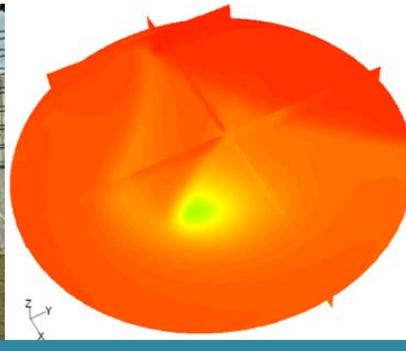




Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable: evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín



Carolina Montoya Pachongo

Directores: Ing. M. Sc. Camilo H. Cruz Vélez (Universidad del Valle)
Dr. Ing. Hábil Santiago Laín Beatove (Universidad Autónoma de Occidente)
Ing. Ph. D. Juan Carlos Escobar Rivera (EMCALI EICE ESP)

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería - Área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental

Santiago de Cali, Marzo de 2012



Departamento Administrativo de
Ciencia, Tecnología e Innovación
Colciencias
República de Colombia





Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable: evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín

Carolina Montoya Pachongo

Directores: Ing. M. Sc. Camilo H. Cruz Vélez (Universidad del Valle)
Dr. Ing. Hábil Santiago Laín Beatove (Universidad Autónoma de Occidente)
Ing. Ph. D. Juan Carlos Escobar Rivera (EMCALI EICE ESP)

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería - Área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental

Santiago de Cali, Marzo de 2012

GLOSARIO

Dinámica Computacional de Fluidos	Ciencia de predecir el movimiento de un fluido, transferencia de calor, transferencia de masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, al solucionar las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos, usando un proceso numérico.
Escenarios operativos actuales	Escenarios definidos, a través de la evaluación experimental, para simular el tanque Ciudad Jardín con un nivel constante de agua.
Fluent 6.3	Programa computacional, propiedad de ANSYS Inc., empleado para las simulaciones CFD del tanque Ciudad Jardín.
Flujo de momento	Es el producto de la velocidad por el flujo másico de un fluido.
ICEM 11.0	Programa empleado para la elaboración de las mallas hexaédricas empleadas para las simulaciones CFD del tanque Ciudad Jardín.
Patrón de flujo	Forma de representar el movimiento de un fluido.
Sistema de distribución de agua	Sistema compuesto por tuberías, hidrantes, accesorios, estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento o compensación que permiten la distribución del agua potable, desde la planta de potabilización hasta el usuario fina.
Tanque de compensación	Estructura perteneciente a un sistema de distribución de agua, caracterizado por ciclos de llenado-vaciado y que permite compensar las demandas de agua durante el periodo de mayor consumo de agua en la red.
Tiempo de mezcla	Tiempo requerido para que la concentración de trazador sea similar en los puntos internos de monitoreo en el tanque Ciudad Jardín.
Volumen of Fluid	Es un modelo incluido en Fluent 6.3 que permite modelar dos o más fluidos inmiscibles al solucionar una serie de ecuaciones de momento y rastrear las fracciones de volumen de cada fluido a través del dominio.
Zonas muertas	Zonas internas del tanque Ciudad Jardín en que el movimiento del agua es nulo o insignificante.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
INTRODUCCIÓN	VIII
1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
2 JUSTIFICACIÓN	2
3 ANTECEDENTES	3
4 MARCO TEÓRICO	7
4.1 ALMACENAMIENTO Y CALIDAD DE AGUA POTABLE	7
4.1.1.1 Problemas físicos	8
4.1.1.2 Problemas químicos	9
4.1.1.3 Problemas microbiológicos	11
4.2 DESINFECCIÓN	12
4.2.1 REACCIONES DEL CLORO EN EL AGUA	12
4.2.1.1 Reacciones hidrolíticas	12
4.2.1.2 Reacciones de óxido-reducción	13
4.2.2 CINÉTICA DEL DECAIMIENTO DEL CLORO EN UN SDA	13
4.3 HIDRÁULICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA POTABLE	14
4.3.1 CHORROS TURBULENTOS	14
4.3.2 ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA	14
4.3.3 TIEMPO DE MEZCLA	15
4.4 MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA	16
4.4.1 MODELOS A ESCALA FÍSICA	16
4.4.2 MODELOS DE SISTEMAS	16
4.4.2.1 Reactores completamente mezclados – RCM	16
4.4.2.2 Modelo de reactor flujo pistón LIFO (last in-first out)	16
4.4.2.3 Modelo de reactor flujo pistón FIFO (first in-first out)	17
4.4.2.4 Modelo de dos compartimentos en el tanque	17
4.4.2.5 Modelo de múltiples compartimentos en el tanque	17
4.4.3 MODELOS HIDRODINÁMICOS	18
4.4.3.1 Modelo matemático	18
4.4.3.2 Representación numérica del modelo matemático	19
4.4.3.3 Método computacional para solucionar el modelo numérico	19
4.5 ESTUDIOS EN CAMPO	20

