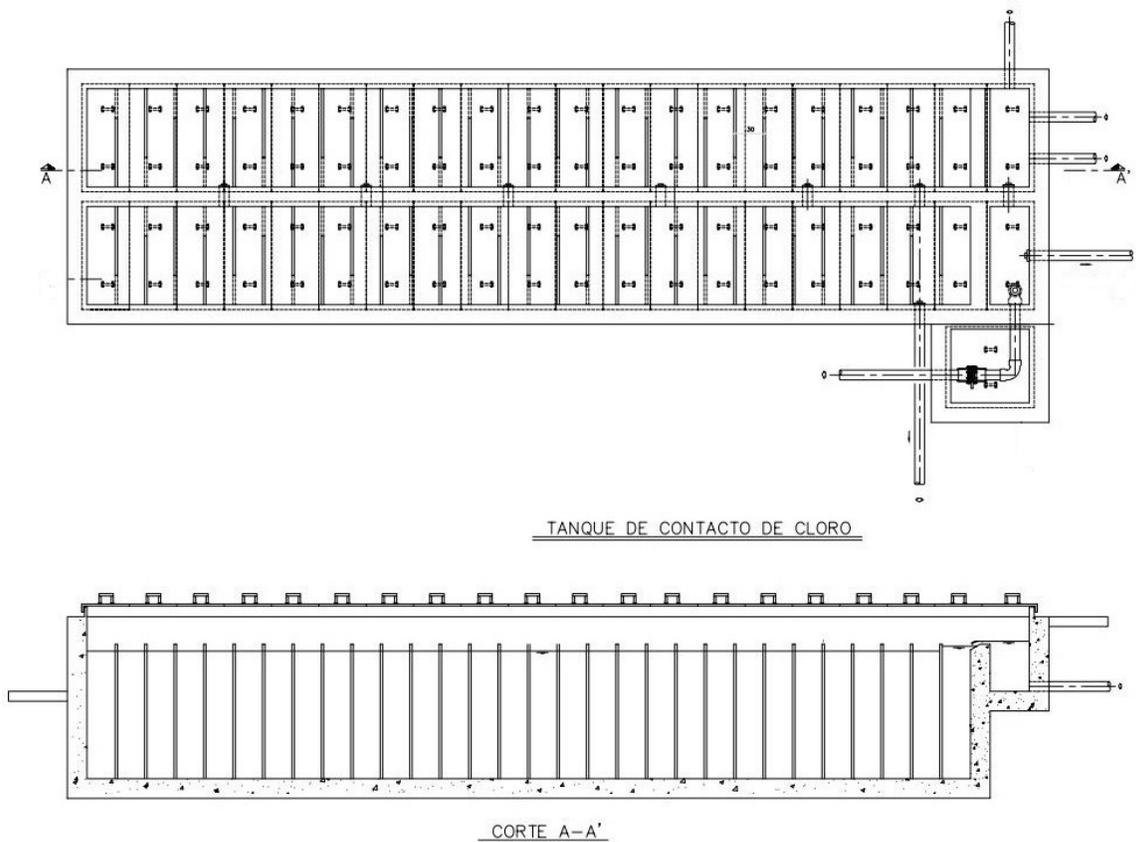
### **Objetivos Específicos**

- Evaluar experimentalmente las condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento.
- Determinar la variación espacio-temporal del cloro y la temperatura al interior del tanque.
- Brindar recomendaciones para mejorar la calidad del agua almacenada.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Cámara de Contacto de Cloro

La cámara de contacto tiene como función garantizar un tiempo de contacto fijo entre el agua y el cloro, de tal modo de asegurar la remoción de bacterias, virus y parásitos presentes en el agua. Son tanques que inician con la inyección del cloro donde se garantiza una mezcla rápida y homogénea, posteriormente se ingresa a una sección rectangular con paredes deflectoras internas (Angeloudis, Stoesser, Kim, & Falconer, 2013; Kothandaraman & Ralph, 1974) que permiten alcanzar un tiempo de retención mínimo de 30 min, tiempo recomendado para bacterias y virus, sin embargo, para la eliminación de protozoarios se puede necesitar un tiempo de contacto de hasta 60 min (Environmental Protection Agency, 2011; Mahmood, Pimblett, Grace, & Grayman, 2005). En casos donde se presenta la ausencia de ésta unidad, los procesos propios de esta componente se deben efectuar en el tanque de almacenamiento y por ende va a presentar limitaciones que no se deben desconocer (Boulos et al., 1999). La *Figura 1* representa un esquema de un tanque de contacto.



**Figura 1.** Tanque de Contacto La Habana  
Fuente: (Días & Rodríguez, 2008)

## 2.2 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son reactores, descritos principalmente por sus funciones, forma y ubicación (Department of Environment and Conservation, 2011; Muriel, 2008). Sin embargo, investigaciones han relacionado el tiempo de almacenamiento con la pérdida de calidad del agua (Clark, 2011; Kennedy et al., 1993). Comúnmente, el tanque de almacenamiento en algunos sistemas de tratamiento cumple la función de ser el espacio para la desinfección (Cordero, 2014), tal situación ocasiona disminución de la calidad del agua, debido a que el tanque no es un espacio propicio para dicho proceso (Angeloudis et al., 2013; Boulos et al., 1999; Stamou, 2002).

Dado que el almacenamiento es uno de los objetivos de la creación de los tanques, es necesario entender cómo se calcula el volumen de los mismos. El volumen del tanque según el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado (2001) debe ser calculado con la suma de los volúmenes de reserva para interrupciones, reserva para incendios y el volumen de regulación del consumo; por lo tanto, los normas no restringen el volumen a almacenar, por lo contrario sugiere almacenar la mayor cantidad de agua. El volumen de regulación del consumo que se calcula utilizando curvas de consumo reales pero que en ausencia de ellas este volumen es el 14 % del volumen promedio diario, el volumen de reserva para incendios depende de la población donde entre 5000,0 a 300000,0 habitantes se consideran volúmenes entre 90,0 m<sup>3</sup> y 920,0 m<sup>3</sup> y el volumen de reserva de interrupciones, es el correspondiente a un volumen de 4 horas del caudal promedio diario. En el *Cuadro 1* se resumen los beneficios y problemas asociados a los tanques de almacenamiento en diferentes investigaciones y esquematizadas para un estudio de tanques de almacenamiento en Canadá (Department of Environment and Conservation, 2011).

**Cuadro 1.** Beneficios de la presencia de un tanque de distribución y los problemas asociados al efecto del almacenamiento de los tanques de almacenamiento.

ID	Beneficios	Problemas
1	Permite igualar las tasas de bombeo	Pérdida de cloro residual libre
2	Permite igualar la oferta y la demanda de agua	Presencia de limitaciones en las condiciones de mezcla, inadecuada rotación de agua, zonas muertas
3	Suministra el agua en situaciones de emergencia	Presencia de estratificación del agua y el estancamiento
4	Minimiza la variación de presión	Problemas de la forma del tanque
5	Reduce o elimina los costos de tamaño de la bomba y de la energía	Discrepancia entre el tamaño del tanque y la demanda de agua
6	Aumenta la presión en el sistema de distribución	El uso excesivo de productos químicos de desinfección
7	Permite la mezcla de fuentes de agua	Formación de subproductos de desinfección
8	Proporciona tiempo de contacto para los desinfectantes	Genera una variación de la concentración del cloro residual
9	Proporciona agua para las demandas industriales	Propicia el deterioro de la calidad del agua
10	Alivia el aumento de presión	Vía para la contaminación patógena
11	Almacena agua tratada	Aumento de la edad de agua

Fuente: Department of Environment and Conservation, (2011)

### **2.2.1 Tiempo de Retención**

El tiempo de retención (TR) es un parámetro tradicionalmente utilizado para el diseño de reactores y se calcula dividiendo el volumen del tanque entre el caudal de ingreso del mismo, expresados en unidades homogéneas (Montoya, 2012; J. Pérez, 1992). Es el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir de la unidad, en el cual todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012). En la práctica, es difícil que esto ocurra, debido a las condiciones hidráulicas del fluido, (zonas muertas, cortos circuitos, entre otras) las cuales hacen imposibles las condiciones de flujo estable (Clark, 2011; Crittenden et al., 2012).

En el caso de los tanques de almacenamiento se justificaba la existencia de extensos tiempo de retención porque no existía la tecnología para evaluar los efectos ni controlar tales tiempos (Boulos et al., 1999). Esas barreras han sido eliminadas y actualmente se puede desarrollar una diversidad de estudios para estudiar el tiempo de retención (Laín et al., 2011; Montoya et al., 2012). De forma tal, urge estudiar el tiempo de retención en el reactor (American Water Works Association, 2011; Boulos *et al.*, 1999), para poder conocer la forma como ha quedado sometida la masa líquida a un determinado trazador (J. Pérez, 1992). El tiempo de retención de los tanques aumenta la edad del agua (Araya, 2012; L. D. Sánchez, Rodríguez, Escobar, & Torres, 2010) de tal manera, es necesario comprobar si el tiempo de retención estimado teóricamente se aproxima o no a la realidad. En el caso de que el tanque cumpla la función de la desinfección, no solo debe asegurarse que el tiempo de retención sea al menos 30 min para garantizar el tiempo de contacto (Environmental Protection Agency, 2011; Mahmood et al., 2005) sino que además, se garantice que la mezcla es adecuada y no hay interferencia por zonas muertas o cortos circuitos.

## **2.3 Hidrodinámica de los tanques de almacenamiento**

Con el fin de comprender el comportamiento de la masa de agua dentro de los tanques de almacenamiento es importante comprender los conceptos de: configuración de entrada y salida, niveles de agua de los tanques de almacenamiento, corto circuito y zonas muertas de mezcla.

### **2.3.1 Configuración entrada- salida**

La configuración de una entrada y de una salida del tanque de almacenamiento de agua puede tener un impacto importante en el funcionamiento con el tiempo de retención, la mezcla y la calidad del agua. Diferentes aspectos de la configuración de entrada - salida incluyen: la separación entre las mismas, la altura, el diámetro de las tuberías y la orientación (Crittenden et al., 2012; Department of Environment and Conservation, 2011).

La clave de la colocación de la entrada y la salida es asegurar el movimiento de agua a través del tanque, dado que puede darse el fenómeno de que el flujo gire sólo en la proximidad de la entrada - salida dejando una gran zona muerta. La ubicación de la entrada puede generar la energía del chorro, la cual puede ser utilizada para agitar el agua en el tanque, donde la orientación de entrada con respecto a la geometría del depósito determinará qué tan efectiva será la mezcla resultante. Entradas tangenciales tienden a promover una trayectoria de flujo

alrededor del perímetro del tanque resultante en una zona de estancamiento en el centro (Lain et al., 2011). Asimismo, una mejor mezcla se promueve mediante la orientación del chorro hacia la longitud máxima del tanque.

Con respecto a la ubicación de la tubería de salida, no debe ubicarse por el fondo del tanque, con el fin de evitar que se arrastren los sedimentos del interior del tanque a las tuberías de distribución. Por último, modificaciones como la reducción del diámetro de la tubería de entrada aumentará la velocidad y la energía cinética del agua entrante en el depósito y mejorará la mezcla. Por ejemplo, la instalación de una entrada en un nivel alto forzará el agua a fluir de arriba a abajo a lo largo de toda la profundidad del tanque (Department of Environment and Conservation, 2011; Muriel, 2008), generándose un chorro turbulento a la entrada el cual propicia la mezcla con el agua almacenada, eliminando zonas muertas de mezcla y los efectos de estratificación. Grayman et al. 2004 menciona que los chorros laminares tienen un menor efecto en comparación con los chorros turbulentos, por lo que la velocidad del chorro debe garantizar un número de Reynolds superior a 3000 acorde a (Montoya, 2012).

### **2.3.2 Nivel de agua almacenada en el tanque**

Los niveles de agua en el tanque dependen en gran medida del patrón de consumo y del caudal de entrada. Araya (2012) identificó que la baja variación del nivel de agua en los tanques genera una posible zona muerta, la cual se puede relacionar con el incremento en la edad del agua y la reacción del cloro. Kennedy et al. (1993) también encontró que la calidad del efluente de los tanques de mezcla completa se deterioró con la disminución de cambio volumétrico. Por lo tanto, se deben comprender las variaciones en los niveles de los tanques de almacenamiento dado que modifican la determinación el cálculo del volumen del tanque (Mahmood et al., 2005), consecuentemente influye en los métodos de análisis de hidrodinámica (J. Pérez, 1992). Los niveles de agua en los tanques deben ser estudiados y minimizados, garantizando el servicio y la calidad del agua distribuida por el tanque (Araya, 2012; Montoya, 2012).

### **2.3.3 Corto Circuito**

Un corto circuito se caracteriza por un segmento de la corriente de fluido con un tiempo de residencia considerablemente más corto que el tiempo medio de residencia hidráulica, hasta aproximarse a un tiempo de retención igual a cero (Crittenden et al., 2012; J. Pérez, 1992; Yu, 2009). Un corto circuito es un problema de diseño común en reactores de flujo de mezcla completa, y es particularmente importante en los procesos donde se requiere un alto nivel de eliminación, tales como la desinfección (Yu, 2009). Un corto circuito se desarrolla dentro del reactor debido a un diseño insuficiente que no propicia la mezcla, además, por la ubicación de las estructuras de entrada y salida, y la relación de la longitud del tanque en comparación con la profundidad y anchura. Un corto circuito se produce también cuando hay diferencias de densidad producto de variaciones en la temperatura o la concentración de materiales disueltos o suspendidos (Crittenden et al., 2012). Es importante destacar que Alberts *et al.* (2005), encontraron que las columnas estructurales mejoran la mezcla y minimizan la generación de zonas muertas y cortos circuitos (Yu, 2009), no obstante, Muriel (2008)

contradice tal afirmación porque encontró que las barreras generaban un incremento en las zonas muertas

#### **2.3.4 Zonas muertas de mezcla**

Existen zonas dentro del tanque de almacenamiento donde el agua queda retenida por un cierto tiempo sin ser mezclada con el resto del volumen del tanque (J. Pérez, 1992). Por lo tanto, una zona muerta es una zona aislada que se recircula en sí misma, generando un volumen de agua que no sale del tanque hasta que la situación hidrodinámica que la generó sea interrumpida. Es así que las zonas muertas tienden a acumular un tiempo de retención infinito contrario a los cortos circuitos donde el tiempo de retención del agua se aproxima a cero.

Respecto a las causas de las zonas muertas se encuentra que en la configuración de la distribución de las válvulas del sistema, donde el cierre de estas, pueden dar lugar a puntos muertos (U.S. Environmental Protection Agency, 2002), en el caso de los tanques las tuberías de lavado son posibles puntos muertos. Una causa de la zona muerta de mezcla también puede ser ocasionada por mínima variación de los niveles de tanque de almacenamiento (Araya, 2012). La forma del tanque además puede ocasionar zonas muertas al propiciar el movimiento tangencial en tanques circulares o un movimiento lateral en tanques rectangulares (Department of Environment and Conservation, 2011). También al ser una zona muerta una masa de agua que acumula una edad de agua superior a la esperada puede ser ocasionada por el efecto de un corto circuito que no permite a un volumen del agua salir del tanque.

#### **2.4 Comportamiento del cloro residual libre**

Las reacciones que el cloro presenta en la desinfección son con micro contaminantes orgánicos e inorgánicos, dándose una alta selectividad a compuestos orgánicos (Deborde & von Gunten, 2008). Las reacciones del cloro se dan en dos fases, la primera dura entre 30-60 min y la segunda es un proceso más lento que puede alcanzar hasta días para registrar una ausencia total de la concentración del cloro (Araya, 2012; L. D. Sánchez et al., 2010). Las reacciones se pueden dar con la masa de agua y las sustancias y microorganismos presentes (Ecuru, Okot-okumu, & Okurut, 2011), con las paredes de los tanques de almacenamiento y con la red de distribución ocasionada por los materiales que los componen (Araya, 2012). Además, la concentración de cloro al interior de un tanque no necesariamente es homogéneo (Montoya, 2012), y las diferencias de concentración pueden generar que se encuentren diferentes concentraciones de cloro residual en el sistema de distribución limitando la eficacia de la desinfección. Las variaciones de la concentración de cloro en la red exponen a contaminación intermitente del agua (Clark, 2011).

Los tanques de almacenamiento de agua potable son espacios en los que ocurren cambios químicos y biológicos impactando el proceso de desinfección (AWWA, 2011; Clark, 2011). Araya (2012) identificó que entre las variables asociadas a la influencia del comportamiento del cloro residual está el efecto del almacenamiento debido al incremento de la edad de agua y Montoya (2012) encontró que la concentración de cloro residual libre variaba según la temperatura ya que el tanque sufría estratificación térmica.

### **2.4.1 Edad de Agua del Tanque**

La edad del agua es principalmente una función de la demanda de agua, la operación del sistema, y el diseño del sistema. A medida que aumenta la demanda de agua, la cantidad de tiempo que cualquier litro de agua determinado reside en el sistema de distribución disminuye (U.S. Environmental Protection Agency, 2002). La edad de agua es el factor de mayor significancia en el deterioro de la calidad del agua dentro de los sistemas de distribución (Araya, 2012; Montoya, 2012; Muriel, 2008). Bases de datos en la industria del agua indican un promedio de 1,3 días de tiempo de retención en los sistemas de distribución, con un tiempo máximo de 3 días basados en la evaluación de 800 sistemas de distribución en los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, 2002). También, el cloro residual en el agua puede caer por debajo de los niveles requeridos en las zonas muertas (Yu, 2009), debido a la edad de agua acumulada, propiciando el crecimiento de microorganismos. Mediante los métodos hidrodinámicos es posible determinar la edad de agua acumulada en los tanques de almacenamiento (Crittenden et al., 2012).

La edad del agua y las concentraciones de cloro, están relacionadas porque la concentración presente en la masa de agua disminuirá en el tiempo. La concentración depende de la cinética de decaimiento que a su vez va a depender de la actividad microbiológica, la temperatura, la nitrificación, la exposición a la luz ultravioleta y a la cantidad de y tipo de compuestos que generan demanda del desinfectante tales como compuestos orgánicos e inorgánicos (American Water Works Association, 2011). Por ejemplo en agua con baja demanda, puede haber una permanencia del cloro hasta obtener un nivel 0 en 30 días (Araya, 2012), por el contrario se encuentran casos de menos de 24 horas (Comisión Nacional del Agua, 2002).

### **2.4.2 Estratificación Térmica**

La estratificación térmica es la presencia de diferencias de 1°C o más longitudinalmente o verticalmente en el tanque, generando diferencias de densidad en el agua que no permiten una mezcla completa del volumen almacenado. La densidad varía con la temperatura, de tal forma que en un tanque de almacenamiento pueden ocurrir fenómenos de enfriamiento o calentamiento del agua. Un diferencial de temperatura puede causar fuerzas flotantes negativas, las cuales afectan negativamente la mezcla de agua. Según Lansey y Boulos (2005) citados por Montoya (2012) la flotabilidad negativa se presenta cuando el agua entrante es más fría y densa al contenido del tanque. Específicamente para el estudio del tanque de Montoya la estratificación térmica se consideró como una de las causas más importantes del envejecimiento del agua, dado a la presencia de flotabilidad negativa, influyendo en el agua y la masa con menor tiempo de retención resultaba salir primero, este fenómeno se presentaba en los periodos de llenado del tanque.

## **2.5 Tipos de flujo de un reactor**

Los tanques de almacenamiento son reactores y como tales se puede utilizar metodologías para conocer el comportamiento y similitud con reactores ideales o no ideales (Clark, 2011; Crittenden et al., 2012). En los reactores no ideales, las condiciones hidráulicas y de mezcla tienden a ser complejos (por ejemplo, una cámara de contacto de cloro). Los reactores ideales se supone que tienen uniformidad en mezcla y condiciones hidráulicas, dependiendo de la

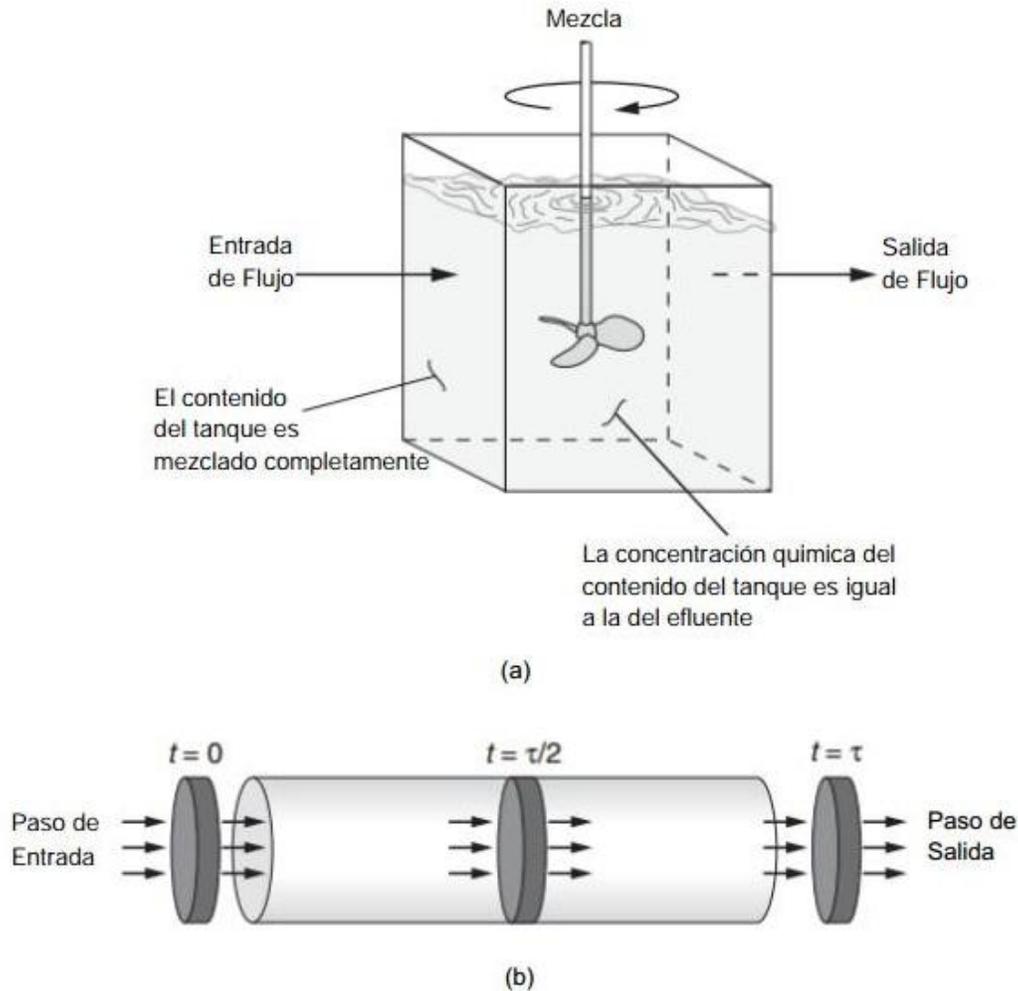
configuración específica del reactor (Crittenden et al., 2012). Las configuraciones del reactor comunes incluyen: los reactores de flujo de mezcla completa y reactores de flujo pistón y los reactores no ideales que resultan de la combinación de los dos anteriores.

### **2.5.1 Reactor de flujo de mezcla completa**

Un reactor con flujo mezclado se puede imaginar como la mezcla completa e instantánea de cada nuevo elemento de agua que entra en un reactor con la totalidad de que se encontraba en el reactor de agua (Crittenden et al., 2012; Montoya, 2012). Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor (J. Pérez, 1992), siendo este un reactor fácil de modelar (Crittenden et al., 2012; Rossman, 2002). Dado que el agua no sólo ingresa sino también abandona el reactor, constantemente algunas moléculas están dentro del reactor un tiempo de retención muy corto (siendo el límite un tiempo igual a cero) y otras superan el tiempo de retención (considerándose infinito cuando superan hasta tres veces el tiempo de retención) (Crittenden et al., 2012; Laín et al., 2011; J. Pérez, 1992). La *Figura 2 (a)* presenta un diagrama de un reactor de mezcla completa.

### **2.5.2 Reactor de flujo pistón**

Se describe como el reactor donde absolutamente ninguna mezcla se produce, si se imagina el agua que ingresa en un determinado tiempo  $t$  como un bloque y así se separa un siguiente bloque para el tiempo  $t+1$ , hasta  $t$  infinito, cada uno de los bloques de elementos que entra viaja del afluente al efluente sin tener intercambios con otros bloques (Montoya, 2012; J. Pérez, 1992). De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y todos los bloques poseen el mismo tiempo de retención (Crittenden et al., 2012). El diagrama de este reactor se aprecia en la *Figura 2 (b)*.



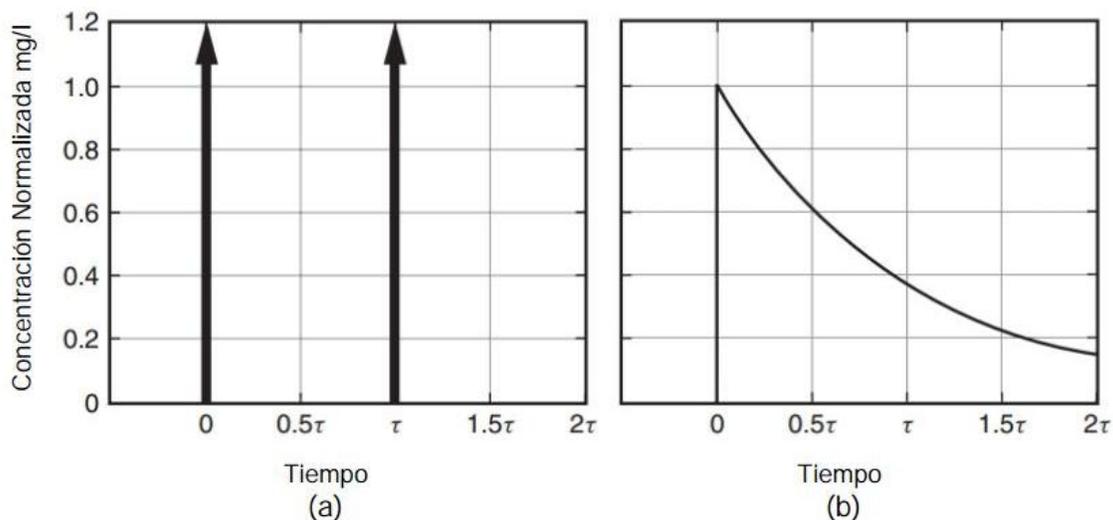
**Figura 2.** Diagrama de dos reactores ideales (a) Reactor de Flujo de Mezcla Completa y (b) Reactor de Flujo Pistón.

Fuente: Crittenden et al., (2012)

### 2.5.3 Curvas de trazadores para reactores ideales

Los estudios con trazadores son reconocidos por la USEPA. Dichos estudios tienen amplias ventajas debido que permiten calcular los tiempos de retención y la edad del agua acumulada dentro del tanque; sirven para calibrar modelos hidráulicos, evaluar grados de mezcla de fuentes, determinan el impacto ambiental de contaminación e identifican puntos de muestreo apropiados en la red (Clark, 2011). Es así, que los trazadores son sustancias conservativas, sin reacción con el contenido del reactor y que preferiblemente no son costosas y no presentan un riesgo a la salud para los casos necesarios (Clark, 2011; Crittenden et al., 2012; J. Pérez, 1992). Entre las sustancias recomendadas para usarse se encuentra el cloruro de sodio la cual al ser inyectada en el reactor puede ser controlada a la salida por medio de la conductividad (Clark, 2011), donde el ion cloruro resultante pasa por el reactor sin sufrir cambios debido a que es un ion inorgánico que no se absorbe en partículas ni sufre transformaciones biológicas (Crittenden et al., 2012; J. Pérez, 1992).

Para cada uno de los reactores explicados en las secciones 2.3.1 y 2.3.2 existen curvas ideales resultantes de una prueba de trazador que son representadas en la *Figura 3*, donde la *Figura 3(a)* representa la curva de un reactor de flujo pistón y la *Figura 3(b)* el flujo completamente mezclado.



**Figura 3.** Curvas de trazador para (a) Reactor de Flujo Pistón y (b) Reactor de Flujo de Mezcla Completa.

Fuente: Crittenden et al., (2012)

En la realidad los reactores no presentan un solo tipo de flujo y por lo tanto se estima el porcentaje que domina mediante modelos hidrodinámicos y según sea la función, así se realizaran modificaciones para alcanzar el mayor grado del porcentaje ideal (Crittenden et al., 2012; L. D. Sánchez et al., 2012). En el caso de los tanques de almacenamiento es ideal tener un mayor porcentaje de mezcla completa que garantice un agua con combinación de edad y de concentración de cloro (Montoya, 2012). En contraposición se encuentra que las cámaras de cloración deben acercar su porcentaje a flujo pistón y tener un tiempo mínimo de contacto de 30 min (Mahmood et al., 2005; Stamou, 2002).

## 2.6 Modelos Hidrodinámicos

Una vez aplicada una prueba de trazador es necesario aplicar modelos que permitan interpretar los datos, si bien existe actualmente tecnología para modelar reactores por medio de modelos computacionales, estos requieren de complejos equipos y materiales, obteniendo resultados tan válidos como utilizando modelos simplificados donde además generalmente se facilita la comprensión de los resultados (Crittenden et al., 2012). En contraposición los métodos de Curva de Tendencia, análisis de Wolf-Resnick, Tanques en Serie y Número de Peclet permiten analizar los reactores de manera analítica.

### 2.6.1 Análisis de Wolf- Resnick

Este es un método que genera los porcentajes de mezcla completa (M), flujo pistón (P) y zonas muertas (m) presentes en el reactor. Estos porcentajes son obtenidos por medio de graficar la resta de la unidad menos la función acumulativa (1-F(t)) en escala logarítmica

contra el tiempo normalizado (J. Pérez, 1992; J. Sánchez, 2010; L. D. Sánchez et al., 2012). A la curva resultante (*Figura 4*) se le dibuja una tangente para obtener parámetros que se utilizan en las ecuaciones para determinar los porcentajes de cada flujo.

Las ecuaciones a utilizar para el cálculo de los porcentajes son:

$$P = \frac{\theta \cdot \tan \alpha}{0,435 + \theta \cdot \tan \alpha} \quad (\text{Ec. 1})$$

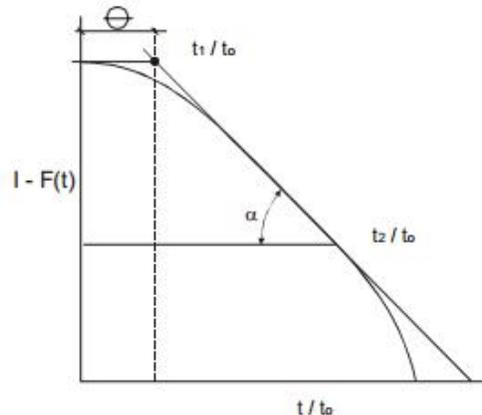
$$M = (1 - P)(1 - m) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

La *Figura 4* representa la curva esperada en el análisis de Wolf-Resnick, donde la recta dibujada es tangencial a la curva de trazador, sin embargo, esta recta puede ser la curva de mayor ajuste a la curva (J. Sánchez, 2010; L. D. Sánchez et al., 2012).



**Figura 4.** Curva del método de Wolf-Resnick

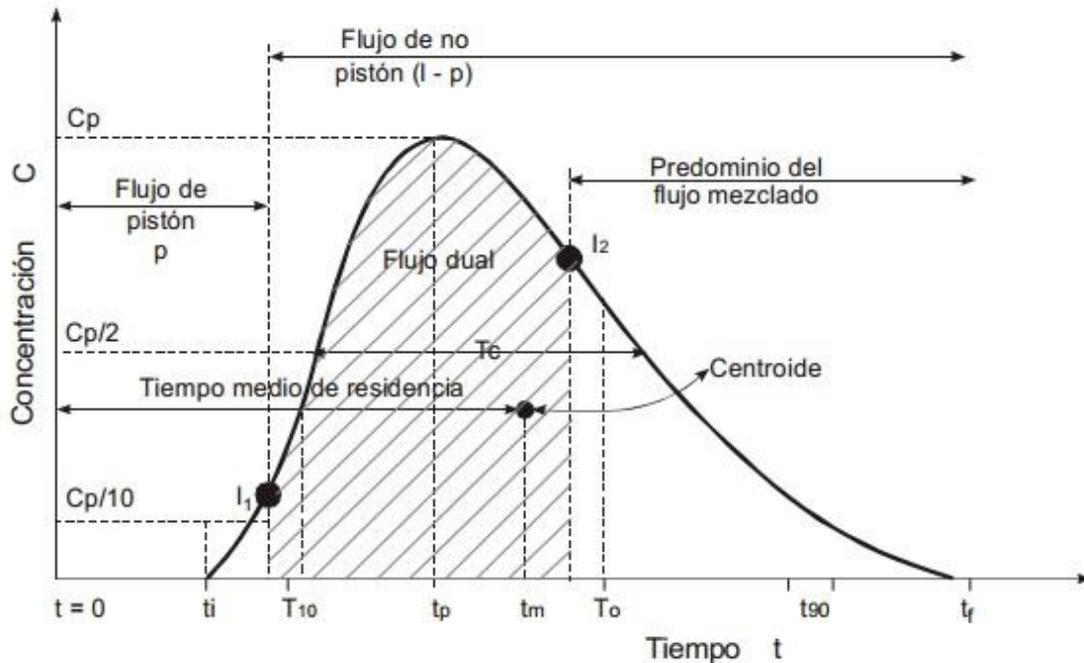
Fuente: J. Pérez, (1992)

En que  $\theta$  es Normalización del tiempo  $t$ ,  $t_1$  es el primer tiempo en el que corta la recta;  $t_2$  es el segundo tiempo donde corta la recta;  $t_0$  es el tiempo inicial donde se detecta el trazador y  $\alpha$  es ángulo de inclinación de la recta.

## 2.6.2 Curva de Tendencia

Consiste en graficar la concentración del trazador contra el tiempo que permaneció en el interior del reactor. Posteriormente se realiza un análisis de los diferentes indicadores y la forma que posee la curva, de tal manera se puede saber el tipo de mezcla, el tiempo de

retención media y el índice de Morril (J. Pérez, 1992; Rojas & García, 2009; J. Sánchez & Cardona, 2009). La *Figura 5* presenta un análisis de curva de tendencia, donde se presentan como ejemplo algunos de los indicadores que se pueden analizar según el interés de trazar esta curva.



**Figura 5.** Ejemplo de un análisis de una curva de tendencia.  
Fuente: J. Pérez, (1992)

### 2.6.3 Número de Peclet

El número Peclet ( $Pe$ ) es la relación entre el transporte de masa. Este número es calculado por medio de la ecuación 6, donde  $\Theta$  es la normalización del tiempo y  $E$  es la normalización que representa la edad de agua. El significado de esta ecuación se da para números altos producto del control de la advección del transporte de masa en el reactor debido a que la dispersión y advección actúan en paralelo. A medida que el número de Peclet tiende a infinito, el Reactor de Flujo Pistón es el reactor ideal que corresponde a estas condiciones. A la inversa, para un número de Peclet próximo a cero, no hay transporte por advección; sólo se produce dispersión axial, por tanto el reactor se aproxima a un Reactor de Flujo de Mezcla Completa (Crittenden et al., 2012). Además permite determinar el número de dispersión  $d$  (Ec.7), parámetro para determinar la efectividad del proceso de desinfección.

$$E(\theta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta \left(\frac{1}{Pe}\right)}} e^{-\frac{Pe(1-\theta)^2}{4\theta}} \quad (Ec. 6)$$

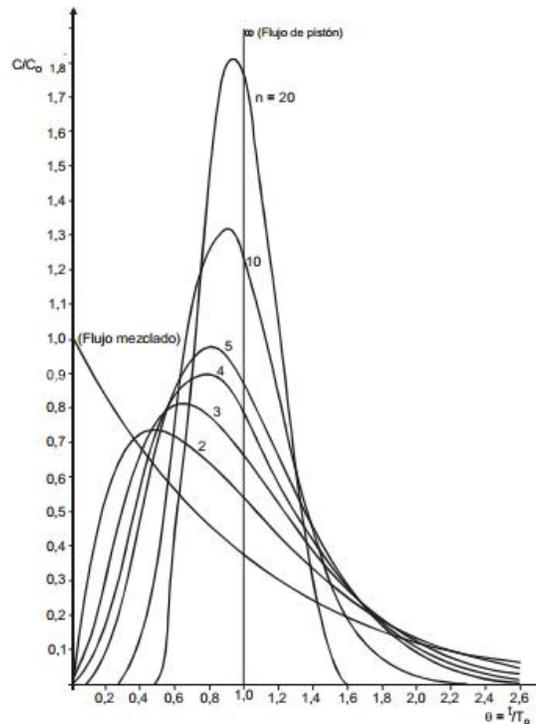
$$d = \frac{1}{Pe} \quad (Ec. 7)$$

### 2.6.4 Tanques en Serie

El desarrollo del análisis de tanque en serie se basa en un volumen total que puede estar comportándose como uno solo (mezclándose constantemente) o en diferentes volúmenes similares producto de algún efecto en el tanque como estratificaciones térmicas. El propósito del método es determinar si dividiendo ese volumen en varios compartimientos más pequeños mejorará la eficiencia principalmente para reactores con funcionamiento de desinfección (Cano, 2010; Crittenden et al., 2012). La forma de las curvas cambia dramáticamente a medida que el número de tanques en serie aumenta. Para mezcla completa el número esperado es un valor bajo de tanques en serie, siendo uno el valor ideal ya que representa que el tanque se comporta como uno solo; por el contrario un número que tiende al infinito aproxima su funcionamiento al de un reactor de flujo pistón, debido a que su funcionamiento es como una secuencia de volúmenes de agua que no se relacionan entre sí (J. Pérez, 1992). La ecuación utilizada es la número 8, donde  $E(t)$  es la normalización que representa la edad del agua,  $n$  es el número de tanques en serie,  $t$  es el tiempo y  $\bar{t}$  es el tiempo normalizado (Crittenden et al., 2012).

$$E(t) = \frac{n^n t^{(n-1)}}{t^n (n-1)!} e^{-\frac{nt}{\bar{t}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

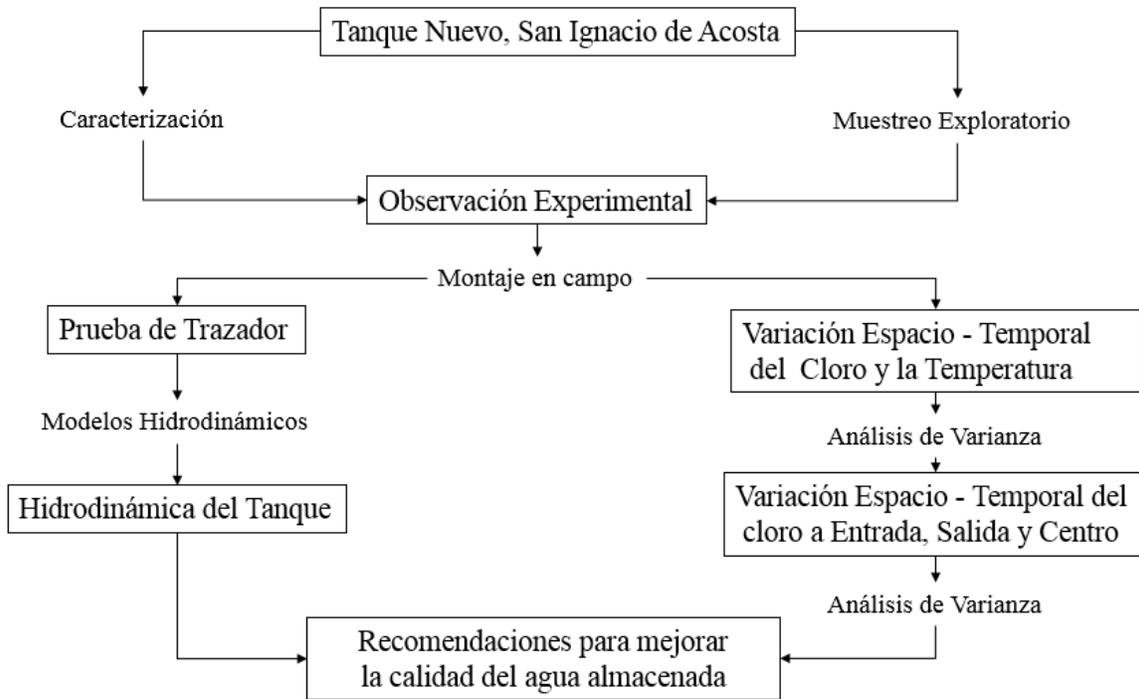
La representación del método de tanques en serie se ejemplifica en la *Figura 6*, donde se aprecia el comportamiento esperado para un reactor de flujo de mezcla completa y para un reactor de flujo pistón.



**Figura 6.** Ejemplo de las curvas resultantes para el método de tanques en serie.  
Fuente: J. Pérez, (1992)

### 3. MATERIALES Y METODOS

La investigación se clasificó como un estudio aplicado. Al no existir la posibilidad de hacer replicas en tanques idénticos y ante la dificultad de controlar variables como temperatura y concentración de cloro residual libre, el estudio se clasifica como observación científica ya que no se realizaron tratamientos de un diseño de experimento. Se incluyó trabajo de campo y modelos matemáticos, con el fin de comprender el comportamiento del cloro residual y la calidad de agua en un tanque de almacenamiento. Lo anterior a partir, de una serie de criterios tanto para la selección de puntos de muestreo, como para los protocolos a utilizar. Finalmente, se brindó una serie de estrategias operativas y de mantenimiento para garantizar la calidad en el tanque de almacenamiento. En la *Figura 7*, se presenta el esquema metodológico seguido en el estudio, y en las siguientes secciones se explica a detalle la metodología empleada para alcanzar el objetivo general.