5	OBJETIVOS	21
5.1	OBJETIVO GENERAL	21
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
6	METODOLOGÍA	21
6.1	SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CALI	22
6.1.1	ASPECTOS GENERALES	22
6.1.2	SISTEMA DE COMPENSACIÓN CIUDAD JARDÍN	22
6.2	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	24
6.2.1	MONTAJE	24
6.2.2	ENSAYO DE TRAZADOR	24
6.2.2.1	Infraestructura externa del ensayo	24
6.2.2.2	Puntos de muestreo	25
6.2.3	MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y CLORO RESIDUAL LIBRE	26
6.3	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A SIMULAR: CONDICIONES ACTUALES	27
6.4	SIMULACIÓN NUMÉRICA	27
6.4.1	MODELO MATEMÁTICO	27
6.4.1.1	Conservación de la masa	27
6.4.1.2	Conservación del momento	28
6.4.1.3	Modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$	28
6.4.1.4	Transporte escalar	29
6.4.2	PREPROCESAMIENTO	30
6.4.2.1	Mallas computacionales	30
6.4.2.2	Verificación de la discretización espacial	30
6.4.2.3	Condiciones iniciales y de frontera	31
6.4.2.4	Solución numérica	31
6.4.3	PROCESAMIENTO	32
6.4.4	POSTPROCESAMIENTO	32
6.5	SIMULACIÓN DE NUEVA CONFIGURACIÓN DE ENTRADA DE AGUA AL TANQUE	32
6.6	PROCESAMIENTO DE RESULTADOS	33
6.6.1	TIEMPO DE MEZCLA	33
6.6.2	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	33
6.6.3	INTERCAMBIO DE AGUA Y ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA	35
6.6.4	TIEMPO MEDIO DE RETENCIÓN SIMULADO	36
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
7.1	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	36
7.1.1	NIVELES Y CAUDALES	36
7.1.2	ENSAYO DE TRAZADOR	37
7.1.3	TEMPERATURA	39

7.1.4	COLORO RESIDUAL LIBRE	41
7.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA	44
7.2.1	PATRÓN DE FLUJO	44
7.2.1.1	Condiciones actuales	44
7.2.2	MEZCLA DE TRAZADOR	45
7.2.3	DECAIMIENTO DEL CLORO RESIDUAL LIBRE	47
7.3	NUEVA CONFIGURACIÓN DE ENTRADA DE AGUA AL TANQUE	51
7.3.1	PATRÓN DE FLUJO	51
7.3.2	MEZCLA DE TRAZADOR	52
7.3.3	DECAIMIENTO DEL CLORO RESIDUAL LIBRE	54
7.4	CONSOLIDADO DE RESULTADOS DEL ESTUDIO	55
8	CONCLUSIONES	56
9	RECOMENDACIONES	57
10	TEMAS FUTUROS DE INVESTIGACIÓN	58
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
12	ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Antecedentes de la investigación de tanques de almacenamiento de agua potable	4
Tabla 4.1. Clasificación de los tanques de acuerdo con varios criterios	7
Tabla 6.1. Condiciones de ensayo de trazador	25
Tabla 6.2. Escenarios con condiciones actuales para simulación de TCJ2	27
Tabla 6.3. Condiciones de frontera en simulación numérica de TCJ2	31
Tabla 6.4. Condiciones específicas de otras simulaciones de TCJ2	31
Tabla 6.5. Características de la simulación de TCJ2 con modificación de entrada de agua	32
Tabla 6.6. Tipos de análisis de varianza aplicados en cada modelo	35
Tabla 7.1. Tiempos de retención – condiciones actuales	47
Tabla 7.2. Consolidado de resultados del estudio	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Representación de un modelo de dos compartimentos	17
Figura 4.2. Representación de un modelo de múltiples compartimentos	18
Figura 6.1. Esquema metodológico del estudio	22
Figura 6.2. Localización y descripción de TCJ2	23
Figura 6.3. Esquema del montaje experimental en TCJ2	24
Figura 6.4. Esquema del montaje experimental para ensayo de trazador	25
Figura 6.5. Puntos de toma de muestras en TCJ2	26
Figura 6.6. Malla computacional para simulaciones de condiciones actuales	30
Figura 6.7. Variación de la variable objetivo (velocidad máxima a la salida) en función de la densidad de la malla	31
Figura 6.8. Descripción y malla computacional de la modificación de entrada de agua a TCJ2	33
Figura 6.9. Esquema del experimento	34
Figura 7.1. Variación de niveles y caudales en TCJ2	37
Figura 7.2. Comportamiento del trazador en TCJ2	38
Figura 7.3. Variación de la temperatura en TCJ2	41
Figura 7.4. Variación del cloro residual libre en TCJ2	43
Figura 7.5. Patrón de flujo de TCJ2 – condiciones actuales	45
Figura 7.6. Contornos de trazador – condiciones actuales	46
Figura 7.7. Contornos de cloro residual libre – condiciones actuales	48
Figura 7.8. Decaimiento del cloro residual libre y ajuste exponencial	49
Figura 7.9. Patrón de flujo de TCJ2 – modificación de entrada de agua	51
Figura 7.10. Comparación contornos de trazador escenario 1 vs. modificación entrada de agua al tanque	52
Figura 7.11. Comparación de perfiles verticales en centro y perímetro de tanque de escenario 1 vs. Modificación entrada de agua al tanque	53
Figura 7.12. Comparación del decaimiento del cloro residual escenario 1 vs. modificación entrada de agua al tanque	54