**Figura 7.** Esquema metodológico del estudio

#### 3.1 Criterios de selección del sitio de estudio

Se fijaron lineamientos mínimos que debería cubrir la zona de estudio, la decisión de seleccionar el tanque de almacenamiento del acueducto de San Ignacio de Acosta como área de estudio se realizó con base en los siguientes criterios:

- Cuenta con sistema de cloración en funcionamiento, ubicado a una distancia del tanque, permitiendo una reacción inicial del cloro con el agua antes de entrar al sistema.
- El tanque se encuentra protegido y en buenas condiciones.

- c. Posee acceso a muestreo en las cuatro esquinas, además los administradores permitieron la creación de un punto de muestreo en el centro del tanque.
- d. Tiene un piezómetro para el control de los niveles del agua dentro del tanque.
- e. Es rectangular dado que en general en el país se encuentran tanques de almacenamiento de esta forma.
- f. El funcionamiento del tanque es continuo.

La localización del tanque se aprecia en la *Figura 8*, además se observan características del tanque antes mencionadas en la *Figura 9*.



**Figura 8.** Localización del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta  
Adaptado de Google Maps, 2014

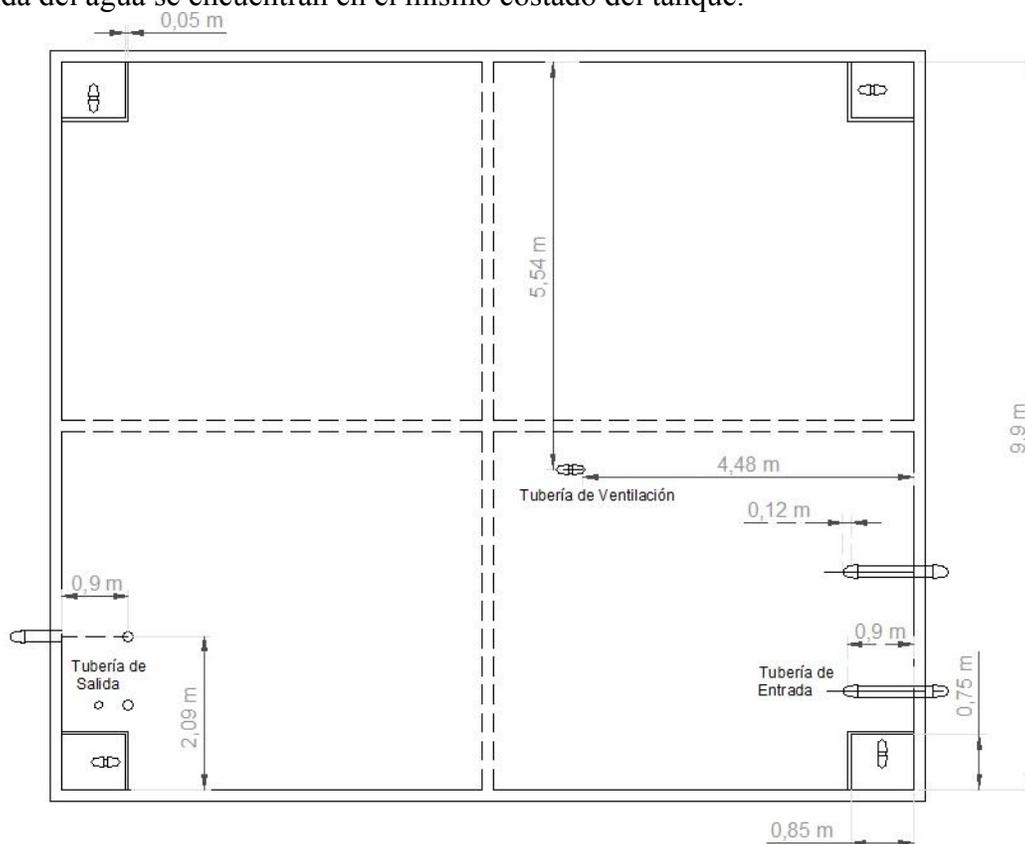


**Figura 9.** Tanque de Distribución de San Ignacio de Acosta

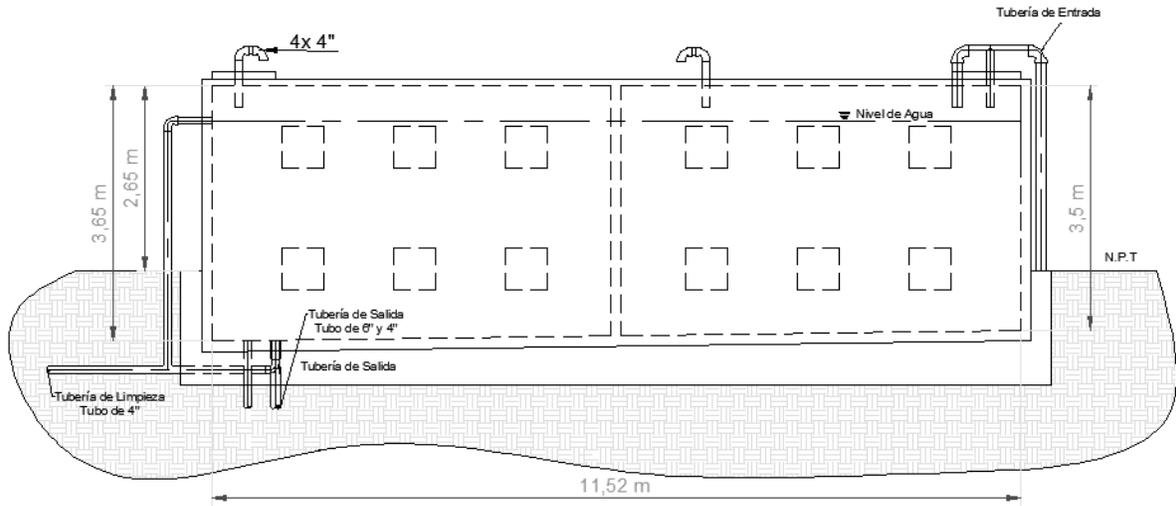
### 3.2 Descripción del tanque de San Ignacio de Acosta

El sistema de distribución del AyA de Acosta está compuesto por una captación en el Río Jorco, fuente que es buena calidad según el decreto 33903 MINAE-S, y respecto al indicador de Coliformes Fecales /100 ml se encuentra que tiene valores de 230 y 420 en verano e invierno respectivamente (Mora, Mata, & Portuguez, 2011). El sistema tiene como pretratamiento un desarenador, el tratamiento primario es con coagulación y floculación con sulfato de aluminio, un sedimentador, y dos filtros con carbono activado paralelos y finaliza con el dosificador de cloro gaseoso. Al no poseer cámara de contacto, el cloro es inyectado a la tubería y es conducido directamente al tanque de almacenamiento, que abastece a 1150 abonados.

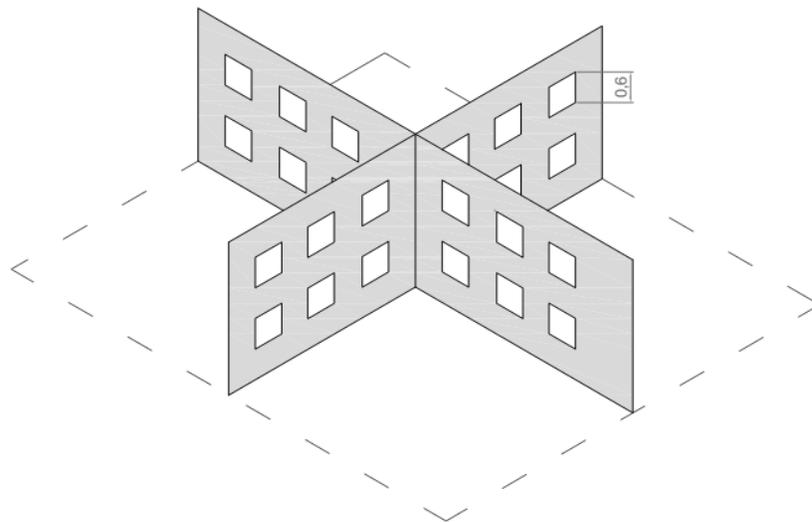
El Tanque Nuevo es un tanque de compensación que abastece a dos tanques más, uno para la comunidad de Guaitil y el otro es el Tanque Viejo de San Ignacio de Acosta. La investigación se desarrolló en un tanque rectangular con dimensiones de 9,9 metros de ancho; 11,5 metros de largo y 3,5 metros de alto, que se aprecian en la *Figura 10* y la *Figura 11*. El tanque posee dos entradas de caudal de 6 pulgadas de diámetro, solo una está en funcionamiento, la cual se ubica a una altura de 2,5 metros. Además posee dos tuberías de salida con diámetros de 6 y 4 pulgadas. El caudal de entrada promedio es de 18 litros por segundo y el de salida de 11 litros por segundo para la tubería de 6 pulgadas. El tanque posee cuatro paredes internas con ventanas cuadradas de 60 centímetros en dos filas apreciables en la *Figura 12*, por lo que el volumen efectivo del tanque es de 336,5 m<sup>3</sup>. Además la entrada y salida del agua se encuentran en el mismo costado del tanque.



**Figura 10.** Vista en planta del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta



**Figura 11.** Vista lateral del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta



**Figura 12.** Vista interior del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta

### 3.3 Montaje de Pruebas de campo

Para el desarrollo de la pruebas de campo se necesitó determinar caudales de entrada y salida, temperatura al interior del tanque, conductividad del agua a la salida y cloro residual libre a la entrada, salida e interior del tanque. Los equipos que fueron utilizados son descritos en el *Cuadro 2*.

**Cuadro 2.** Descripción de los equipos para medir las variables de la investigación.

ID	Variable	Equipo	Límite de detección	Precisión Esperada
1	Caudal	Medidor de Flujo Ultrasónico Innova-Sonic 210 series Sierra Instruments	0~12 m/s	±1 % de la lectura
2	Temperatura	Termocupla tipo J	0~750 °C	±1 % de la lectura
3	Conductividad	Fisher Scientific™ accumet™ AP75 Portable Waterproof Conductivity	0,00 μS – 199,9mS	±1 % de la lectura
4	Cloro residual	Colorimétrico HACH Modelo 59530-00	0-2,5 Abs	±0,0015 Abs

La *Figura 13* ilustra los instrumentos de medición descritos anteriormente, se muestra el medidor ultrasónico de caudal, la termocupla, el colorimétrico y el medidor de conductividad en el orden de mención.



**Figura 13.** Equipos de muestreo utilizados durante la ejecución del estudio

### 3.4 Métodos de análisis de las variables

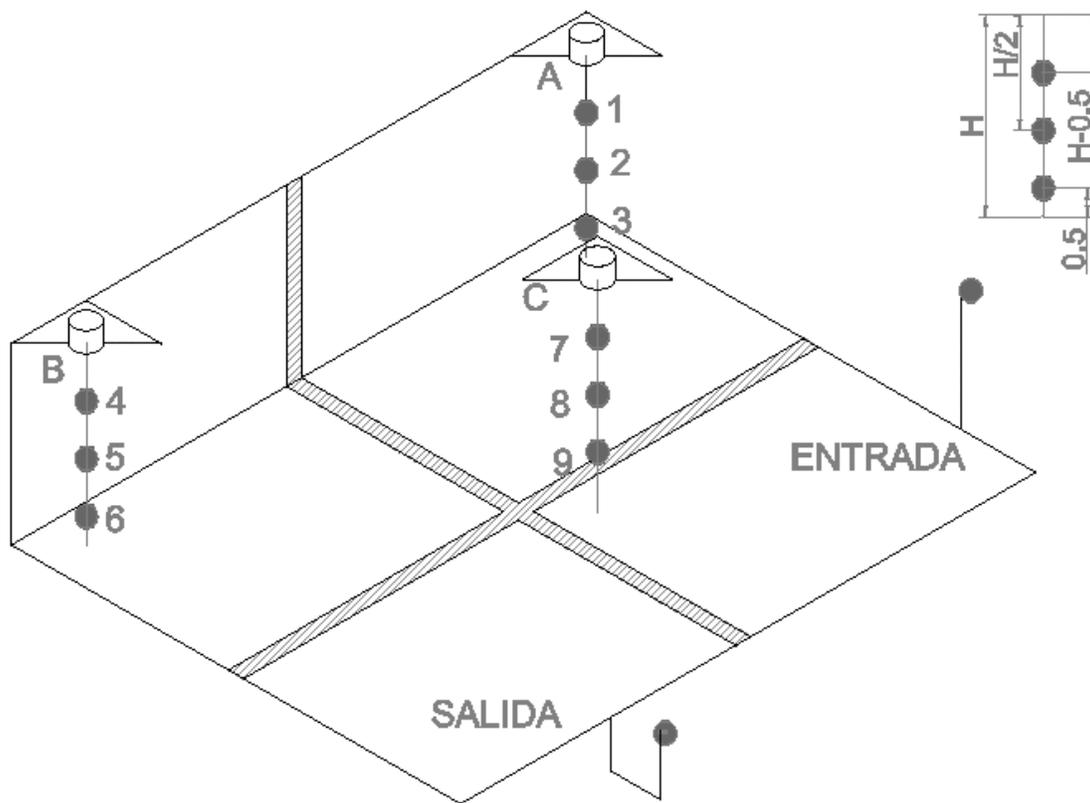
Las mediciones de las variables se realizaron en campo. Los equipos utilizados permitían realizar las determinaciones con facilidad y la descripción del método para cada variable se detalla en el *Cuadro 3*.

**Cuadro 3.** Descripción de los métodos utilizados para la medición de las variables

ID	Variable	Descripción del Método de Medición
1	Caudal	Se verificó que la tubería cumpliera con lo establecido por el equipo, se instalaron los transductores y se verificó la intensidad y la calidad de la señal. Finalmente se procesaron los datos registrados por el equipo acorde con Araya (2012).
2	Nivel de agua	Se utilizó un piezómetro instalado por el ente operador, teniendo una presión de lectura de ±0,1m
3	Conductividad	Se usó el medidor AP75 Portable Waterproof Conductivity para determinar la conductividad en campo.
4	Temperatura	Se instalaron seis termopares dentro del tanque y fueron conectados a la Termocupla, desde donde se leyó la temperatura de cada punto
5	Cloro Residual	Se utilizó el medidor Colorimétrico HACH en un rango bajo de concentración de cloro residual. Las muestras fueron analizadas en el momento.

### 3.5 Selección de puntos de muestreo

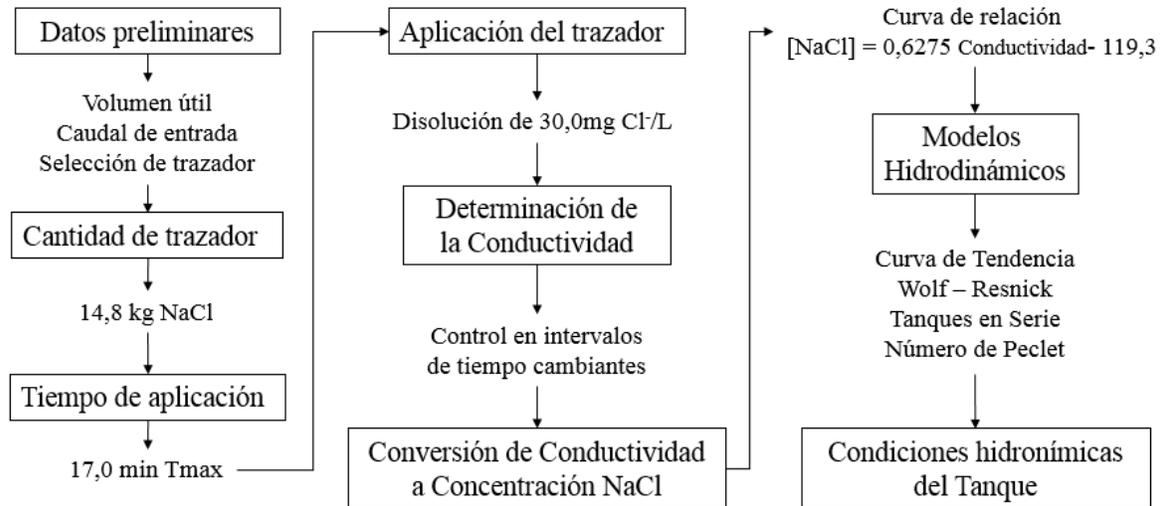
La mayor probabilidad de presencia de zonas muertas de mezcla son las esquinas para un tanque rectangular (Department of Environment and Conservation, 2011). Igualmente, Montoya et al (2012) incluye la posibilidad de zonas muertas por diferencias de densidad. De acuerdo a estos argumentos, se seleccionan once puntos de muestreo, nueve al interior del tanque, uno a la entrada y otro a la salida. Las ubicaciones corresponden a dos esquinas contrarias a los puntos de entrada y salida, además de un punto cercano al centro del tanque. La altura de los puntos internos estuvo sujeto al nivel de agua dentro del tanque siendo que el punto más profundo estaba 0,5m por encima del fondo del tanque; el punto intermedio estaba a la altura  $H/2$ , donde  $H$  es el nivel de agua del tanque en metros y el punto superior se encontraba a  $H-0,5$ m. La ubicación de los nueve puntos internos se describe en la *Figura 14*, donde la esquina A esta junto a la esquina de la entrada y la esquina B junto a la esquina de salida, el punto C que representa el centro del tanque se encuentra entre las paredes internas, señaladas por el área rayada, en el cuadrante de la entrada. Los once puntos al interior del tanque fueron utilizados para el control de la variación de temperatura y cloro residual, y para el ensayo del trazador únicamente se utilizó el punto de entrada y el de salida del agua.



**Figura 14.** Localización de los puntos de muestreo.

### 3.6 Prueba de Trazador

El objetivo de realizar un estudio de trazador fue generar datos para ser utilizados en diferentes modelos que permitieron determinar el comportamiento hidrodinámico del reactor (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2005). El ensayo de trazador se efectuó con la inyección instantánea del trazador Cloruro de sodio, a la entrada del tanque acorde a Montoya (2012). El control en el punto de muestreo se empezó al inicio de la adición del trazador. En la *Figura 15* se aprecia un resumen del procedimiento realizado.



**Figura 15.** Esquema metodológico del ensayo del trazador

#### 3.6.1 Cantidad de Trazador para el ensayo

El *Cuadro 4* contiene un resumen de las medidas del tanque, además se incluye el volumen de las paredes internas del tanque que se resta al volumen total del tanque para obtener el volumen útil del tanque.

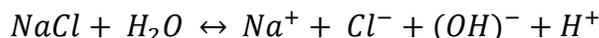
**Cuadro 4.** Parámetros geométricos del Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta

Parámetro	Valor
Ancho (m)	9,9
Largo (m)	11,5
Altura (m)	3,0
Volumen total (m <sup>3</sup> )	341,5
Volumen de paredes (m <sup>3</sup> )	4,9
Volumen útil (m <sup>3</sup> )	336,5

Se determinó el tiempo de retención teórico del tanque por medio de la ecuación 1, utilizando el caudal promedio de 0,01m<sup>3</sup>/s obtenido en el muestreo exploratorio, según sección 3.4.

$$TR = \frac{Volumen}{Caudal} = \frac{336,5m^3}{0,01 m^3/s} = 8,5 \text{ horas} = 8 \text{ horas } 32 \text{ minutos } (1)$$

La cantidad (PT) de trazador necesaria para el ensayo se determinó estableciendo que la pureza (*l*) del cloruro de sodio es 99,8 % (Ver *Anexo 4*). La concentración deseada de ion cloruro a la entrada del tanque fue de 30,0 mg/l, acorde a Pérez (1992). La cantidad de trazador además cumplía con los valores establecidos para el agua de consumo humano (Clark, 2011) ni alcanzaba saturación del trazador en el tanque. Como el trazador de cloruro de sodio esta dado en la literatura en referencia al ion cloruro para determinar la cantidad de trazador, las siguientes ecuaciones se basan en este ion.



Con base a la fórmula de Pérez (1992) se determinó la cantidad de trazador necesaria para la prueba, con la excepción de que el volumen fue modificado a 300,0 m<sup>3</sup> porque en las horas del estudio el nivel del tanque varía entre 2,5 a 2,7 metros, esto redujo la cantidad del trazador necesario.

$$P = [Cl^{1-}] \frac{mg}{l} \times V \times k \times l$$

$$P = \frac{30,0mg}{l} Cl^{1-} \times \frac{1000,0l}{1m^3} \times \frac{1 mol NaCl}{1 mol Cl^-} \times \frac{1 mol Cl^-}{35,4 g Cl^-} \times \frac{58,4 g NaCl}{1 mol NaCl} \times \frac{300,0m^3}{100,0 g Sal} = 14,8 kgSal$$

Con la densidad del trazador se determinó el volumen de agua necesario para disolver los 14,8 kg del mismo. Además se calculó el tiempo máximo de aplicación del trazador dividiendo el tiempo de retención calculado entre 30 (Montoya, 2012; J. Pérez, 1992), obteniendo un valor de 17,0 min.

### 3.6.2 Protocolo de ejecución del ensayo de trazador

Una vez obtenidos los datos previos se procedió a ejecutar la prueba del trazador. La prueba se realizó entre las 8:00 am y las 5:00 pm durante el cual se determinó la conductividad de salida del tanque. El protocolo en detalle de la ejecución se encuentra en el *Cuadro 5*.

**Cuadro 5.** Protocolo para la determinación de las condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento por la prueba del trazador

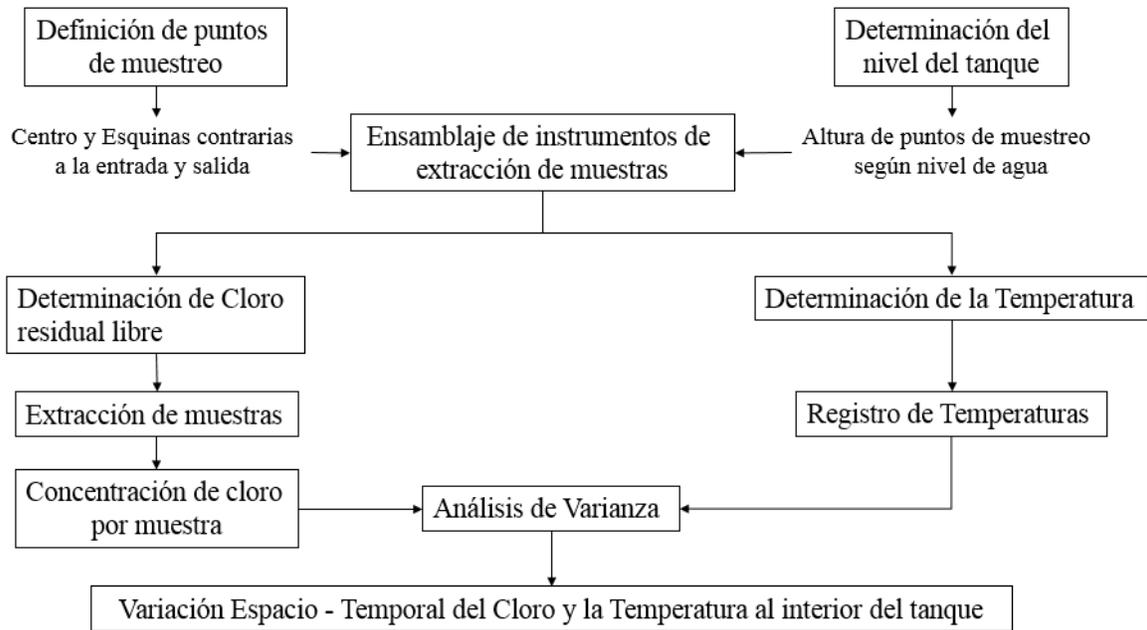
Etapa	Actividad	Descripción
1. Preparación de la prueba	a) Tiempo de aplicación del trazador	El tiempo debe ser inferior a 1/30 del tiempo teórico de retención (Montoya, 2012; J. Pérez, 1992).
	b) Duración de la prueba	Tiempo de aplicación más el tiempo que tarda en salir el trazador completamente del tanque (Montoya, 2012), por seguridad se estimó 12 horas.
	c) Curva de relación concentración de NaCl con conductividad	Se tomaron muestras del agua de 1000 ml en el sitio y se les agrego una masa especifica de cloruro de sodio , se procedió hacer lectura de la conductividad y se graficó, obteniéndose la ecuación $y = 0,6275x - 119,3$ ; donde: Y= Concentración de NaCl; X= Conductividad

Continuación Cuadro 5.

<b>Etapa</b>	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>
1. Preparación de la prueba	d) Reunir los materiales necesarios	Medidor de conductividad AP75 Portable Waterproof Conductivity, recipiente de 50 litros, manguera, 2 Erlenmeyer de 250ml, un agitador de 0,6m.
	e) Instalación de equipo de muestro	Los recipientes se colocaron en la esquina superior del tanque y el equipo de muestreo a un lado de la tubería de salida del tanque.
	f) Preparación de reactivos	El trazador se disolvió en el recipiente para obtener la concentración calculada de 30,0g/l del ion cloruro.
2. Toma de muestras	g) Toma de muestras de agua a la salida del tanque	Se tomó una muestra cada 3 min, se finalizó la toma de muestras hasta que se detectó la conductividad inicial en tres muestras consecutivas.
3. Análisis de las muestras	h) Análisis inmediato de la conductividad	Se utilizó el medidor de conductividad AP75 Portable Waterproof Conductivity y se registran los datos en un formato de campo (Ver <i>Anexo 3</i> ).
4. Procesamiento de la información	i) Aplicación de los métodos hidrodinámicos	Se procesó los datos en hojas de cálculo de Excel y se les aplicó cuatro métodos hidrodinámicos descritos en la sección 2.5.

### 3.7 Variación Espacio - Temporal del Cloro y la Temperatura

Con el fin de conocer la variación espacio - temporal del cloro residual dentro del tanque y la presencia o ausencia de zonas muertas producto de estratificación térmica, se planteó un control por medio de observación del tanque de almacenamiento basado en la investigación de Montoya, (2012 y Muriel, (2008). La *Figura 16* presenta el esquema metodológico utilizado en esta sección. Los puntos de muestreo mencionados en la *Figura 14* fueron los explicados en la sección 3.5 y la determinación del nivel de agua se realizó durante el estudio.



**Figura 16.** Esquema metodológico de la variación espacio - temporal del cloro y la temperatura

### 3.7.1 Protocolo para la determinación de la variación espacio - temporal del cloro y la temperatura

La prueba inició a las 8:00 am y finalizó a las 4:30 pm, durante este tiempo se extrajeron muestras del exterior e interior del tanque para analizar la concentración de cloro residual. Además se determinaron los niveles de agua en el tanque durante toda la ejecución de la prueba. El protocolo en detalle se encuentra en el *Cuadro 6*.

**Cuadro 6.** Protocolo para la determinación de la variación espacio-temporal del cloro y la temperatura del tanque de almacenamiento.

<b>Etapa</b>	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>
1. Preparación de la prueba	a) Duración de la prueba	La duración de la prueba es el tiempo de retención real del tanque.
	b) Reunir los materiales necesarios	Medidor de Flujo Ultrasónico Innova-Sonic 210 series Sierra Instruments, Medidor de temperatura y Medidor de cloro residual Hach descritos en la sección 3.4, manguera de nivel 3/8 de pulgada, kitasatos de 500ml, bomba de succión, varilla de hierro galvanizado de 1pulgada, cinco llaves de paso, Tee, uniones, cables y termopares. Botellas ámbar lavadas con ácido sulfúrico al 20 % y secadas a 100,0°C durante una hora acorde a Araya (2012).

Continuación Cuadro 6.

<b>Etapa</b>	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>
1. Preparación de la prueba	c) Instalación de equipo de muestro	El medidor ultrasónico de caudal se colocó en la tubería de entrada. Se fijaron las estructuras de muestreo en los tres puntos de muestreo interno. Además se colocó la bomba de succión cercana a los puntos de muestreo. La Termocupla se posicionó al centro de los tres accesos a muestreo.
	d) Reactivos	Reactivo DPD para cloro libre
2. Toma de muestras	e) Toma de muestra en la entrada y la salida	Se tomó una muestra cada hora
	f) Toma de muestras de agua dentro del tanque	Para los tres alturas dadas por el nivel del tanque se succionó al mismo tiempo, por medio de la bomba de succión y las trampas de agua, con diferencia de 3 minutos en cada uno de los puntos de acceso
	g) Extracción de muestras	a) Por medio de las mangueras de nivel y una bomba se succionó agua a la superficie para llenar 3 kitasatos hasta 100ml. b) Se cierran las llaves de paso manteniendo agua dentro de las mangueras. c) Se colocan nuevos kitasatos y se recoge 50 ml de agua. d) Se llenan las botellas ámbar de 30ml y sellan. e) Se almacenan las botellas etiquetadas en una hielera para su análisis.
3. Análisis de las muestras	h) Análisis del cloro residual	Una vez realizado el muestreo de los 3 accesos se estabilizó la temperatura de la muestra y se utilizó el medidor de cloro residual.
	i) Análisis de temperatura	Por la facilidad del equipo únicamente se cambiaba la opción de lectura y se registraban los datos.
4. Procesamiento de la información	j) Análisis de varianza	El análisis se hizo para la concentración de cloro libre y temperatura por medio de la prueba de Tukey para encontrar si existían o no diferencias significativas entre los puntos de muestreo.

Posteriormente de analizar los datos de la observación que se analizan en la sección 4.4, se procedió a realizar una segunda parte con tres puntos, uno a la entrada, otro a la salida y el último centro del tanque a la altura de  $H/2$  ( $H$  representa el nivel del tanque, como se explica en la sección 3.5). El procedimiento del *Cuadro 6* fue adaptado para el número de muestras de la segunda observación.

### 3.8 Recopilación y análisis de la información

Inicialmente se realizó una caracterización de las condiciones de fuente de agua, sistema de cloración y el sistema de abastecimiento, como un todo. Se hizo el estudio del tanque de almacenamiento descrito en la sección 3.2; adicionalmente se establecieron reuniones con operarios del sistema, para conocer la conceptualización y funcionamiento del tanque, además de detalles de su operación. Se efectuó un muestreo exploratorio para generar las bases de las características del agua y el tanque, obteniendo variables importantes para el desarrollo de la observación experimental. Las variables a estudiar fueron conductividad, temperatura, caudal de entrada y salida, y cloro residual. Además se extrajo una muestra de agua del tanque para el desarrollo la curva de relación del trazador con la conductividad y se determinó el caudal promedio de entrada. Los resultados del muestreo experimental se detallan en la sección 4.1.

Para el procesamiento de la información se utilizó una hoja de cálculos en Excel; tanto para el ensayo de trazador como la observación del cloro libre y la temperatura. En el caso del ensayo del trazador la hoja de cálculos incluyó cuatro métodos hidrodinámicos que fueron: Curva de tendencia, análisis de Wolf-Resnick, Número de Peclet y Tanques en Serie de manera similar a lo expuesto en la sección 2.6. Para la variación espacio - temporal del cloro libre y la temperatura se evaluó primero la parametricidad de los datos y se realizó un análisis de varianza con la prueba de Tukey.

### 3.9 Recomendaciones operativas y de mantenimiento para la gestión de la calidad de agua en el tanque de almacenamiento

La propuesta de recomendaciones operativas y de seguimiento para la gestión de la calidad en el Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta, se basó en las prácticas de gestión recomendadas por la American Water Works Association (Boulos et al., 1999; Mahmood et al., 2005). El estudio se basó en un protocolo de pasos estratégicos para el aseguramiento de la calidad del agua acorde a Araya (2012) descrito en el *Cuadro 7*.

**Cuadro 7.** Protocolo de las mejores prácticas de gestión para mejorar la calidad del agua almacenada

ID	Actividad	Descripción
1	Identificar las prácticas actuales para la desinfección.	Se observaron las prácticas de la desinfección con cloro para mejorar la situación del tiempo de contacto del cloro con la masa de agua.
2	Entender el tanque y definir los problemas asociados a la calidad del agua almacenada	Se comprendió el comportamiento y origen de la hidrodinámica del tanque de almacenamiento, así como la relación con la variación espacio temporal.
3	Establecer objetivos de calidad de agua almacenada	Se definieron recomendaciones para el mejoramiento de la calidad de agua a implementar en el tanque de almacenamiento que incluye un plan de inspecciones, además de recomendaciones para mejorar la situación hidrodinámica del tanque.
4	Evaluar alternativas y seleccionar la mejor	Dependiendo del problema de calidad de agua, la solución más apropiada requirió cambios en las prácticas de operación y mantenimiento, así como soluciones ingenieriles.

Para el tanque de almacenamiento se seleccionaron los aspectos a evaluarse con relación al efecto de la calidad de agua (Department of Environment and Conservation, 2011). A continuación se describen los aspectos evaluados:

- a. Se determinó la ubicación, la dirección y el diámetro de las tuberías de entrada y salida del tanque.
- b. Se determinaron los valores de caudales de ingreso y salida del tanque de distribución para definir los rangos operativos más convenientes a la condición local.
- c. Se analizó la geometría y el volumen del tanque de almacenamiento.
- d. Se verificó el estado y material de las paredes del tanque.
- e. Se determinó el funcionamiento de las barreras internas del tanque.
- f. Se analizó la variación de los niveles de agua del tanque de distribución.
- g. Se determinó el número, estado y ubicación de respiraderos, escotillas de acceso y tuberías de: entrada, salida, limpieza y rebalse.

## 4. RESULTADOS

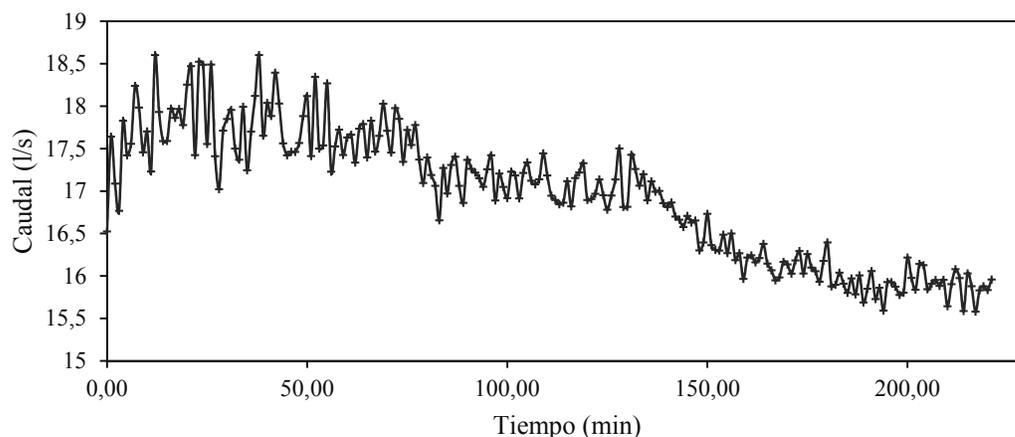
El análisis de resultados se desarrolló teniendo en cuenta los siguientes aspectos fundamentales: i) la evaluación de las condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento, ii) la variación espacio-temporal del cloro y la temperatura al interior del tanque de distribución de AyA Acosta.

### 4.1 Parámetros iniciales

Para el desarrollo de los protocolos de las secciones 3.6 y 3.7 se necesitó de información la cual se detalla a continuación:

#### 4.1.1 Registro de Caudales y velocidad de flujo de entrada

Se procedió acorde a la sección 3.5, para determinar los caudales de entrada y salida del tanque, para los cálculos previos del protocolo de la prueba del trazador. Se encontró que el tanque posee dos salidas, una hacia Guaitil y otra a San Ignacio de Acosta. Además solo se cuenta con macro medidor de caudal a la salida de la tubería direccionada a San Ignacio de Acosta. Ante la situación de la presencia de dos tuberías de salida fue necesario cerrar la salida hacia Guaitil durante la ejecución de la prueba de trazador. El cierre de la tubería a Guaitil fue factible porque el escenario no cambia considerablemente al ser la tubería con menor cantidad de abonados. Por lo anterior, se generó únicamente un control de caudal en la tubería de salida de San Ignacio de Acosta. Los datos revelaron que el caudal de entrada en promedio tiene un valor de 17,0 l/s, y según lo planteado por los administradores la planta trabaja con 18 l/s regularmente. Sin embargo la *Figura 17* muestra cómo durante el día el caudal tiene fluctuaciones desde los 15,5 l/s a los 18,6 l/s. Mientras el caudal promedio de salida a Acosta es de 10,9 l/s; esto propicia que los niveles del tanque se encuentren por encima de la mitad del volumen total del tanque diariamente, las variaciones del caudal de salida. Con los datos se determinó fijar el caudal de entrada para la prueba del trazador en 10 l/s para garantizar que sin importar el volumen inicial del tanque; no existiera rebalse del tanque y pérdida de trazador.

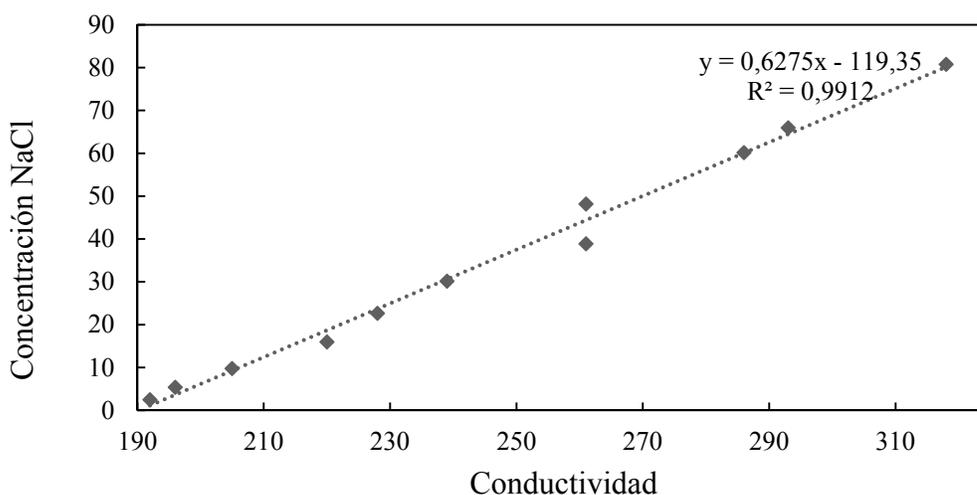


**Figura 17.** Variación del caudal en la entrada para el tanque

#### 4.1.2 Relación de la Conductividad y la Concentración del Trazador

La variación de la conductividad fue aceptable obteniendo un 2 % de varianza en los datos medidos, debido a que un 1 % al nivel de confianza que posee el instrumento de medición y solo un 1 % se atribuyen directamente a la calidad de agua analizada. Lo anterior, para prever el comportamiento de los datos en la prueba de trazador que tendría como respuesta la conductividad. De manera que simplificó el procesamiento de datos y permitió determinar la conductividad inicial y final esperada durante la prueba de trazador.

Con la obtención de la variación de la conductividad se procedió a obtener la ecuación para convertir los datos de conductividad a la concentración del trazador. La cual se obtuvo por medio del procedimiento de la sección 3.7.2 y la *Figura 18* presenta la curva lineal obtenida.



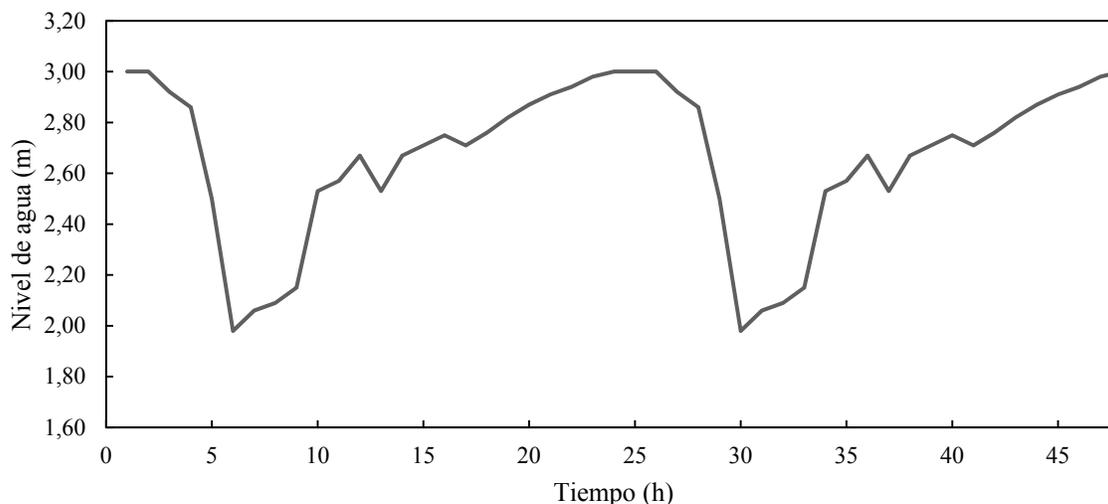
**Figura 18.** Conductividad respecto a la Concentración de Trazador

#### 4.1.3 Niveles de agua para el Tanque

Como parte del protocolo descrito en la sección 3.7, se necesitaba conocer los niveles del tanque promedios para establecer el largo de las mangueras y cables durante el desarrollo de la observación, además de efectuar un control de los niveles el mismo día del procedimiento. Una vez que se colocó en el tanque un piezómetro por parte del AyA de Acosta, se registraron horas aleatorias del nivel del agua donde el promedio estuvo entre los 2,8 metros. En el caso de los niveles registrados durante la prueba del trazador estuvieron entre los 2,30 y 2,60 metros, debido a la regulación de caudal de ingreso y el cierre de la salida a Guaitil. Asimismo durante la observación de temperatura y cloro los niveles del tanque estuvieron entre 2,50 y 2,75 metros.