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo A: Video de simulación 2D de variación de niveles de agua a través de modelo VOF (versión digital)
- Anexo B: Resultados comparativos sin y con flotabilidad en escenario 2.
- Anexo C: Validación de supuestos estadísticos.
- Anexo D: Resultados de análisis estadístico de variables temperatura y cloro.
- Anexo E: Resultados de simulaciones numéricas: patrón de flujo.
- Anexo F: Resultados de simulaciones numéricas: mezcla de trazador.
- Anexo G: Resultados de simulaciones numéricas: decaimiento del cloro residual libre.

RESUMEN

Para contribuir al conocimiento del efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable almacenada en un tanque de compensación de la red baja de distribución de la ciudad de Cali, se realizó la evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín 2 para conocer su comportamiento hidrodinámico interno y la variación de temperatura y del cloro residual libre, así como analizar el efecto de modificaciones físicas de dicha estructura para mejorar la mezcla.

Se ejecutó una etapa preliminar para el análisis de información primaria y para el reconocimiento físico del tanque para conocer su operación e infraestructura. Posteriormente se evaluó experimentalmente el tanque Ciudad Jardín 2, a través de un ensayo de trazador y mediciones de cloro residual libre y temperatura. Luego se simuló numéricamente tres escenarios operativos actuales (nivel de agua máximo, medio y mínimo) a través de la Dinámica Computacional de Fluidos, previo entrenamiento en la elaboración de mallas y en el manejo del programa Fluent 6.3 y la realización de simulaciones preliminares para determinar el tipo de malla, número de elementos y condiciones de frontera e iniciales. Después se definió un escenario con modificación de la configuración de la entrada de agua al tanque (distribución por cuadrantes de cuatro boquillas de diámetro 6") para evaluar el efecto de ésta sobre el patrón de flujo, mezcla de trazador y decaimiento del cloro residual libre. También se identificó el impacto del diferencial máximo de temperatura entre el agua que entra al tanque y la almacenada (de acuerdo con lo encontrado en la evaluación experimental) sobre el patrón de flujo y mezcla de trazador en el escenario de nivel medio.

Los resultados de este estudio permitieron establecer que en el tanque Ciudad Jardín 2 se presentan condiciones inconvenientes para la conservación de la calidad del agua potable, considerando el alto tiempo máximo de retención hidráulica, tiempo de mezcla mayor a la duración de los periodos de llenado, bajo intercambio de agua y presencia de estratificación térmica. Lo anterior se vio reflejado en la obtención de algunas muestras con concentraciones de cloro menores a 0,3 mg/L (16 datos obtenidos en dos días consecutivos). Los resultados de la simulación numérica evidenciaron que las condiciones de mezcla mejoran al distribuir la energía del chorro a través de boquillas verticales ubicadas en el fondo del tanque y, por lo tanto, favorece la calidad del agua en términos de la reducción de zonas muertas.

De acuerdo con lo encontrado en este estudio, se deben tomar medidas a corto, mediano y largo plazo, entre las más importantes se destacan: reclarar el agua impulsada desde el tanque Ciudad Jardín 2 hasta el tanque metálico, reducir los niveles mínimos de operación del tanque evaluado para incrementar el intercambio de agua, cambiar la configuración de entrada de agua al tanque por un sistema de distribución del chorro vertical en el fondo del tanque a través de boquillas, realizar un monitoreo de THM y parámetros biológicos; así como considerar en el diseño de futuros tanques de almacenamiento y compensación los aspectos hidrodinámicos que permitan mantener la calidad del agua almacenada en estas estructuras y el incremento del acceso al interior de éstas para mejorar el monitoreo de la calidad del agua.

ABSTRACT

To contribute to the knowledge of the effect of storage on the stored drinking water quality in a compensation tank of distribution low network of Cali city, an experimental evaluation and numerical simulation were developed in Ciudad Jardín 2 tank to know its hydrodynamic behavior and temperature and free residual chlorine variation, and to analyze the effect of physical changes to the structure for mixing improving.

A preliminary phase was performed to analyze primary information analysis and to check up the tank physically for knowing its operation and infrastructure. Later, Ciudad Jardín 2 tank was evaluated experimentally by a tracer test and temperature and free residual chlorine measurements. After, three actual operative scenarios were simulated numerically (maximum, medium and minimum water level) by Computational Fluids Dynamics, but mesh processing and Fluent 6.3 software management training were necessary first. Preliminary simulations for determining mesh type, elements number and boundary and initial conditions were made too. Then, one scenario with modified inlet configuration was defined (four nozzles with diameter 6 inches distributed by quadrants) for evaluating the effect of this over flow pattern, tracer mixing and free residual chlorine decay. The impact of the maximum temperature differential was identified too over flow pattern and tracer mixing in medium water level scenario.

This study's results allowed establish that in Ciudad Jardín 2 tank are present inconvenient conditions for maintaining drinking water quality, considering the high maximum retention time, mixing time higher than filling period duration, low water interchange and thermal stratification. This was reflected in getting some samples with chlorine concentrations lower than 0.3 mg/L (16 data from two consecutive days). Numerical simulation results showed that mixing conditions improved by distributing the energy of the jet through nozzles located vertically in the bottom of the tank and, therefore, promotes the quality of water in terms of reducing dead zones.

According study's findings, actions should be applied at short, medium and long term, among the most important are: re-chlorination pumped water from Ciudad Jardín 2 to metallic tank, reducing the minimum operation water levels to increase water exchange, changing the configuration inlet of the tank through a vertical jet distribution system at the bottom of the tank through nozzles, making a THM monitoring and biological parameters as well as taking into account the hydrodynamic aspects for the future design of storage and compensation tanks to maintain stored drinking water the quality and increasing access within them to improve monitoring of water quality.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en grandes ciudades de países desarrollados y en desarrollo, el problema del deterioro de la calidad del agua en los sistemas de distribución de agua (SDA) se constituye en un relevante y significativo problema de salud pública, generando preocupación entre los prestadores de servicios de suministro de agua y los usuarios, así como motivando el interés de organizaciones internacionales y el desarrollo de herramientas científicas y académicas para la solución del problema. Para enfrentar esta problemática, recientemente la OMS propuso a nivel internacional aplicar en los sistemas de abastecimiento de agua la metodología de los **Planes de Seguridad del Agua (PSA)** (WHO, 2004), propuesta conceptual desarrollada a partir de la metodología HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point), la cual indica que se debe cuidar la calidad del agua que va a ser destinada para consumo humano con un enfoque integral desde la fuente, los procesos de tratamiento, el SDA y el usuario final, es decir, considerando también las redes intradomiciliarias.

Los SDA están compuestos por tuberías, válvulas, hidrantes, uniones, medidores, acometidas, bombas y tanques, siendo estos últimos los más visibles y los menos entendidos desde el punto de vista del efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua almacenada. Lo anterior se debe a que estas estructuras fueron tradicionalmente diseñadas para compensar presiones en el SDA y/o mantener reserva de agua para eventos especiales (atención de incendios y suspensiones del servicio). En términos generales, los problemas de calidad de agua en un SDA están asociados con diferentes fenómenos que afectan la integridad física, hidráulica y de calidad de agua como formación de subproductos de la desinfección (SPD) durante y después del proceso de tratamiento, interacción con los materiales utilizados en el sistema, formación de biopelícula en los diversos componentes del SDA, efecto de contraflujo en tramos de tuberías, bajas presiones y eventos que alteran el normal funcionamiento de la red (actividades de construcción, reparación y mantenimiento) (National Research Council, 2006).