Por medio de la observación de diferentes días se obtuvo la *Figura 19*, recopilando tanto observaciones realizadas para la investigación como por los operarios, quienes han observado el tanque durante las horas de la noche para identificar los períodos de rebalse del tanque. A partir de la *Figura 19* se encontró relación con Araya (2012) y Montoya, (2012) quienes encontraron que los niveles de los tanques incrementaban la edad del agua al nunca vaciarse completamente y por el contrario mantener volúmenes grandes por amplios períodos de

tiempo. Esta variación de niveles se interpreta como una variación de volúmenes de alrededor de un 30 % que representa el incremento de tres días a la edad de agua del tanque acorde a Duer, (2011), sin embargo, entre las recomendaciones para el diseño de tanques de almacenamiento aún se encuentra que una variación en el volumen mínima de un 20 % es aceptable (Department of Environment and Conservation, 2011).



**Figura 19.** Niveles de agua del Tanque Nuevo, San Ignacio de Acosta

## 4.2 Condiciones hidrodinámicas del tanque de almacenamiento

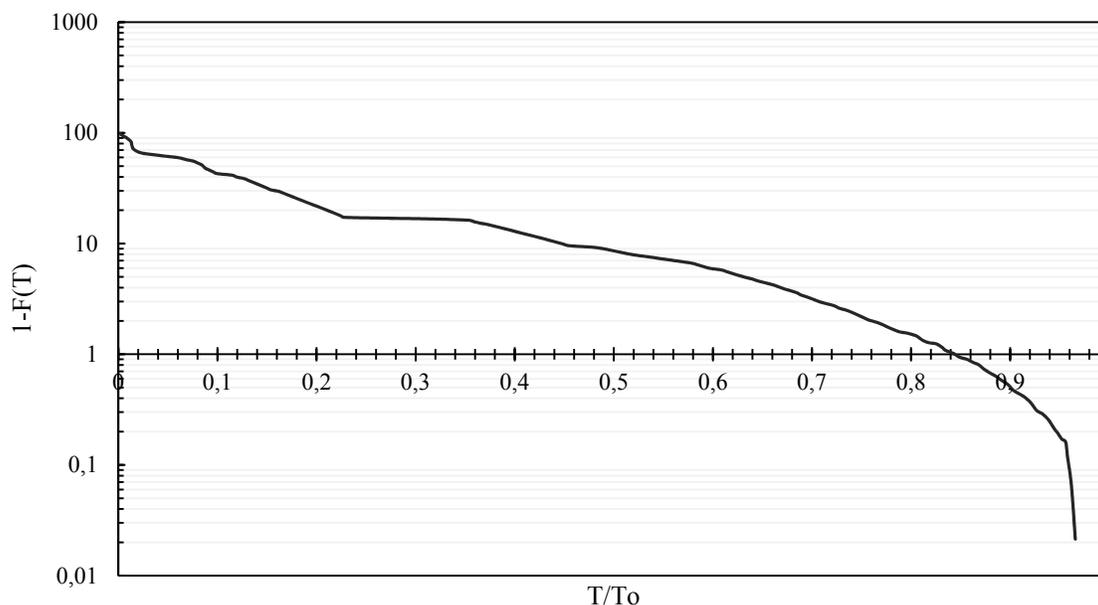
Se desarrolló el protocolo de la sección 3.8 para determinar el tipo de mezcla, el tiempo de retención y las condiciones hidrodinámicas dentro del tanque; los resultados obtenidos por los métodos hidrodinámicos se describen en este apartado.

### 4.2.1 Método de Wolf- Resnik

El método de Wolf-Resnick permitió generar la *Figura 20* y mediante esta obtener los posibles porcentajes que describen el comportamiento del Tanque Nuevo para el flujo a pistón, mezcla completa y zonas muertas dentro del tanque, resumidos en el *Cuadro 8*.

La curva de la *Figura 20* se aleja en poco tiempo; menos de veinticinco minutos, del valor cien del parámetro  $1 - F(t)$ , dando como resultado un valor de  $\Theta$  igual a 0,04 implicando directamente que el porcentaje de flujo pistón sea el menor presente en el tanque. Además el comportamiento inicial se puede atribuir a un corto circuito que varió el comportamiento inicial del trazador dentro del tanque, principalmente porque en poco tiempo el porcentaje acumulado ( $F(t)$ ) del trazador varió significativamente; alejando los datos de la curva ideal esperada en el modelo de Wolf-Resnick, este supuesto se comparó con los resultados obtenidos para los criterios de los otros métodos en las siguientes secciones.

Sobre la sección de mayor concavidad de la curva  $1 - F(t)$  de la *Figura 20* se obtuvo la recta tangente según el método en estudio, con la cual se obtiene el valor de  $\alpha$  y se obtiene la ecuación de la recta tangente igual a  $\log 1 - F(t) = 1,3 \frac{t}{t_0} - 0,4$ ; donde  $\tan(\alpha)$  es 1,3.



**Figura 20.** Curva resultante del modelo de Wolf-Resnick para el tanque

Una vez determinado  $\tan(\alpha)$  y  $\Theta$  se aplicaron las ecuaciones del modelo de Wolf-Resnick y se obtuvieron los porcentajes de cada flujo y las zonas muertas que se resume en el Cuadro 8.

**Cuadro 8.** Resultados de la aplicación del modelo circuito de Wolf-Resnick.

Fracción	Flujo Pistón	Flujo Mezclado	Zona Muerta
Porcentaje	11 %	33 %	56 %

El porcentaje de flujo pistón obtiene un valor de 11 %, un valor similar a Sánchez & Cardona (2009) el cual se atribuyó a  $\Theta$ , encontrándose concordancia entre los valores de  $\Theta$  y el valor del flujo pistón. El valor de 11 % de flujo pistón indica la posibilidad de un volumen de agua dentro del tanque que mantienen un comportamiento sin mezcla con el resto del volumen, recorriendo el tanque en especie de bloques de agua que salen sin mezclarse, sin embargo, este porcentaje es bajo para un tanque que cumple la función de tanque de contacto, ya que el tanque de contacto busca idealmente asemejarse al reactor de flujo pistón.

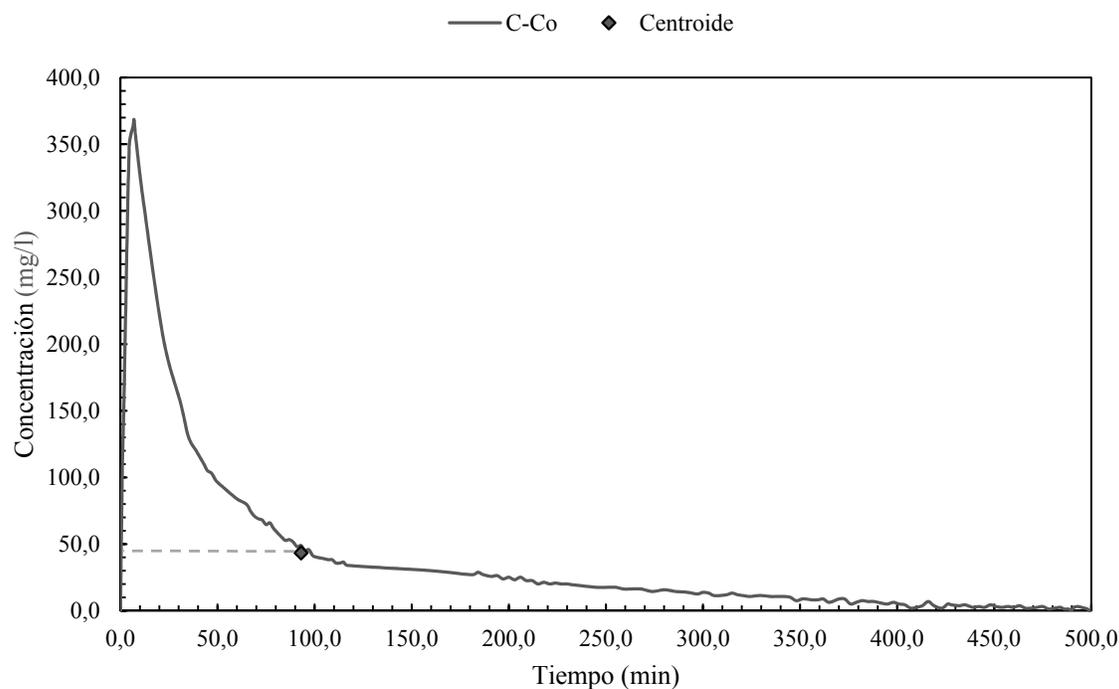
El porcentaje de flujo de mezcla completa obtuvo un valor de 33 %. El porcentaje de mezcla completa para el Tanque Nuevo es ineficiente acorde a Montoya, (2012) y Stamou, (2002), debido a que la función del tanque de almacenamiento debe buscar homogeneidad del agua. Sin embargo se destaca que el flujo de mezcla completa es el flujo predominante en la zona que hay flujo en el Tanque Nuevo y por lo tanto la incorporación de las mejoras adecuadas puede generar el aumento de este porcentaje.

Respecto al porcentaje de zonas muertas se observan variaciones en la curva que no permiten una concavidad uniforme, de acuerdo con J. Pérez, (1992) la presencia de variaciones implica la presencia de corto circuito o posibles zonas muertas, cabe destacar que este porcentaje incluye ambas situaciones (J. Pérez, 1992; Rojas & García, 2009). Al presentarse al inicio de

la curva, la variación antes mencionada sufre desviación e incrementa el porcentaje de zonas muertas, este porcentaje se contrastará con los resultados del otro método para determinar si predominan las zonas muertas del trazador o por el contrario la salida repentina por corto circuito.

#### 4.2.2 Método Curva de Tendencia

La *Figura 21* representa el estudio del trazador por el análisis de la Curva de Tendencia; obtenida por medio de la normalización de las variables para observar claramente su forma y tendencia. Se observan que a los 7 minutos el trazador alcanzó la mayor concentración, comportamiento que representa un corto circuito. Una vez alcanzado el punto máximo de concentración el comportamiento se asemeja a la curva ideal para un reactor de mezcla completa. Este comportamiento se puede atribuir a la constante mezcla, dando como resultado que la concentración disminuye, de tal forma que a mayor tiempo de retención menor concentración del trazador se obtiene en la masa de agua, producto de la dilución del trazador en el volumen total del reactor acorde a Crittenden, *et al.* (2005); Montoya *et al.* (2012). Sin embargo se denota que la curva de trazador posee pequeñas variaciones en forma de picos, tal situación se puede asociar a variaciones causadas por cortos circuitos y zonas muertas.



**Figura 21.** Curva de concentración de trazador respecto al tiempo

Además de la curva se extrajeron los parámetros que permiten utilizar los criterios que describen el tanque en función de su comportamiento hidrodinámico como reactor. La importancia de estos parámetros no solo se basa en la obtención de indicadores, también pueden ser comparados entre sí. El análisis iniciará con los parámetros que se resumen en el *Cuadro 9* y se finalizará con los criterios seleccionados del *Cuadro 10*.

**Cuadro 9.** Parámetros de la Curva de Tendencia del Trazador

Parámetro	Valor	Descripción
$t_0$	512,5	Tiempo teórico de retención (min) = $V/Q$
$t_i$	1,0	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente
$t_{10}$	4,2	Tiempo correspondiente al paso del 10 % del total del trazador
$t_p$	7,0	Tiempo modal, corresponde a la presentación de la máxima concentración
$t_m$	43,8	Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50 % del trazador
$t_{90}$	229,1	Tiempo correspondiente al paso del 90 % del total del trazador
$t_f$	498,0	Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador
$C_0$	0,0	Concentración inicial (mg/L)
$C_p$	368,3	Concentración máxima a la salida (mg/L)
Centroide	93,0	Tiempo Teórico en que pasa la mitad del trazador
$t_{m \text{ series}}$	92,2	Tiempo medio calculado con tanques en serie *
$t_{10 \text{ teórico}}$	53,8	Tiempo teórico al paso del 10 % de la cantidad total del trazador

\* Incluido para comparaciones, aun cuando no fue obtenido por el mismo método

**Cuadro 10.** Interpretación de los criterios para análisis de la Curva de tendencia del trazador.

Criterio	Valor	Interpretación
$t_i/t_0$	0,001	Posibilidad de paso directo
$t_{10}/t_0$	0,008	Predomina el flujo mezclado
$t_m/t_0$	0,08	Existen cortos circuitos
$t_p/t_0$	0,01	Predomina el flujo mezclado
Índice de Morrill	53,6	Presencia de flujo a pistón y mezclado

Los primeros parámetros a comparar son el tiempo de retención teórico ( $t_0$ ) y el real ( $t_f$ ). Se analizó el  $t_0$  con valor de 8,54 horas, contra el obtenido durante la prueba de 8,3 horas, por lo tanto, se obtiene que el tanque conserva a todas las moléculas de agua, entrantes en un instante al tanque, un tiempo inferior al tiempo teórico. De tal manera, una molécula de agua puede permanecer dentro del tanque de San Ignacio de Acosta un periodo de 8,3 horas, para luego continuar el recorrido por la red de distribución. El tiempo real es inferior al tiempo teórico lo cual implica la presencia de un corto circuito acorde a J. Pérez, (1992). Además, el tiempo de retención real esperado era un valor por encima del tiempo teórico, por los niveles de agua acorde a Duer, (2011). Sin embargo, este estudio fue realizado durante las horas de mayor consumo de agua potable; por lo que el tiempo de permanencia del agua dentro del tanque en las horas de la noche puede ser diferente al tiempo obtenido, situación que no fue incluida dado que se conocía la situación de rebalses en las horas nocturnas y por lo tanto no era viable aplicar una prueba de trazador de manera tal que se excluyeron estas horas. Al realizarse a estas horas se permitió visualizar el tiempo de residencia más crítico, el tiempo que determinó el menor tiempo de contacto, es decir donde se tendrá un mayor riesgo sanitario por el menor contacto del cloro con microorganismos.

Dentro del *Cuadro 9* se destaca que existen tres valores para el tiempo medio de permanencia del agua dentro del tanque; los parámetros son  $t_m$ ;  $t_{m \text{ series}}$  y el centroide de la *Figura 21*. Donde existe una diferencia de 1,3 horas entre el primer y el tercer parámetro, obtenidos por

el método de Wolf-Resnick. Lo anterior es contradictorio según Cano (2010) y L. D. Sánchez, Marin, Visscher, & Rietveld (2012), donde exponen que deben ser valores similares, lo anterior se puede deber a errores experimentales o a una alta concentración de trazador en un lapso de tiempo bajo, respecto al tiempo total de la salida del trazador el arrastre del trazador a la salida que puede ser causada por un corto circuito que impidió la mezcla completa. La situación del corto circuito inicialmente se confirma con la comparación del dato obtenido mediante el procedimiento para tanques en serie ( $t_{m \text{ series}}$ ) contra  $t_m$  y el centroide. Los datos teóricos  $t_{m \text{ series}}$  y el centroide coinciden entre sí, teniendo valores de 92,2 y 93,0 min respectivamente, donde el valor  $t_m$  resulta ser menor que la mitad de los valores teóricos lo que se atribuye al posible corto circuito.

Entre los parámetros a comparar se encuentra la concentración estimada de 30mg/l para el volumen del tanque en una mezcla completa e instantánea del trazador y la concentración  $C_p$  de 368,34mg/l que se obtuvo a los 7,00 min. Respecto a la concentración calculada para el tanque no fue hasta las dos horas y cuarenta minutos que concentraciones de 30mg/l se obtuvieron a la salida del tanque como se aprecia en la *Figura 21*. Asimismo,  $C_p$  sobrepasó la concentración máxima esperada resultando superior a 100mg/l según L. D. Sánchez et al. (2012) y se presentó en un tiempo aproximado a cero si se compara con el tiempo de retención real, por lo tanto el elevado valor de  $C_p$  es una señal del corto circuito y justifica el valor de  $t_m$  por debajo del valor teórico.

Finalmente el último parámetro a analizar independientemente es  $t_{10}$ ; un parámetro importante porque la EPA usa este criterio para regular el funcionamiento de los reactores de desinfección de agua potable (Crittenden *et al.*, 2005; Environmental Protection Agency, 1999). Dicho parámetro se compara con el valor  $t_{10 \text{ teórico}}$  de 53,8 min y al ser  $t_{10}$  inferior se indica que hay presencia de un corto circuito (American Water Works Association, 2011). Además para interpretar el valor de  $t_{10}$  se desarrolló el criterio  $t_{10}/t_0$  contenido en el *Cuadro 10* comparándolo con los valores establecidos por la EPA para el “factor baffles”, donde se obtuvo un valor para tanques de almacenamiento sin baffles y con mezcla completa. Dicho parámetro también es utilizado para diseñar sistemas de desinfección que no cumplen la función de clorar (Hung, Wang, & Shammas, 2012).

El criterio  $t_i/t_0$  afirma que para el tanque sí existe la posibilidad de un paso directo del agua, debido a que el valor obtenido, es menor a 0,3 acorde a Crittenden et al. (2005); A. Pérez & Torres (2008) y J. Pérez, (1992). Este criterio unido a lo planteado para la explicación del método de Wolf-Resnick y el parámetro  $t_{10}$  y  $t_m$  la situación del corto circuito se confirma. De igual manera se une el criterio  $t_m/t_0$  donde afirma la existencia de cortos circuitos que modifican el tiempo de retención del tanque; el tiempo de retención del agua se aproxima a cero, por tanto el mismo criterio minimiza la opción de presencia de zonas muertas y atribuye el problema del tanque principalmente a cortos circuitos que varían la calidad del agua distribuida acorde con J. Pérez, (1992).

No obstante, el modelo de mezcla en el tanque posee una dominancia de comportamiento de reactor de flujo de mezcla completa, confirmada con los criterios de  $t_p/t_0$ , índice de Morril y el número de Peclet. El primer criterio afirma una predominancia del flujo completamente mezclado acorde a A. Pérez & Torres (2008); J. Pérez (1992), además para este criterio se rescata  $t_p$  resultante del tiempo al que se da la concentración más alta del trazador, afirmando,

desde un inicio sin importar el corto circuito; el tanque es un reactor de mezcla completa. Se suma a esto el índice de Morril mayor a uno, de forma tal, hay presencia de flujo pistón y completamente mezclado, pero con menor probabilidad del primero, entre más lejano el dato a uno, menor la posibilidad de ser flujo pistón.

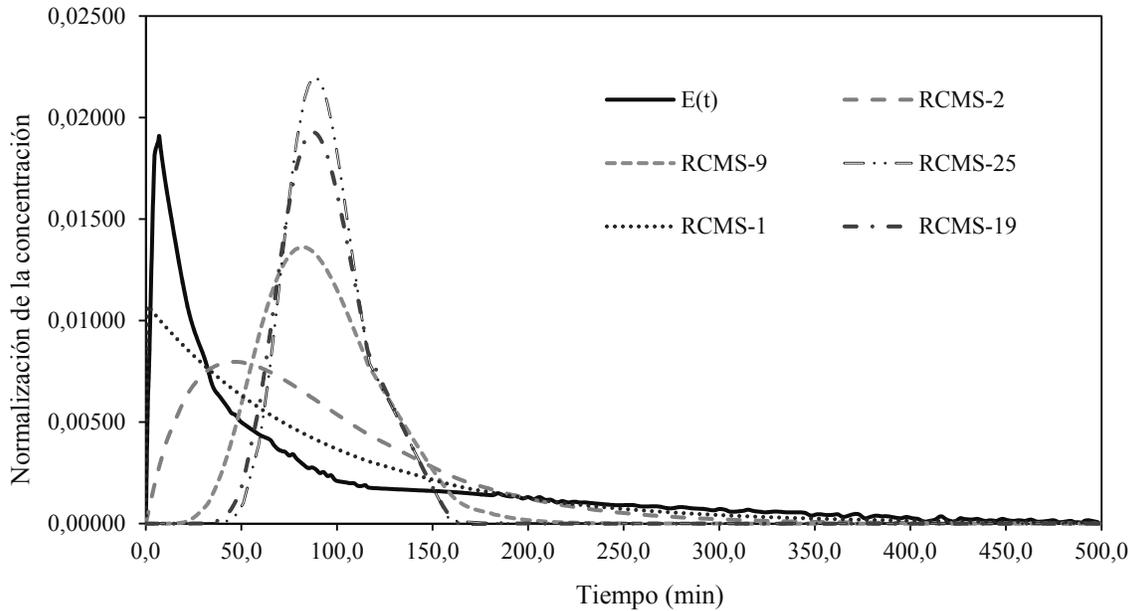
#### **4.2.3 Número de Peclet**

Se determinó el Número de Peclet con un valor de 24,7 que acorde a Crittenden et al. (2005) se interpreta como una tendencia a 0 y no a un valor infinito, por tanto el valor indica que el transporte molecular dentro del tanque es de dispersión axial, lo cual corresponde a un flujo completamente mezclado. De tal forma el Número de Peclet confirma que el reactor de flujo de mezcla completa domina la función hidrodinámica del tanque, sin embargo, el tanque no es un reactor ideal al no obtener un valor de 0. Además, está estrechamente relacionado con el método de Tanques en Serie al utilizar como base de la ecuación la normalización de la edad de agua del tanque  $E(t)$ , por lo que ambos métodos deben coincidir.

Se determinó por medio del número de Peclet el número de dispersión con un valor de 0,04 que acorde a Crittenden et al. (2005) es inadecuado al ser muy elevado en comparación con los números obtenidos por un tanque de contacto de cloro con valores inferiores a 0,01. Por lo tanto, se puede decir que el tanque desarrolla un proceso de desinfección ineficiente porque el flujo pistón presente no se da la forma ideal para desarrollar efectivamente el la cloración.

#### **4.2.4 Método de Tanques en Serie**

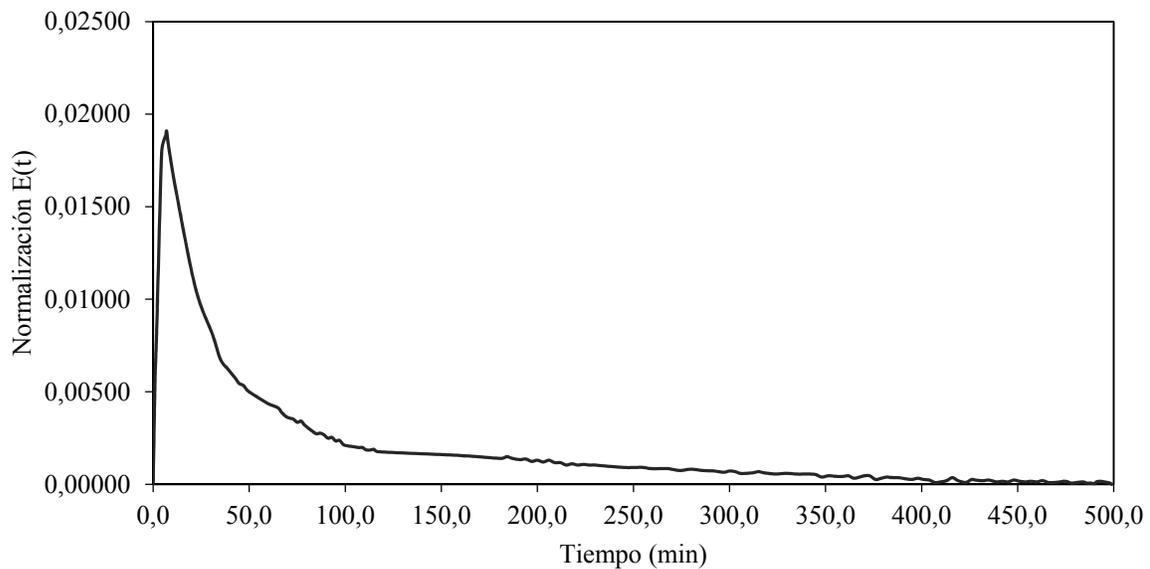
La *Figura 22* representa los datos obtenidos por medio del método de tanques en serie (RCMS) donde se aprecia el comportamiento; el cual está lejano de ser un reactor de flujo pistón y por el contrario, la mayor coincidencia de los datos se da con un reactor de mezcla completa. Este método concuerda con los anteriores métodos en la predominancia de mezcla completa (Crittenden et al., 2012; J. Pérez, 1992) del tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta y principalmente con el Número de Peclet validando los resultados para ambos. Sin embargo se destaca el comportamiento inicial del trazador y el flujo esperado de salida poseen una amplia diferencia ocasionada por el corto circuito; confirmado con anterioridad. Al contrastar además los resultados de este estudio con los de Pérez (2008) quien estableció que el reactor de su investigación poseía similitudes con un número de reactores de dos dibujando la curva  $E(t)$  por encima de la curva RCMS -2 y por lo tanto para el Tanque Nuevo no se puede atribuir un valor específico dado que no sobrepone  $E(t)$  a ninguna curva, sin embargo sí se encuentra una mayor similitud a la RCMS- 1 al colocar la curva al inicio de los tiempos con la diferencia causada por el corto circuito que elevó las concentraciones iniciales y por lo tanto confirma que el porcentaje de flujo pistón debe ser menor al porcentaje de flujo de mezcla completa. Sí además se compara la similitud de este método con el funcionamiento de un tanque de contacto de cloro donde el número obtenido sería lejano a uno como en este caso, se encuentra que el tanque de San Ignacio de Acosta no tiene la capacidad de sustituir en sus funciones a una cámara de contacto porque no hay similitud en su funcionamiento.



**Figura 22.** Curvas resultantes del método de Tanques en Serie para el tanque.

#### 4.2.5 Edad de agua del tanque

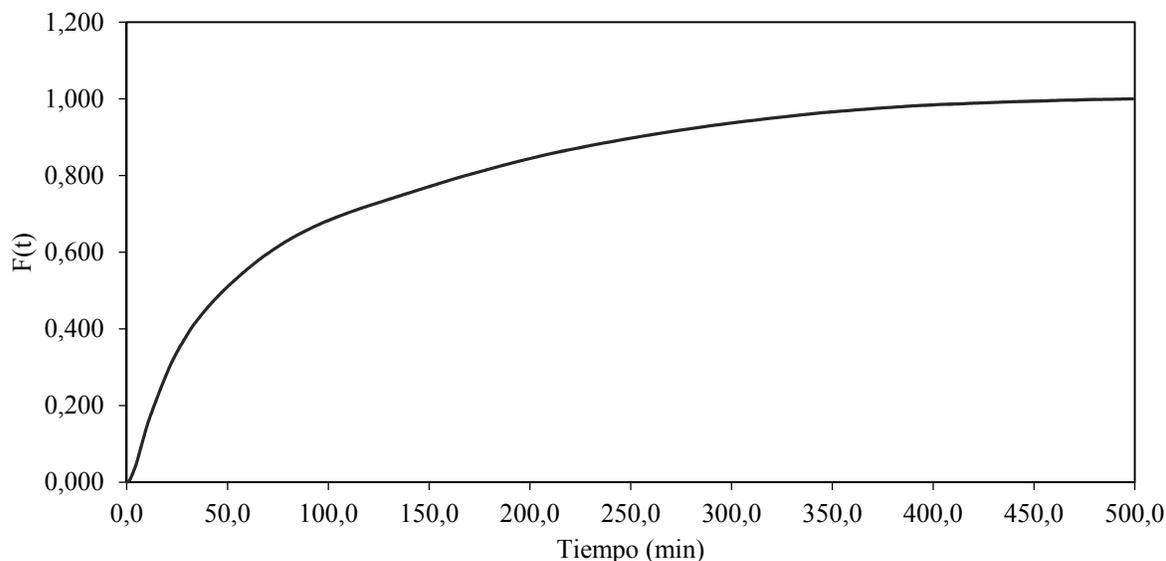
Para los anteriores métodos es necesario obtener la edad del agua del tanque como parte de los cálculos y las comparaciones, no obstante, este parámetro por si solo resulta de importancia, para citar el dato de mayor importancia de la *Figura 23*, se encuentra el pico de la curva con un valor de 0,01908 a siete minutos de la inyección inicial del trazador; implicando que un 1,908 % del volumen de ingreso al tanque sale en siete minutos. La segunda interpretación es 1,908 % del volumen de cualquier muestra extraída del tanque tendrá siete minutos de haber ingresado al mismo; esto a partir del análisis de la curva de edad de agua acorde a American Water Works Association, (2011).



**Figura 23.** Curva de edad de agua para el tanque.

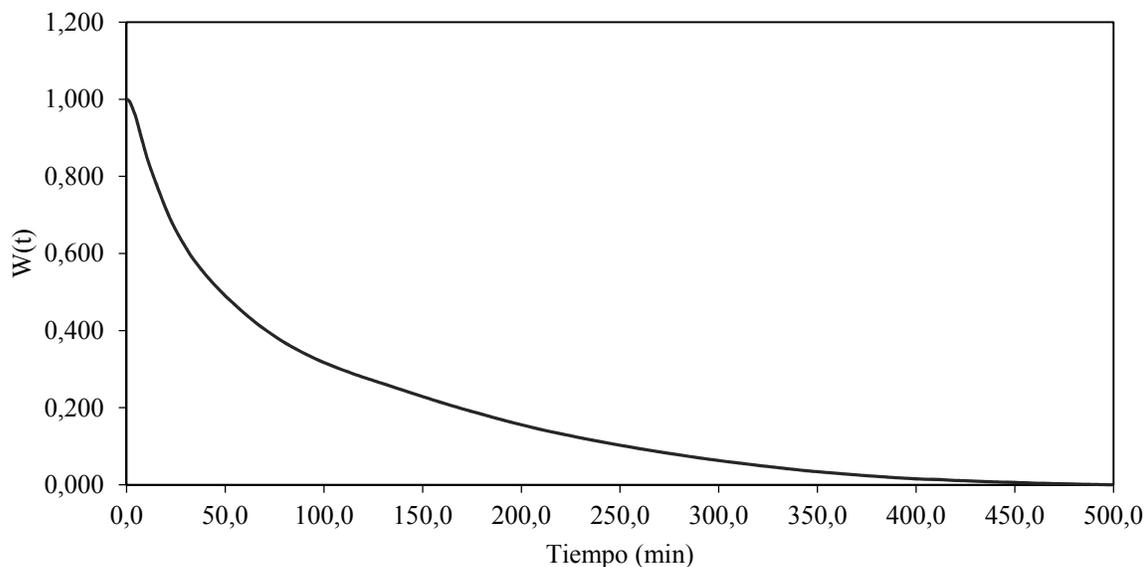
Igualmente, el análisis de la edad de agua del tanque se complementa con la función acumulativa de la edad de agua  $F(t)$  en la cual se interpreta, por ejemplo, para el valor de 0,6 en la *Figura 24*, el 60 % del agua de ingreso al tanque permanece dentro del mismo menos de 71,0 minutos acorde con American Water Works Association (2011) para la interpretación de la curva de  $F(t)$ .

Respecto al gráfico de la *Figura 24* se obtiene el porcentaje de agua que abandona el tanque antes de los 30 min, tiempo mínimo de contacto para eliminar bacterias y virus, el valor dado por el gráfico es el 40 % del agua que ingresa en un instante permanece menos del tiempo mínimo e implica un riesgo sanitario para los usuarios próximos a la salida del tanque. Además para el tiempo de 60,0 min, asociado al tiempo de contacto que requiere el cloro para eliminar protozoarios el 55 % del agua ha salido, demostrando como para el tanque representa un riesgo la ausencia de la cámara de contacto incrementado por la presencia del corto circuito. Aun cuando el Reglamento para la calidad del agua (2005) tiene definido un tiempo de contacto de 20,0 min el porcentaje que no cumple es de 30 % del agua que ingresa, por tanto, aun cuando reglamento es más flexible existe un alto porcentaje que representa un riesgo sanitario.



**Figura 24.** Curva de la Función acumulativa  $F(t)$ .

A partir de la curva  $F(t)$  se puede obtener la curva  $W(t)$ ; representado en la *Figura 25*, de cual se obtiene el porcentaje que no ha salido del reactor para un tiempo  $t$ , para este estudio se encuentra un 6 % de agua para un tiempo de 300 min (5 horas) aún no ha salido del tanque. Aun cuando la calidad del agua del Tanque Nuevo es alta y no tiene una demanda de cloro que represente un decaimiento de la concentración a una alta velocidad, para tiempos de cinco horas y por los resultados del análisis de la variación espacio - temporal del cloro la concentración puede aproximarse a valores de 0,5 mg/l, sin embargo estos valores son importantes porque el agua que sale del Tanque Nuevo en su mayoría ingresa a otro tanque de almacenamiento exponiendo a un riesgo sanitario al consumidor final por posible contaminación en ausencia del cloro por la edad del agua.



**Figura 25.** Curva de la función  $W(t)$  para el tanque Nuevo.

### 4.3 Estudio de la variación espacio - temporal de la Temperatura

Con referencia a la sección 3.7 se obtienen los resultados del control de temperatura para cinco horas. Uno de los análisis realizados, obtenido por medio de análisis de varianza y la prueba de Tukey se presentan en el *Cuadro 11* para la comparación de las posiciones y el *Cuadro 12* para la comparación de las alturas. La temperatura sí varió para las posiciones A y B de forma similar, contrarias a la posición C que se mantuvo constante a lo largo del tiempo.

**Cuadro 11.** Análisis de Tukey para la temperatura respecto a las posiciones

Posición	Medias	n	E.E.	
B	19,60	10,00	0,12	A
A	19,80	10,00	0,12	A
C	20,00	10,00	0,12	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Para el análisis de las alturas se encontró que no hay diferencia significativa entre las alturas donde estaban ubicadas las terminales de los termopares, para cualquiera de las posiciones, como se observa en el *Cuadro 12*. Por lo tanto, dentro del tanque no hay presencia de estratificación térmica ni presencia de zonas muertas por diferencia de densidad, tal situación fue constante en el tiempo.

**Cuadro 12.** Análisis de Tukey para la temperatura respecto a las alturas

Altura	Medias	n	E.E.	
0,50	19,80	15,00	0,10	A
H-0,50	19,80	15,00	0,10	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Lo anterior descarta a la temperatura como una variable importante para estudiar en el tanque de agua potable de San Ignacio de Acosta, contrario a Montoya (2012) donde las diferencias de temperatura crearon estratificación térmica. Finalmente, los datos una vez más confirman una mezcla completa sin presencia de zonas muertas producto de diferencias en densidades del agua, relacionadas a estratificación térmica demostrando una que la variación espacio – temporal de la temperatura no es un factor determinante para la descripción del efecto del almacenamiento en el Tanque Nuevo.

#### 4.4 Estudio de la variación espacio - temporal del Cloro

La segunda parte de la observación experimental es la variación del cloro residual libre dentro del tanque y se basó en la sección 3.7. El cloro residual presentó variaciones en su concentración para los diferentes puntos de muestreo, sin embargo, el estudio estadístico de las concentraciones no encontró diferencias significativas entre las posiciones; como se aprecia en el *Cuadro 13*. Excepto en dos ocasiones para diferentes tiempos, las medias de las concentraciones en la posición A presentaron diferencias significativas respecto al centro y la esquina B. A pesar de la diferencia, la misma se descarta debido a que desde el punto de vista práctico acorde a Montoya, (2012) no presenta relevancia al ser inferior de 0,5mg/l la diferencia en la concentración entre los datos. Sin embargo, al ubicar los resultados en la *Figura 13* se puede dar una posible interpretación de las situaciones que se presentan en el tanque, por ejemplo el punto A puede tener un flujo preferencial o una acumulación, la línea entrada – C- B puede estar reflejando el gasto de cloro en el tanque.

**Cuadro 13.** Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las posiciones

Posición	Medias	n	E.E.	
B	0,30	3,00	0,07	A
C	0,40	3,00	0,07	A
A	0,60	3,00	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

El estudio de las alturas, no proporcionó diferencias significativas durante el tiempo, coincidiendo con los datos obtenidos con el control de temperatura y descartando la presencia de zonas muertas por diferencias de densidad. De tal forma no se afectan las concentraciones de cloro residual según la altura del agua dentro del tanque. Lo anterior se observa en el *Cuadro 14* que contiene la prueba de Tukey para las alturas.

**Cuadro 14.** Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las alturas

Altura	Medias	n	E.E.	
0,50	0,40	3,00	0,07	A
H-0,50	0,40	3,00	0,07	A
H/2,00	0,50	3,00	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Una vez obtenidos los resultados de los puntos internos del tanque, se encontró que no poseían una diferencia significativa, por tanto, se procedió a comparar un punto interno del tanque, específicamente el centro contra la entrada y la salida. Entre la entrada y la salida no se encontró diferencia significativa entre las medias de los valores obtenidos, para un mismo

momento como se observa en el *Cuadro 15*; no obstante si hay diferencia significativa con respecto al centro. El anterior resultado es de relevancia porque la respuesta esperada en la concentración de cloro libre a la salida se espera sea menor a la concentración de cloro residual en la entrada debido a la cinética de reacción del cloro y el tiempo transcurrido (Araya, 2012; L. D. Sánchez et al., 2010). Aun cuando desde el punto de vista práctico los resultados son descartables acorde a Montoya, (2012) el resultado esperado para un tanque con mezcla completa es tanto que el centro como la salida no presenten diferencias significativas acorde a J. Pérez, (1992) y la diferencia fuera con la entrada, por lo tanto, se comprobó en las determinaciones la presencia del corto circuito.

**Cuadro 15.** Prueba de Tukey para la concentración de cloro libre respecto a las posiciones

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Centro	0,60	10,00	0,02	A
Salida	0,80	10,00	0,02	B
Entrada	0,80	10,00	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Con respecto a otras investigaciones de este tema se encontró concordancia con Montoya (2012) para su tanque circular donde no encontró diferencias significativas radialmente o aquellas encontradas tampoco fueron consideradas prácticamente de relevancia.

#### **4.5 Recomendaciones operativas y de mantenimiento del tanque para garantizar la calidad de agua**

Este estudio permitió establecer la relación de la hidrodinámica, la variación espacio – temporal del cloro y la temperatura con el funcionamiento operativo y mantenimiento del tanque, dado que se identificaron aspectos que potencialmente pueden ser problemáticos en el tanque. Además, permitió analizar el problema de la configuración de entrada y salida del tanque permitiendo mejorar la situación del corto circuito presente en el tanque. También, se analizó la variación de los niveles de agua en el tanque que encontró posibles soluciones al problema del porcentaje de zonas muertas.

Respecto a limpieza del tanque, hace un año aproximadamente fue vaciado y lavado completamente, según los operarios se proyectó la próxima limpieza luego de cuatro años. La revisión de las tuberías y los accesos no es una práctica rutinaria de los tanques ni su limpieza y se lleva a cabo esporádicamente principalmente porque otra situación lo exige.

Respecto a la operación del tanque Nuevo no existe un control del volumen que ingresa al tanque, ya que no cuenta con un macromedidor. Además no existe un control establecido de los niveles del tanque y cuál debe ser su variación. El funcionamiento del tanque desde el punto de vista de los operarios, es generar la suficiente presión para abastecer continuamente los tanques que siguen y el sistema de redes de distribución. Por lo tanto, no existe un control establecido de muestreos rutinarios sobre la calidad del agua distribuida desde el punto de salida del tanque. Se evidencia que la operación del tanque tiene claras deficiencias que se detallaran más adelante en esta sección.

Con el fin de evaluar integralmente se generó una lista de observaciones necesarias para determinar los principales problemas en la operación y mantenimiento del tanque que pueden afectar la calidad de agua distribuida por el Tanque Nuevo de Acosta, acorde con (Department of Environment and Conservation, 2011; Mahmood et al., 2005). El resultado obtenido se encuentra en el *Cuadro 16* y a partir de este se alcanzó a determinar los problemas presentes, los cuales son: la configuración de entrada - salida y la variación de niveles de agua.

En el *Cuadro 16* se destaca que la mayoría de las respuestas fue afirmativa lo que implica que el tanque en general posee un buen estado y ubicación, sin embargo, la generalidad de los aspectos evaluados relacionados a la operación fueron negativos. Respecto a la seguridad, el tanque cuenta con medidas de protección como malla, portón con candado, escotillas de acceso a tuberías y al interior del tanque con tapas y candados, no obstante la rutina de inspecciones puede ser mejorada porque se presentaron situaciones en las que no se conocía la ubicación de las llaves de los candados.