Para minimizar tales problemas, se requiere de un adecuado diseño, construcción, operación y mantenimiento de los SDA para garantizar una adecuada separación entre las redes y las potenciales fuentes de contaminación (alcantarillados sanitarios y pluviales); asegurar una presión mínima de 14 m.c.a. aún en los extremos de la red; evitar zonas muertas que faciliten la acumulación de sedimentos; minimizar la edad del agua; evitar bajas velocidades; mantener una adecuada mezcla al interior de los tanques de almacenamiento y adecuadas concentraciones del desinfectante en todo el sistema; ejecutar regularmente un plan de mantenimiento de redes y tanques (inspección, lavado y desinfección), bombas y válvulas para evitar presiones bajas o negativas que favorezcan el ingreso de contaminantes al sistema (riesgo de intrusión); aplicar buenas prácticas de higiene en las labores de construcción y reparación de daños en las redes y reducir la cantidad de nutrientes para minimizar la formación de biopelícula; entre otras (EPA, 2002a; National Research Council, 2006).

Entre los factores citados anteriormente, el almacenamiento tiene un fuerte impacto sobre las concentraciones residuales del desinfectante y la edad del agua en la parte del SDA influenciado por los tanques, siendo de gran importancia establecerlos cambios que ocurren en el agua en el interior de estas estructuras. Para este propósito se han utilizado diferentes herramientas como la modelación que puede ser de sistemas, a escala física o computacional. En este sentido, la presente propuesta de investigación está orientada a contribuir a mejorar el conocimiento del efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable, tomando como caso de estudio un (1) tanque de la red baja de distribución de la ciudad de Cali.

1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Por lo general en las grandes ciudades, la calidad del agua a la salida de las plantas de potabilización es óptima; sin embargo, en los SDA puede deteriorarse debido a la intrusión de contaminantes, tuberías deterioradas, altas edades del agua, concentraciones insuficientes del desinfectante residual, presencia de biopelícula, formación de SPD, etc. (National Research Council, 2006), incrementándose el riesgo para la salud pública por el consumo de agua. Entre los aspectos más importantes a tener en cuenta en la operación de un SDA se destaca el control de la concentración residual de desinfectante, la turbiedad, el color, el olor y la formación de SPD; la estabilización de la presión; las buenas prácticas en reparación de daños; el manejo de caudales, conexiones cruzadas y prevención de contraflujo, así como la minimización de la edad del agua en la red de distribución y en los sistemas de almacenamiento (EPA, 2005).

En un SDA los tanques son usados para compensar las demandas de agua en la red de distribución, equilibrar las presiones en el sistema y proveer un volumen de reserva para atención de incendios y otras emergencias, por lo que éstos se constituyen en los componentes más visibles de un SDA, pero poco se conoce sobre el efecto del almacenamiento de agua sobre calidad de la misma y la propagación de contaminantes (EPA, 2005).

En este sentido, un aspecto de gran interés en el tema del almacenamiento ha sido el régimen de mezcla al interior de los tanques; cuando se presentan deficiencias en su diseño u operación se promueve la inadecuada mezcla del agua en ellos y el incremento de la edad del agua, fomentándose la formación de SPD como trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (HAA) y la pérdida del desinfectante residual, favoreciendo el recrecimiento de microorganismos en el sistema (incluyendo patógenos), origina problemas de olor y sabor en el agua e incrementa el riesgo sanitario por recontaminación en la red (Lansey y Boulous, 2005). En resumen, los cambios en la calidad del agua almacenada pueden afectar notoriamente la calidad del producto final que llega a la población abastecida por el tanque de almacenamiento, incrementando el riesgo sanitario por el consumo de agua en estas condiciones.

En el territorio nacional, lo estipulado en la normatividad del sector de agua potable refleja lo ya mencionado en cuanto a que los sistemas de almacenamiento han sido concebidos tradicionalmente sólo como prestadores de un servicio de tipo hidráulico sin considerar en profundidad los aspectos de calidad de agua, la cual puede verse afectada por el almacenamiento. Específicamente, el RAS 2000, expedido por el Ministerio de Desarrollo Económico, establece en el numeral B.9.2.1 que *“un tanque de compensación tiene la función de almacenar agua y compensar las variaciones entre el caudal de entrada y el consumo a lo largo del día. Por tanto, durante la concepción, el diseñador debe establecer las necesidades de demanda y las variaciones del consumo, a lo largo del día, de la red de distribución, para definir la magnitud del almacenamiento requerido. Así mismo, debe determinar las zonas de presión en la red de distribución y fijar los niveles de agua requeridos para mantener los valores establecidos en ella”*.