**Cuadro 16.** Aspectos evaluados para determinar las recomendaciones operativas y de mantenimiento del tanque.

ID	Aspecto Evaluado	Si/No
	El tanque cuenta con:	
1	Más de un orificio de ventilación.	Si
2	Los orificios de ventilación impiden el ingreso de vectores y lluvia.	Si
3	Inclinación del suelo del tanque hacia la tubería de limpieza.	Si
4	Barreras de seguridad para limitar el ingreso a particulares.	Si
5	Acceso a un punto de muestreo en la tubería de entrada.	Si
6	Una orientación de la tubería de entrada propicia la mezcla al ser direccionado el chorro a la mayor longitud del tanque y sin obstáculos.	No
7	Una sola tubería de entrada	No
8	Macro medición en la tubería de ingreso	No
9	Un sistema de regulación del caudal de ingreso con respecto a demanda horaria	No
10	La tubería de entrada se encuentra separada adecuadamente de la tubería de salida.	No
11	Acceso a un punto de muestreo en la tubería de salida.	Si
12	Una sola tubería de salida	No
13	Una orientación de la tubería de salida impide el arrastre de sedimentos a la red.	No
14	Una sección desmontable de la tubería de salida a 0,1m para la salida de sedimentos u obstrucciones.	No
15	Acceso a puntos de muestreo en el interior del tanque.	Si
	Una tubería de rebalse al exterior del mismo.	Si
16	Una tubería de rebalse con salida visible.	No
17	Un sistema de regulación de niveles de agua en funcionamiento.	No
18	Ausencia de crecimiento de biopelículas en las paredes internas y externas.	Si
19	Ausencia de corrosión en las tuberías.	Si
20	Impermeabilización de las paredes.	Si
21	Control de las presiones necesarias en la red de distribución	No
22	El tanque excluye el proceso de desinfección.	Si
23	El sistema excluye la función de tanque de contacto	No
24	El tanque posee escalera interna y externa.	Si
25	Esta como mínimo a 15m de alcantarillas, desagües, fosas sépticas y agua estancada.	Si

Finalizada la evaluación de la operación y mantenimiento del Tanque Nuevo se generaron recomendaciones con el fin de minimizar el efecto del almacenamiento en la calidad de agua, el resumen de las recomendaciones se encuentra en el *Cuadro 17*. El primer punto es que el sistema de distribución no posee un tanque de contacto de cloro luego de la dosificación y por lo tanto, la función del mismo recae sobre el tanque de almacenamiento, esta función no es apta para el Tanque Nuevo dado que el tanque posee condiciones hidrodinámicas contrarias a las de un tanque de contacto y un corto circuito que propicia la salida del agua en porcentajes altos antes de los 30 min recomendados por American Water Works Association (Mahmood et al., 2005).

Respecto a la ubicación de la tubería de salida se encontró que propicia el ingreso de sedimentos a la red de distribución y que se encuentra próxima a la tubería de ingreso, dado que se encuentra en el mismo costado del tanque, instando a que el movimiento del agua sea de la esquina de entrada a la esquina de salida dejando aislado el movimiento de los otros dos cuadrantes, en los cuales se ubicaron los puntos de muestreo en las posiciones A y B para el estudio de la variación espacio – temporal; facilitando la presencia de un corto circuito. Por lo tanto la ubicación de la tubería debe quedar opuesta a la tubería de salida y procurar que el agua recorra todo el volumen del tanque antes de salir, por lo que la salida debe quedar en el cuadrante diagonal a la entrada y que el agua se divida en los cuadrantes restantes para alcanzar la mezcla completa. Además la tubería de salida está ubicada al fondo del tanque y no posee una sección desmontable que permita limpiar las obstrucciones que ingresen, por lo tanto se recomendó la elevación de la tubería de salida para impedir el ingreso de sedimentos pero que no genere una zona muerta en el fondo del tanque, un valor aceptable es la elevación de 0,1 m acorde a el Department of Environment and Conservation (2011). Además para el control y muestreo de calidad de agua distribuida por el tanque y específicamente para la aplicación de pruebas de trazador es una necesidad que la salida del tanque de almacenamiento sea una sola acorde a Duer, (2011) y a Montoya, (2012).

Así mismo, se encontraron deficiencias en la tubería de entrada del tanque al localizarse en cercanía con la tubería de salida, al no contar con regulación operacional del caudal de ingreso y encontrarse que posee dos tuberías, aunque la segunda estaba en desuso durante el estudio, para tales situaciones se recomendó como posible solución reubicar la entrada a un punto donde se evite la presencia de corto circuito buscando una posición como se explicó para el caso de elegir la reubicación de la tubería de salida acorde con Boulos et al. (1999); Duer, (2011); Mahmood et al. (2005) y Montoya (2012) en situaciones con presencia de corto circuito, pero manteniendo la posición vertical del chorro ya que es favorable para estimular la mezcla completa acorde a Mahmood et al. (2005). Además se plantea incorporar un sistema de control y operación que permita regular el caudal de agua tratada con respecto a los niveles presentes en el tanque según la demanda horaria para permitir que las variaciones de niveles superen el 30 % existente. De igual forma para realizar la anterior recomendación se necesita introducir sensores de nivel que envíen señales hasta la planta de tratamiento de agua potable para que reduzca el caudal tratado. También, es necesario conocer de las presiones que requiere la red para abastecer a la población y hasta qué nivel es factible reducir el volumen almacenado o en el caso de ser necesario un alto nivel de almacenaje estudiar una opción alternativa como el uso programado de una bomba.

Todas las anteriores recomendaciones determinadas con el fin de eliminar como prioridad el corto hidráulico, la zona muerta y aumentar el porcentaje de mezcla completa en conjunto con aumentar la variación de los niveles de almacenamiento, sin afectar el servicio de distribución y primordialmente garantizando la calidad del agua al consumidor, garantizando un proceso de desinfección satisfactorio para eliminar el riesgo sanitario.

**Cuadro 17.** Recomendaciones operativas y de mantenimiento del Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta

<b>Problema</b>	<b>Situación</b>	<b>Recomendación</b>
Función como tanque de contacto de cloro	Ausencia de un tanque de contacto de cloro antes de que el agua ingrese al Tanque Nuevo	Se recomienda incorporar un tanque de contacto que garantice los 30min de reacción entre el cloro y el agua, porque el tanque Nuevo por su funcionamiento y características hidrodinámicas no es apto para tal función.
Configuración de entrada y salida del tanque	Ubicación de la tubería de salida en el fondo y la ausencia de una sección desmontable que permite el ingreso de sedimentos a la red de distribución.	La tubería de salida debe encontrarse al menos 0,1 m por encima del fondo para impedir el ingreso de sedimentos y además se recomienda posea una sección desmontable a los 0,1 m para eliminar los sedimentos y obstrucciones.
	Ubicación de la tubería de entrada y la tubería de salida en el mismo costado del tanque.	Se recomienda mover una de las tuberías de forma tal que se encuentren en cuadrantes opuesta y en dirección diagonal que aproveche las paredes internas para impedir la formación del corto circuito y propicie así la mezcla completa y la disminución de la edad de agua del tanque.
	Presencia de dos tuberías de entrada y dos tuberías de salida.	Se recomienda que para fines prácticos como el ensayo de trazador únicamente se encuentre una tubería de entrada y una de salida que permita el acceso a muestreo para garantizar el control de la calidad del agua y el control del caudal de entrada y de salida.
	Unión de tubería de rebalse con la tubería de limpieza.	La ubicación de la tubería de rebalse puede ser orientada hacia un punto donde fácilmente se observe y se permita el control para cuantificar el volumen que se pierde producto del rebalse.
Variación de los niveles de agua	El caudal de ingreso al tanque no cuenta con regulación horaria.	Se recomienda incorporar una forma de regulación que impida rebaleses y se ajuste a los niveles de demanda de agua, por ejemplo el sistema SCADA.
	Existencia de alrededor de un 30 % de variación en los niveles de agua.	Se recomienda aproximar los periodos y volúmenes de llenado del tanque a la demanda horaria de la población.
	Ausencia de control de niveles del agua almacenada.	Se recomienda hacer uso del piezómetro en las inspecciones rutinarias e incorporar sensores que permitan regular el caudal de entrada.
	Ausencia de un control de presiones relacionado con los niveles del tanque.	Se recomienda conocer la relación que debe tener los niveles del tanque con las presiones para abastecer a toda la población.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Relación de la zona muerta, el corto circuito y los niveles de almacenamiento del Tanque Nuevo.

Para determinar la hidrodinámica del Tanque Nuevo fue necesario utilizar cuatro métodos: Wolf-Resnick, Curva de Tendencia, Número de Peclet y Tanques en Serie, los cuales se relacionan entre sí, en el uso del método de obtención de datos, las variables que requieren ser observadas y que generan resultados comparables. El *Cuadro 18* resume la comparación de los cuatro métodos.

**Cuadro 18.** Resumen de los resultados obtenidos por los métodos hidrodinámicos.

Método	Resultado	Interpretación
Wolf-Resnick	Forma de la curva (Ver <i>Figura 20</i> )	Mezcla Completa, Corto Circuito y Zonas Muertas
	11 % Flujo Pistón	Comportamiento como Reactor de Flujo Pistón
	33 % Flujo Mezclado	Comportamiento como Reactor de Flujo de Mezcla Completa
	56 % Zona Muerta	Porcentaje Zonas Muertas de Mezcla y Cortos Circuitos
Curva de Tendencia	Forma de la curva (Ver <i>Figura 21</i> )	Corto Circuito y Flujo de Mezcla Completa
	$t_{10} = 4,2(\text{min})$	Posibilidad de Corto Circuito
	$t_m = 43,8(\text{min})$	Posibilidad de Corto Circuito
	$t_p = 7,0(\text{min})$	Posibilidad de Corto Circuito
	$t_r = 498,0(\text{min})$	Posibilidad de Corto Circuito
	$t_i/t_0 = 0,001$	Posibilidad de Corto Circuito
	$t_{10}/t_0 = 0,008$	Predominio de Flujo Mezclado
	$t_m/t_0 = 0,08$	Existencia de Corto Circuito
	$t_p/t_0 = 0,01$	Predominio de Flujo Mezclado
	Índice de Morril = 53,6	Presencia de Flujo Pistón y Flujo de Mezcla Completa
Número de Peclet	Número de Peclet = 24,7	Transporte axial que implica dominancia del Flujo Mezclado
	Número de Dispersión = 0,04	El reactor no es indicado para realizar el proceso de desinfección
Tanques en Serie	Forma de la Curva (Ver <i>Figura 22</i> )	Predominio de un solo reactor de mezcla completa
		Presencia de Corto Circuito
		El % de flujo pistón es menor que el % de flujo de mezcla completa.

El método de Wolf-Resnick encontró que un 56 % del tanque se comporta como una zona muerta, porcentaje que se asemeja a el dato de niveles de agua que no sufre una variación en

el transcurso del día con un valor entre el 60-70 %, por lo que puede existir una relación entre ambos porcentajes en la interpretación física, indicando que el porcentaje de zonas muertas de mezcla está altamente relacionado con la poca variación de los niveles de agua y por tanto, reflejan la necesidad de la regulación de los volúmenes de almacenamiento del Tanque Nuevo, debido a que los registrados para este estudio representan un riesgo a la calidad del agua acorde a Duer (2011) y Araya (2012).

Respecto al método de Curva de Tendencia, el cual confirma por varios de sus criterios un corto circuito, y al analizarse en conjunto con la baja variación de niveles, se encontró que el mayor porcentaje de agua que ingresa sale a los 70,0 min, específicamente para el agua que ingresó a las 8:00am, aun cuando el tanque mantenía un nivel de 2,0 m, el 60 % salió antes de los 71,0 min de ingreso. Además, para la 1:00 pm solo se mantenía en el interior un 6 % del agua y este porcentaje tardó 200,0 min más para salir completamente. Lo anterior puede asociarse a que el porcentaje de agua que no es arrastrado inmediatamente por el corto circuito, que posiblemente no supere el porcentaje de mezcla completa determinado por el método de Wolf-Resnick, amplía el tiempo de residencia en el tanque a aquellas moléculas que logran mezclarse, de tal forma, entre mejor es la mezcla del agua mayor será el tiempo que permanezca en el tanque producto de los altos niveles de almacenamiento que impiden que el proceso de mezcla se dé rápidamente. Además, en los primeros 30,0 min el 40 % del agua ya había salido del tanque representando un riesgo sanitario porque no se ha cumplido con el tiempo mínimo de reacción del cloro, por lo que existe la posibilidad de que los usuarios más próximos al tanque reciban agua con contaminación microbiológica.

El método de Tanques en Series confirma la relación de corto circuito con los niveles del tanque para originar una masa de agua prácticamente aislada del agua que ingresa al tanque, dado que la forma y la altura de la curva  $E(t)$  que indican la presencia de un corto hidráulico y que a la vez presenta una tendencia a la mezcla completa sin alcanzar totalmente la forma de un reactor ideal de flujo de mezcla completa. Asimismo este método comprueba que el Tanque Nuevo tiene un comportamiento muy lejano a un reactor de flujo pistón, funcionamiento ideal de las cámaras de contacto de cloro y por lo tanto, no puede sustituir las funciones de la cámara e imposibilita la idea de modificar el Tanque Nuevo para asemejarlo a un reactor de flujo pistón ya que las modificaciones que se requieren involucran modificar ampliamente el tanque. Además el Tanque Nuevo con los niveles de agua operativos no es apto para inducir en reactor de flujo pistón debido a que se incrementaría el tiempo de retención a un punto que nuevamente perjudicaría la calidad del agua.

En los cuatro métodos se encontró que el flujo de mezcla completa es superior al flujo pistón, dato de relevancia para el Tanque Nuevo debido a que es ideal que un tanque de distribución que no incorpora el proceso de cloración de emergencia sea de un reactor de mezcla completa; garantizando una edad de agua mínima y concentraciones de cloro residual homogéneas en todo el volumen almacenado. Sin embargo, ya que no hay un tanque de contacto del cloro la función termina desarrollándose en el tanque de almacenamiento, situación que no es admisible ya que el tanque no tiene un comportamiento dominante de flujo pistón y por lo contrario presenta el menor porcentaje. En todo caso por las funciones del tanque de almacenamiento se debe propiciar incrementar el porcentaje de flujo de mezcla completa y separar las funciones del tanque de contacto.

Además los tres métodos que permiten determinar la presencia de un corto circuito, lo confirman, identificándose claramente como el principal problema hidrodinámico resultante del estudio para el Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta. Por lo tanto, en conjunto los métodos indican que posiblemente la situación del tanque es: existe un corto circuito que hace salir un alto porcentaje del agua que ingresa en un tiempo corto, el cual impide la mezcla efectiva entre el agua que ingresa y la ya almacenada, el volumen de agua almacenada se comporta como una zona muerta que se recircula en sí misma y tiene un comportamiento de mezcla completa. Tal descripción se sustenta en que el método de Wolf-Resnick determinó un porcentaje mayor de zona muerta, seguido por el porcentaje de mezcla completa y por último un porcentaje de flujo pistón. Los anteriores porcentajes obtuvieron significado físico por medio del método de Curva de Tendencia mediante los parámetros  $t_i$ ;  $t_{10}$ ;  $t_p$ ;  $t_m$  y  $t_f$  y los criterios  $t_i/t_o$ ;  $t_{10}/t_o$ ;  $t_m/t_o$  y  $t_p/t_o$  confirmando el corto circuito, zona muerta y predominancia de la mezcla completa. Conjuntamente el Índice de Morril confirmó que también se presenta el flujo pistón. Además, para confirmar que la mezcla completa predomina en el tanque se incluyó el método de Tanques en Serie el cual fue validado por el método del Número de Peclet, por lo tanto al haberse encontrado coincidencia entre los cuatro métodos se puede afirmar que la hidrodinámica del Tanque de San Ignacio de Acosta fue descrita íntegramente.

## **5.2 Relación del Tiempo de retención real con el tiempo de retención teórico.**

El tiempo de retención teórico del Tanque Nuevo no es un valor que necesariamente garantice que el agua distribuida no superará las 72 horas de edad de agua recomendadas por American Water Works Association, principalmente porque el agua que sale del Tanque Nuevo es direccionada a otros dos tanques. Por tanto, lo esperado es que se minimice al máximo el tiempo de retención en el Tanque Nuevo, desde ese punto de vista resulta satisfactorio que el Tanque Nuevo posea un tiempo de retención real menor al teórico por 15 min, sin embargo, al estudiar el motivo de esta diferencia de tiempo y relacionarla con el estudio hidrodinámico del tanque se puede afirmar que el tiempo de retención del tanque es variable según la hora de ingreso, la presencia de una buena mezcla y si hay o no ausencia de corto circuito y zonas muertas. En el caso del Tanque Nuevo el tiempo real es inferior probablemente a causa de que el corto circuito no permitió la mezcla adecuada del trazador en el volumen del tanque impulsando al trazador a abandonar el tanque en concentraciones elevadas, limitando aún más la posibilidad de mezcla, de tal forma el tiempo real fue recortado por el corto circuito, por lo tanto, para este caso el hecho de un tiempo de retención teórico inferior es indicador de un problema hidrodinámico y no de una gestión adecuada del tanque.

La presencia del corto circuito como modificador del tiempo de retención real se confirma en los parámetros  $t_{10}$  y  $t_m$  que resultaron ser menores que los valores teóricos e indicaron la presencia de un corto circuito, demostrando que en cortos tiempos 4,2 min ya había salido el 10 % del trazador y para 43,8 min había salido el 50 % del trazador, situación desproporcional para el comportamiento exponencial de la mezcla completa. La situación evidenciada retoma la problemática de que el Tanque Nuevo es el tanque que culmina con el tiempo de contacto del cloro, situación que no puede desarrollarse porque los tiempos de retención del tanque son fluctuantes debido a los problemas hidrodinámicos del corto circuito y la zona muerta de mezcla.

### **5.3 Relación de los resultados del estudio hidrodinámico con el estudio de la variación espacio – temporal del cloro y la temperatura.**

Se encontró la ausencia de estratificación térmica longitudinal ni vertical, con ausencia de variación en el tiempo, lo cual puede interpretarse como causa de una zona muerta que se mantiene aislada producto del corto circuito. Por lo tanto la zona muerta engloba los puntos de observación, indicando que el comportamiento del volumen acumulado es la formación de una sola masa sin divisiones por diferencias de densidad. La razón para la ausencia de diferencias de densidad posiblemente se encuentre en la estructura del tanque, la cual tiene 1,5 m enterrados en el suelo, impidiendo el calentamiento del agua almacenada durante el día.

Igualmente, la concentración de cloro residual en el interior del tanque no presentó diferencias significativas lo cual es explicada por las mismas razones que se detallaron para explicar la ausencia de estratificación térmica. En el caso específico de la concentración de cloro, resulta ser un problema para la calidad de agua la existencia de una masa de agua que se recircule durante un largo periodo sin salir porque una vez que lo haga presentará concentraciones de cloro bajas, tal situación no fue observada por el estudio pero no por eso se puede negar esta posibilidad; asimismo, las fluctuaciones de la concentración de cloro en la red pueden permitir contaminaciones puntuales al presentarse concentraciones por debajo de lo permitido en el Reglamento de Calidad de Agua.

Además, se encontró una relación entre el corto circuito determinado hidrodinámicamente con la concentración de cloro residual a la salida, donde la concentración no corresponde a la observada en el interior del tanque, situación esperada para un tanque con mezcla completa acorde a Pérez (1992) que se explicó en la sección 2.3. Por el contrario la similitud de la concentración a la salida se da con la concentración determinada a la entrada reflejando como el corto circuito modifica la calidad de agua distribuida, principalmente al encontrarse tiempos de contacto inferiores a 30,0 min para un porcentaje del agua que ingresa en un 40 %, si bien la calidad del agua que ingresa al tanque no presenta una alta demanda de cloro porque los parámetros antes de cloración de Coliformes fecales es de 0,0 a 1,0 en 100,0 ml dándose un efectivo tratamiento y la cloración se aplica primordialmente para tener un efecto residual en la red, sin embargo, queda latente un riesgo sanitario para los usuarios más próximos al tanque.

Un dato igualmente analizable es el de los volúmenes almacenados por el tanque constantemente, los cuales no facilitan la obtención de un tiempo de mezcla menor que el tiempo de retención, aumentado con el problema del corto circuito, es de esperar que las concentraciones de cloro al interno y a la salida posean valores diferentes entre sí. Por lo tanto, la eliminación del corto circuito no garantiza que las concentraciones de cloro resulten estadísticamente iguales sino se incorpora un control de los niveles del agua que se almacenan y se regula el caudal de ingreso al tanque.

De manera que el ensayo de trazador en conjunto con la determinación de la variación espacio - temporal son una herramienta que permiten analizar los tiempos de retención, la edad de

agua del tanque; identificó el problema de corto circuito, la zona muerta de mezcla, la variación del cloro y descartó la presencia de estratificación térmica; constituyendo así, una herramienta en términos del cumplimiento de calidad del agua para el análisis de tanques de almacenamiento a un bajo costo económico, sin requerimientos computacionales complejos y que genera recomendaciones específicas para el caso de estudio.

#### **5.4 Recomendaciones para mejorar la calidad del agua almacenada**

Ante la posibilidad de una masa de agua que permanece un tiempo de retención superior al tiempo de retención determinado a causa de la unión de un corto circuito y un porcentaje bajo de variación en los niveles del tanque que ocasionan envejecimiento de agua y diferencias significativas entre las concentraciones de cloro residual entre el interior del tanque y la tubería de salida, la situación de un posible riesgo sanitario producto del ineficiente tiempo de contacto del cloro con el agua, es necesario incorporar un tanque de contacto de cloro luego de la dosificación, que la tubería de salida se encuentre al menos 0,1 m por encima del fondo para impedir el ingreso de sedimentos y además se posea una sección desmontable a los 0,1 m para eliminar los sedimentos y obstrucciones; reubicar una de las tuberías de forma tal que se encuentren en cuadrantes opuestas diagonalmente que aproveche las paredes internas para impedir la formación del corto circuito y propicie así la mezcla completa y la disminución de la edad de agua del tanque. Además se recomendó que para fines prácticos como el ensayo de trazador únicamente se encuentre una tubería de entrada y una de salida que permita el acceso a muestreo para garantizar el control de la calidad del agua y que la ubicación de la tubería de rebalse sea orientada hacia un punto donde fácilmente se observe y sea posible el control para cuantificar el volumen que se pierde producto del rebalse. Y finalmente se recomendó incorporar una forma de regulación en el caudal de ingreso que impida rebalses y se ajuste a los niveles de demanda de agua, aproximando los periodos y volúmenes de llenado del tanque a la demanda horaria de la población y conocer la relación que debe tener los niveles del tanque con las presiones para abastecer a toda la población.

La generalidad de las recomendaciones busca permitir la mezcla completa del agua en el tanque para ser distribuida con tiempos mínimos de edad de agua, en especial durante la ausencia del tanque de contacto de manera tal que 100 % del agua que ingresa en un tiempo  $t$  permanezca hasta  $t$  igual a 30,0 min, minimizando de tal forma el riesgo sanitario para el periodo crítico de consumo, de igual forma, disminuir la posibilidad de tiempos de retención elevados que disminuyan la concentración del cloro por efecto del decaimiento de la concentración. Sin embargo, la recomendación será integrar la nueva estructura porque el tanque de almacenamiento no es capaz de sustituir las funciones del tanque de contacto, principalmente porque el tanque de contacto da tiempos de retención de 30,0 a 60,0 min mientras que el tanque de almacenamiento actualmente alcanza tiempos de 489,0 min. De tal forma que para distribuir agua de calidad se requiere integrar equipo, capacidad de operación y mantenimiento, control de variables como cloro residual para que en conjunto sea posible eliminar los problemas que posee el Tanque Nuevo y responden a la situación específica del Tanque Nuevo de San Ignacio de Acosta. Una posible solución integral para solucionar el principal problema del corto circuito es la reubicación de la tubería de salida al cuadrante donde se tomaron las muestras de la esquina B en la variación espacio - temporal del cloro y la temperatura lo cual puede contribuir a que el agua fluya por el cuadrante donde

actualmente se encuentra la salida y el cuadrante de la esquina A; tal modificación permite la elevación de la tubería, la inclusión de la sección fácilmente desmontable para eliminar obstrucciones, además sería una sola salida que se uniría a las actuales tuberías de Guaitil y San Ignacio de Acosta.

El resultado esperado de la aplicación de las recomendaciones es que la calidad de agua distribuida luego del almacenamiento mejore, sin embargo, el estudio no incluye la aplicación y evaluación. Por lo tanto, una vez eliminado el problema del corto circuito e incorporado un control que regule el caudal de ingreso es necesario evaluar nuevamente las condiciones hidrodinámicas y la variación espacio temporal del cloro para determinar la efectividad de las soluciones planteadas y además continuar en el proceso de mejora continua del servicio.

## 6. CONCLUSIONES

- Se confirmó la validez del método de Wolf-Resnick para determinar los porcentajes de mezcla y del método de la Curva de Tendencia para explicar físicamente cada porcentaje de acuerdo al Método de Tanques en Serie, el cual a su vez, fue consistente con el método del Número de Peclet generando un análisis contundente de la hidrodinámica del Tanque Nuevo.
- Se encontró un 33 % de flujo mezclado, 11 % de flujo pistón y un 56 % de zona muerta que se explica en gran medida por la presencia de un corto circuito y pocas variaciones en el nivel mínimo del tanque.
- El comportamiento de reactor de flujo de mezcla completa fue confirmado por los métodos hidrodinámicos de Curva de Tendencia con los criterios  $t_p/t_0$  igual a 0,01, además del Número de Peclet con el valor de 24,7 y Tanques en Serie con su aproximación a un único reactor.
- Se confirmó la presencia de un corto circuito mediante los métodos Wolf-Resnick con el porcentaje predominante de 56 % de zonas muertas de mezcla, Curva de Tendencia, con los parámetros  $t_{10}$ ,  $t_m$  y  $t_p$  con valores de 4,2; 43,8 y 7,0 respectivamente y con el criterio  $t_i/t_0$  con valor de 0,001 y Tanques en Serie por la forma de la curva.
- Se encontró que la variación de los niveles de agua no supera el 30 % y el nivel del tanque permanece regularmente por encima de los 2,0 m, que en conjunto con el corto circuito genera una zona muerta de mezcla en la que disminuye la concentración de cloro residual debido al tiempo de retención.
- Se determinó que el tiempo de retención real es 498,0 min inferior al tiempo de retención teórico por 15,0 min y que no es satisfactorio debido a que la causa es el corto circuito que generó una limitación en el proceso de mezcla y producto de esta el trazador salió en concentraciones elevadas a un inicio alcanzando el punto máximo de la Curva de Tendencia un valor de 368 mg/l NaCl a los 7,0 min de la inyección.
- En el caso de los tanques de almacenamiento se demostró la variedad de problemas que requieren análisis como estratificación térmica, zonas muertas de mezcla y corto circuito, los cuales pueden ser analizados y atenuados para el reactor en estudio por medio de una prueba de trazador, la cual resultó ser una herramienta para determinar la calidad del agua con un procedimiento adecuado a las necesidades y sin altos requerimientos computacionales.
- El tanque no presenta estratificación térmica ni diferencias de densidad; dado que se encontró que para la Prueba de Tukey las medias de la temperatura longitudinalmente fueron 19,6; 19,8 y 20,0 °C para las posiciones B, A y C respectivamente y para las medias verticalmente fueron 19,8 °C para las dos alturas; evidenciándose mediante la

ausencia de diferencia significativa para la variable temperatura en los puntos de muestreo.

- La concentración de cloro dentro del tanque no posee diferencias significativas en los puntos de muestreo internos, para la prueba de Tukey longitudinalmente las medias de la concentración fueron 0,3; 0,4 y 0,6 para las posiciones B, C y A respectivamente y para las medias verticalmente fueron 0,4; 0,4 y 0,5 para las alturas 0,5; H- 5 y H/2, producto del flujo de mezcla completa.
- No se encontró diferencia significativa entre la concentración de cloro libre del agua de ingreso y salida donde el valor de las medias fue para ambos puntos. Sin embargo, hubo diferencias significativas respecto al contenido al tener un media de 0,6; lo cual se asoció a la presencia del corto circuito dentro del tanque de distribución.
- La configuración de entrada y salida del Tanque Nuevo propicia el corto circuito y por lo tanto se recomendó reubicar una de las tuberías de forma tal que las tuberías queden en cuadrantes opuestos diagonalmente y se propicie la circulación del agua por todos los cuadrantes resultantes de las paredes internas propiciando la mezcla completa. En conjunto con la nueva configuración de entrada y salida se indicó realizar una regulación horaria del caudal de entrada para alcanzar un mayor porcentaje de variación en los niveles de agua almacenada.
- Es evidente que los tanques de almacenamiento tienen limitaciones como estructura de mezcla para desinfección, dado que estos son realmente estructuras concebida para la amortiguación de caudales, por tanto, es de relevancia incorporar cámaras de contacto de cloro en los acueductos.
- Hay momentos del día en los que se entrega a la comunidad agua con un nivel de riesgo sanitario que se evidencia por la presencia de un corto circuito que no genera el tiempo de contacto mínimo, siendo que el 40 % de agua que ingresa en un tiempo cero sale del tanque antes de los 30,0 min implicando un posible riesgo sanitario principalmente para los usuarios más cercanos al tanque de almacenamiento y por el efecto de zonas de estancamiento que aumenta las edades de agua que en función con la cinética de decaimiento del cloro podría quedar sin ninguna protección u efecto residual.
- Este estudio evidencia el riesgo y la problemática de utilizar los tanques de almacenamiento para desarrollar el proceso de desinfección, además la necesidad de realizar este tipo de estudio en otros tanques del país, y principalmente demuestra que se pueden desarrollar con una metodología adaptada al contexto local.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es necesario continuar con investigaciones de este tipo en tanques de Costa Rica para asegurar la calidad del agua que consume la población, evitando altas edades de agua y descartar si existen problemas de mezcla, corto circuito, estratificación térmica y zonas muertas de mezcla, entre otras.
- Se debe generar investigación que genere nuevos protocolos para el cálculo en función de la variación horaria y de la calidad de agua con directrices claras más la configuración de los elementos hidráulicos y de control para garantizar un comportamiento hidrodinámico ideal y control de la calidad.
- Los tanques de almacenamiento no deben utilizarse como espacios de cloración de emergencia porque en este estudio se ha demostrado el número de interferencias que pueden variar la concentración del cloro y los tiempos de retención y por tanto se debe buscar la creación de cámaras de cloración que garanticen al menos el tiempo mínimo de 30 min de contacto.
- Se necesita desarrollar estudios de cinética y demanda de cloro dentro de los tanques de cloro para complementar esta línea de investigación.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Water Works Association. (2011). *Water Quality & Treatment A Handbook on Drinking Water*. (J. K. Edzwald, Ed.) (Sixth Edit.). Denver, Colorado: Mc Graw Hill.
- Angeloudis, A., Stoesser, T., Kim, D., & Falconer, R. A. (2013). CFD Study of Flow and Transport Characteristics in Baffled Disinfection Tanks. In *Proceedings of 2013 IAHR Congress*. Beijing: Tsinghua University Press.
- Araya, J. (2012). *Modelación del cloro residual en la red de distribución del acueducto la Sirena, Cali*. Universidad del Valle.
- Boulos, P. F., Grayman, W. M., Bowcock, R. W., Clapp, J. W., Rossman, L. A., Clark, R. M., ... Dhingra, A. K. (1999). Hydraulic mixing and free chlorine residual in reservoirs. *AWWA*, 88(7), 48–59.
- Cano, L. (2010). *Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en las hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Clark, R. M. (2011). *Modeling Water Quality in Distribution Systems*. (American Water Words Association, Ed.) (2nd ed.). Denver, Colorado.
- Comisión Nacional del Agua. (2002). *Implementación y calibración de un modelo de calidad del agua en sistemas*. Culiacan, México.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ed.). Coyoacán, México, D.F.
- Cordero, M. (2014). *Evaluación de nuevas fuentes de agua y mejora del acueducto de San Isidro de el Guarco, Cartago*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2005). *Water Treatment - Principles and Design* (2nd Edition).
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH 's Water Treatment Principles and Design* (Third Edit.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Deborde, M., & von Gunten, U. (2008). Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and mechanisms: a critical review. *Water Research*, 42(1-2), 13–51. doi:10.1016/j.watres.2007.07.025

- Department of Environment and Conservation. (2011). *Evaluation of Potable Water Storage Tanks in Newfoundland and Labrador and their Effect on Drinking Water Quality*. Canada.
- Días, A., & Rodríguez, S. (2008). Planeación y diseño participativo del sistema de tratamiento de agua potable para la Habana, la Magdalena, el Vinculo y la María. Colombia.
- Duer, M. (2011). Passive Mixing Systems Improve Storage Tank Water Quality. *AWWA*, (August).
- Ecuru, J., Okot-okumu, J., & Okurut, T. O. M. O. (2011). Monitoring Residual Chlorine Decay and Coliform Contamination in Water Distribution Network of Kampala , Uganda.
- Environmental Protection Agency. (1999). Disinfection Profiling and Benchmarking Guidance Manual. *EPA*.
- Environmental Protection Agency. (2005). Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management. *EPA*.
- Environmental Protection Agency. (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection*. Wexford, Ireland.
- Hung, Y.-T., Wang, L., & Shammas, N. (Eds.). (2012). *Hanbook of Environment and Waste Management Air and Water Pollution Control*. World Scientific Publishing Company.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado. (2001). *Normas para el Diseño de Proyectos de Abastecimiento de Agua Potable en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Kennedy, M. S., Moegling, S., Sarikelle, S., & Suravallop, K. (1993). Assessing the Effects of Storage Tank Design on Water Quality. *AWWA*, (Tanques de Agua Potable).
- Kothandaraman, V., & Ralph, L. E. (1974). *Design and Performance of Chlorine Contact Tanks*. Illinois, United States of America.
- Lain, S., Cruz, C., Valencia, Y., Torres, P., & Montoya, C. (2011). Determinación del tiempo de mezcla de un tanque de almacenamiento para agua potable mediante dinámica de fluido computaciona – CFD. *Revista Ingenierias Universidad de Medellín*, 10(19), 55–65.
- Mahmood, F., Pimblett, J., Grace, N., & Grayman, W. (2005). Evaluation of water mixing characteristics in distribution system storage tanks. *AWWA*, (March).

- Montoya, C. (2012). *Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable: evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín*. Universidad del Valle.
- Montoya, C., Cruz, C. H., Torres, P., Laín, S., & Escobar, J. C. (2012). 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. *Ingeniería y Ciencia*, 8, 9–30.
- Mora, D., & Feoli, H. (2007). *Programa Nacional de Mejoramiento y Sostenibilidad de la Calidad de los Servicios de Agua Potable en Costa Rica 2007-2015*. Tres Ríos, Costa Rica.
- Mora, D., Mata, A., & Portuguez, C. (2011). *Calidad Microbiológica de las fuentes de agua superficiales para el abastecimiento de agua potable en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Mora, D., Mata, A., & Portuguez, C. (2012). *Agua para consumo y saneamiento: Situación de Costa Rica en el contexto de las Américas: 1960-2011*. San José, Costa Rica.
- Muriel, D. F. (2008). *Empleo de modelos matemáticos basados en parámetros geométricos e hidráulicos para evaluar la posibilidad del deterioro de la calidad del agua potable en tanques de almacenamiento o compensación de la ciudad de Cali*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, N° 45, 27–40.
- Pérez, J. (1992). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. In V. Maldonado (Ed.), *Manual de evaluación. Tomo II*. Lima, Colombia: CEPIS/OPS.
- Presidencia de la Republica, & Ministerio de Salud. Reglamento para calidad del agua potable. , Pub. L. No. N° 32327-S (2005). Costa Rica.
- Rojas, A., & García, A. (2009). Modelación de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación industrial. *Tecnología Química, Edición Es*, 213–218.
- Rossman, L. A. (2002, October). Manual del Usuario EPANET 2.0. *USEPA Water Supply and Water Resources Division*.
- Sánchez, J. (2010). *Modelación de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

- Sánchez, J., & Cardona, S. (2009). Evaluación del comportamiento de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. *Avances en Recursos Hidráulicos*, N°20, 65–80.
- Sánchez, L. D., Marin, L. M., Visscher, J. T., & Rietveld, L. C. (2012). Low-cost multi-stage filtration enhanced by coagulation-flocculation in upflow gravel filtration. *Drinking Water Engineering and Science*, 5(1), 73–85. doi:10.5194/dwes-5-73-2012
- Sánchez, L. D., Rodríguez, S., Escobar, J. C., & Torres, P. (2010). Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en un sector piloto del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali. *Ingeniería y Competitividad*, 12(1), 127–138.
- Stamou, A. I. (2002). Verification and application of a mathematical model for the assessment of the effect of guiding walls on the hydraulic efficiency of chlorination tanks. *Journal of Hydroinformatics*, 245–254.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *Effects of Water Age on Distribution System Water Quality. Standards and Risk Management Division*. Washington DC.
- Yu, X. (2009). *Modelling Retention Time in a Clearwell*. University of Saskatchewan.

## Anexo 1. Análisis de Varianza de Temperatura y Cloro libre

Análisis de Varianza para los puntos de muestreo internos del tanque

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Concentración	9	0,76	0,53	24,87

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,18	4	0,04	3,23	0,1413
Posición	0,13	2	0,06	4,68	0,0897
Altura	0,05	2	0,02	1,78	0,2801
Error	0,06	4	0,01		
Total	0,23	8			

Prueba de Tukey para las posiciones

Posición	Medias	n	E.E.	
B	0,33	3	0,07	A
C	0,47	3	0,07	A
A	0,62	3	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Prueba de Tukey para las alturas

Altura	Medias	n	E.E.	
h1	0,42	3	0,07	A
h3	0,42	3	0,07	A
h2	0,58	3	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Concentración	9	0	0,08	0,9	0,3565

Los residuos se distribuyen normalmente

Homoelasticidad

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
RABS_Concentración	9	0,22	0	70,51

No hay diferencias entre residuos

Análisis de Varianza para la entrada, salida y centro del tanque

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Concentración	30	0,77	0,63	10,31

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,36	11	0,03	5,42	0,0008
Bloque	0,24	9	0,03	4,41	0,0036
Tratamiento	0,12	2	0,06	9,93	0,0012
Error	0,11	18	0,01		
Total	0,48	29			

Prueba de Tukey para las posiciones

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Centro	0,67	10	0,02	A
Salida	0,8	10	0,02	B
Entrada	0,81	10	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
<i>RDUO Concentración</i>	30	0	0,06	0,99	0,9849

Los residuos se distribuyen normalmente

Homoelasticidad

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
<i>RABS Concentración</i>	30	0,49	0,18	88,17

No hay diferencias entre residuos

## Anexo 2. Registro Fotográfico del Tanque de San Ignacio



Fotografía 1. Frente del tanque



Fotografía 2. Tubería de entrada al tanque y respiradero



Fotografía 3. Interior del tanque en el cuadrante de la entrada.



Fotografía 4. Vista posterior del tanque, se observa la tubería de rebalses



Fotografía 5. Tubería de salida del tanque, la roja se direcciona a Guaitil y la azul a San Ignacio



Fotografía 6. Tubo de muestreo a la entrada del tanque.



Fotografía 7. Tubo de muestreo a la salida del tanque.



Instituto Tecnológico de Costa Rica

Proyecto: **Estudio del efecto del almacenamiento sobre la calidad de agua en un tanque de distribución**

**Cuadro 2.** Datos para obtener la curva de relación de la concentración de trazador con la conductividad del agua del tanque.

<b>Identificación</b>	<b>Masa total</b>	<b>Muestra</b>	<b>Concentración</b>	<b>Conductividad</b>

Nota: Se recomienda realizar las disoluciones en un balón aforado de 1000 ml para simplificar el procedimiento.

Observaciones \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_







Instituto Tecnológico de Costa Rica

Proyecto: **Estudio del efecto del almacenamiento sobre la calidad de agua en un tanque de distribución**

**Cuadro 6.** Registro de concentración de cloro libre para la entrada y la del realizado el día \_\_\_\_\_ iniciando a las \_\_\_\_\_.

Número	Hora	Nivel de agua	Caudal de entrada	Concentración	
				Entrada	Salida

Observaciones \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

# Anexo 4. Hoja de Seguridad del Cloruro de Sodio



## Certificate of Analysis

1.06404.1000 Sodium chloride for analysis EMSURE®  
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Batch K43974604

	Spec. Values		Batch Values	
Assay				
argentometric	≥ 99.5	%	99.8	%
argentometric; calculated on dried substance	99.0 - 100.5	%	99.8	%
Identity	passes test		passes test	
Appearance of solution	passes test		passes test	
Acidity or alkalinity	passes test		passes test	
pH-value (5 %; water)	5.0 - 8.0		6.0	
Insoluble matter	≤ 0.005	%	≤ 0.005	%
Bromide (Br)	≤ 0.005	%	≤ 0.005	%
Chlorate and Nitrate (as NO <sub>3</sub> )	≤ 0.003	%	≤ 0.003	%
Hexacyanoferrate II	≤ 0.0001	%	≤ 0.0001	%
Ferrocyanides	passes test		passes test	
Iodide (I)	≤ 0.001	%	≤ 0.001	%
Iodide (I)	passes test		passes test	
Nitrite (NO <sub>2</sub> )	passes test		passes test	
Phosphate (PO <sub>4</sub> )	≤ 0.0005	%	≤ 0.0005	%
Sulphate (SO <sub>4</sub> )	≤ 0.001	%	≤ 0.001	%
Total nitrogen (N)	≤ 0.0005	%	≤ 0.0005	%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.0005	%	≤ 0.0005	%
As (Arsenic)	≤ 0.00004	%	≤ 0.00004	%
Ba (Barium)	passes test		passes test	
Ba (Barium)	≤ 0.001	%	≤ 0.001	%
Ca (Calcium)	≤ 0.002	%	≤ 0.002	%
Cu (Copper)	≤ 0.0002	%	≤ 0.0002	%
Fe (Iron)	≤ 0.0001	%	≤ 0.0001	%
K (Potassium)	≤ 0.005	%	≤ 0.005	%
Mg (Magnesium)	≤ 0.001	%	≤ 0.001	%
Calcium, Magnesium and R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -precipitate	≤ 0.005	%	≤ 0.005	%
Magnesium and alkaline-earth metals (as Ca)	≤ 0.0100	%	< 0.0100	%
Loss on drying (105 °C, 2 h)	≤ 0.5	%	0.001	%

Date of release (DD.MM.YYYY): 19.10.2012  
Minimum shelf life (DD.MM.YYYY): 31.10.2017

Corresponds to ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Dr. Matthias Rompel

responsible laboratory manager quality control

*This document has been produced electronically and is valid without a signature*