Cabe destacar que en el año 2009 se conocieron los borradores de una nueva versión del RAS, cuyo Título B (Sistemas de Acueducto) incluye un capítulo exclusivo para los tanques de almacenamiento y compensación. En esta propuesta se plantea con mayor claridad la influencia de los tiempos de residencia sobre los aspectos de calidad de agua y, por lo tanto, diversos criterios de diseño de este tipo de estructuras están orientados a mantener un adecuado residual del desinfectante; así mismo, incorpora detalladamente aspectos de modelación de redes de distribución, considerando los tanques, variación de los niveles de agua y concentraciones del desinfectante residual en ellos.

En el contexto local, el SDA de la ciudad de Cali tiene 34 tanques que representan 188.283 m³ de capacidad de almacenamiento a los cuales no se les realiza todavía monitoreo de calidad de agua¹ a pesar que la Resolución 0811 de 2008 (expedida por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) contempla la toma de muestra para monitoreo de calidad de agua en estas estructuras y así mismo se estructuró el programa de monitoreo de calidad de agua en el sistema de abastecimiento de la ciudad de Cali, de acuerdo con el estudio desarrollado por EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle (2007), reflejando así que todavía prevalece la concepción de estas estructuras como prestadores de un servicio hidráulico sobre el conocimiento del efecto de éstos en la calidad del agua que se almacena.

En dicho proyecto también se modeló con el programa EPANET el sistema Nápoles-Ciudad Jardín, el cual incluyó el tanque Ciudad Jardín 2 (TCJ2), aunque éste en sí mismo no se modeló (EMCALI EICE ESP y Universidad del Valle, 2007). Este estudio permitió establecer la edad aproximada del agua y las concentraciones de cloro residual libre a la entrada y salida del tanque. Los resultados basados en supuestos de mezcla en los tanques (modelos de sistemas) muestran un profundo impacto del tiempo de retención hidráulico (TRH) en esta estructura sobre la calidad del agua suministrada por el tanque y recomendó realizar la modelación interna de éste para establecer con mayor profundidad el efecto del almacenamiento de agua sobre la calidad de la misma en su área de influencia. Una primera aproximación en este sentido fue realizada recientemente por Muriel (2008), quien aplicó la modelación de la dinámica computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) para el TCJ2; el trabajo realizó una aproximación teórica hidrodinámica al problema pero su alcance no incluyó la validación del modelo con datos de campo y, por lo tanto, ésta se constituyó en una de sus recomendaciones.

Con el objetivo de disponer de información suficiente para comprender el efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua de la misma en la red de distribución, se hace necesario diseñar y aplicar medidas que permitan realizar una mejor gestión, diseño, operación y mantenimiento del SDA de la ciudad de Cali, siendo la modelación hidráulica y de calidad de agua al interior de los tanques una herramienta útil que permite la toma de decisiones en varios niveles de la empresa prestadora del servicio de acueducto para minimizar el deterioro de la calidad del agua en el SDA, una vez ésta sale de las plantas de potabilización.

2 JUSTIFICACIÓN

La calidad del agua potable puede deteriorarse a través del sistema de distribución, ya que en éste ocurren diversas reacciones tanto químicas como biológicas; para mantener agua de alta calidad, los tiempos de viaje en el SDA deberían mantenerse tan cortos como fuera posible, los cuales están afectados por factores como la distribución espacial y temporal de las demandas de agua, tamaños de tuberías y geometría de la red (Lansey y Boulos, 2005). Además, el agua es a menudo almacenada en tanques y reservorios para proveer la presión adecuada y muchas de estas instalaciones se mantienen parcialmente llenas para atender emergencias, constituyéndose en los componentes más visibles de un SDA pero con poco conocimiento de su efecto sobre la calidad del agua (EPA, 2005).

De acuerdo con Lansey y Boulos (2005), la operación tradicional de los tanques de almacenamiento de agua potable puede crear diversos retos en la calidad del agua incluyendo la pérdida del desinfectante residual; incremento de la

¹Conversación telefónica con Ing. Johanna Devia, mayo 10 de 2011 - Coordinadora Laboratorio Central EMCALI EICE ESP

edad del agua; proliferación de bacterias; nitrificación (en sistemas que utilizan las cloraminas como desinfectante); formación de SPD y cambios en el sabor, olor y apariencia del agua. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario considerar objetivos de calidad de agua en la toma de decisiones de gestión sobre el almacenamiento, lo cual es difícil de conseguir si se entiende que los objetivos de cantidad y calidad de agua a menudo se encuentran en conflicto en la operación de un SDA. En este sentido, es claro que se requiere un balance entre mantener un adecuado servicio hidráulico y una óptima calidad del agua, para lo cual muchos operadores se han visto obligados a tomar acciones correctivas para minimizar los tiempos de residencia y maximizar el desinfectante residual del agua almacenada.

Dichas acciones correctivas incluyen, además del mejoramiento de la operación de los tanques, optimizar los programas de mantenimiento, monitoreo rutinario de la calidad del agua, evaluación de la integridad estructural de los tanques e innovación en el diseño tal como el acondicionamiento de la estructura del tanque para mejorar la mezcla. Las implicaciones de acciones correctivas alternativas son a menudo difíciles de valorar teniendo en cuenta que las condiciones de los tanques son particulares para cada uno de ellos. En consecuencia, es necesario comprender la hidráulica y mezcla del agua dentro de un tanque para representar correctamente las reacciones complejas que ocurren en su interior, así como el efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua (Lansey y Boulos, 2005).

Así pues, la modelación de tanques de almacenamiento, tanto en términos hidráulicos como de calidad de agua se constituye en un aporte para alcanzar los objetivos de los PSA como herramienta para el diseño y operación de sistemas de almacenamiento, ya que permiten establecer comportamientos hidráulicos, simular diversos escenarios tanto en su diseño como en su operación y predecir cómo el almacenamiento afectará la calidad del agua que luego será suministrada a los usuarios.

A pesar que la normatividad existente no considera aspectos concretos de calidad del agua almacenada, las características del sistema de almacenamiento de la ciudad de Cali pueden ser similares a las de numerosas ciudades de países en desarrollo, evidenciando que este tema requiere ser investigado con mayor profundidad. Las herramientas tradicionalmente empleadas en estos estudios han sido los modelos físicos, posteriormente se desarrollaron los modelos virtuales que integran aspectos hidráulicos y de calidad de agua tales como los de sistemas y recientemente la CFD, que es más compleja y requiere gran capacidad de los equipos de computación. Sin embargo, los beneficios obtenidos en la predicción de cambios permiten obtener resultados confiables si son adecuadamente validados, posibilitando la toma de medidas correctivas necesarias para mantener la calidad de agua hasta el usuario final.

Adicionalmente, estas herramientas pueden constituirse en un instrumento para mejorar los diseños y la operación de los sistemas de almacenamiento de agua del SDA de la ciudad de Cali, lo cual podría posicionar a EMCALI EICE ESP como una empresa líder en el sector de la prestación de servicios públicos al estar a la vanguardia en los recientes desarrollos conceptuales en el abastecimiento de agua segura para consumo humano.

3 ANTECEDENTES

Tradicionalmente el diseño y construcción de los tanques de almacenamiento de agua potable se realizaba para cumplir con las funciones de tipo hidráulico. En la década de los años 90 en los Estados Unidos, el tema de la

calidad de agua al interior de estas estructuras empezó a despertar interés, cuando se abordó la investigación y el desarrollo de modelos para conocer las condiciones hidráulicas predominantes en estos tanques e inferir su efecto sobre la calidad del agua al interior de ellos, principalmente, a partir de modificaciones operativas y/o físicas para mejorar la calidad del agua almacenada. En este sentido, la modelación CFD ha sido una herramienta cuya utilidad ha sido ampliamente demostrada.

De acuerdo con van der Walt (2008), la modelación CFD tuvo sus inicios en la industria aeroespacial en los años 1940, lo cual representó una valiosa herramienta no sólo para entender la dinámica de fluidos sino para reducir los costos asociados. Los primeros usuarios de la CFD desarrollaban sus propios códigos y luego se asociaron con instituciones investigativas y empresas del sector aeroespacial de alto presupuesto. El rápido desarrollo de los computadores y de la modelación de la turbulencia dio paso a los programas comerciales y permitió que las aplicaciones de la CFD se extendieran a otros campos, incluyendo la industria del agua. Inicialmente, las aplicaciones se limitaron a problemas idealizados del flujo y después incluyeron flujos turbulentos y multifásicos (van der Walt, 2008).

La investigación en modelación hidráulica y de calidad de agua en tanques de almacenamiento de agua potable se ha desarrollado como se describe en la Tabla 3.1, en la cual se observa que estas estructuras se han investigado a través de dos herramientas: estudios en campo y modelación (a escala física, de sistemas y CFD). La modelación CFD también ha sido ampliamente usada en cámaras de contacto de cloro de plantas de potabilización, con el fin de optimizar los tiempos de contacto (Hannoun et al., 1998; Peplinski y Ducoste, 2002; van der Walt, 2002; Wang et al., 2003; Greene et al., 2004; Templeton et al., 2006; Rauen et al., 2008; Muriel et al., 2009; Yu et al., 2008).

Tabla 3.1. Antecedentes de la investigación de tanques de almacenamiento de agua potable

Tipo de modelación	Fuente bibliográfica
Modelación matemática simplificada con dos soluciones a partir de las ecuaciones de balance de masa y aplicable para condiciones específicas del tanque.	Rossmann et al., 1995
Modelación matemática con ecuaciones de balance de masa y aplicación de modelos de compartimentos.	Clark et al., 1996
Estudios de mediciones en campo (cloro residual libre y ensayo de trazadores) al interior de un tanque de almacenamiento.	Boulos et al., 1996
Aplicación de modelos de sistemas (mezcla completa y cuatro compartimentos), modelos físicos y modelación CFD en un tanque de almacenamiento.	Grayman et al., 1996
Modelación matemática con ecuación de Okita.	Rossmann y Grayman, 1999
Modelación CFD de un tanque esbelto -standpipe-.	Duer, 2003
Combinaciones de modelos físicos, de compartimentos y CFD.	Grayman et al., 2004 Mahmood et al., 2005
Modelos físicos de 3 tipos de tanques: cilíndricos, rectangulares y esbeltos.	Tian y Roberts, 2008
Análisis con modelación CFD de nueve tanques usados para desinfección del SDA de Atenas: configuración inicial y modificaciones.	Stamou, 2008

Como se mostró previamente, la modelación de estructuras de sistemas de abastecimiento de agua ha tenido un desarrollo apreciable, aunque la CFD se ha aplicado más para cámaras de contacto de cloro que para tanques. Con relación a los primeros, estudios como los de Wang et al. (2003) y Greene et al. (2004) utilizaron la modelación CFD para simular el decaimiento del cloro con cinética de primer orden acompañado de la simulación de la inactivación de microorganismos a partir de la ley de Chick-Watson en el caso del primero y el modelo de Hom en el segundo,

pudiendo establecer modelos adecuados de turbulencia para simular procesos de desinfección y encontrando buenas correlaciones con resultados experimentales, respectivamente.

Wang et al. (2003) afirma que es necesario profundizar el tema de la simulación CFD de procesos de desinfección al incluir la influencia de aspectos fisicoquímicos, otras combinaciones de modelos de turbulencia, esquemas numéricos más complejos y evaluar el efecto del tamaño de la malla. Respecto a los tanques, Grayman et al. (1996) compararon los resultados de la modelación física, de compartimentos y CFD con los datos obtenidos en un ensayo de trazador, en un tanque cilíndrico con entrada y salida simultánea de agua. Dicha comparación les permitió establecer una adecuada concordancia entre los datos de campo y los resultados de los modelos. En cuanto a la CFD, simularon un trazador durante 33,5 horas, encontrándose concentraciones más altas de éste en el anillo externo del tanque y un patrón no simétrico en la sección transversal del mismo que no pudo identificarse con el trabajo de campo, dados los limitados puntos de muestreo. Adicionalmente, el trabajo de campo permitió establecer un incremento significativo del trazador en la parte superior del centro del tanque, lo cual no fue observado con esta modelación, posiblemente debido a la no consideración de los efectos térmicos sobre el patrón de flujo.

En este sentido, Duer (2003) estableció que las diferencias de temperatura entre el agua almacenada y la que entra al tanque pueden ocasionar mezcla ineficiente y cortos circuitos al interior de un tanque esbelto. Para esto, se simularon 10 configuraciones del tanque conformadas por variaciones de la posición de la tubería de entrada y de las temperaturas del agua (almacenada y la que entra).

Nordblom y Bergdahl (2004) monitorearon la temperatura del agua almacenada en dos tanques de compensación, durante 3,5 meses, usando doce termistores en cada tanque. Los resultados obtenidos se escalaron basados en el cambio de temperatura de un RCM y se determinó el intercambio local y global de agua. Este estudio ratificó que la relación de escala de longitud (Fd/H) controla el inicio del estancamiento en tanques de compensación. También se encontró que la estratificación térmica de la masa de agua puede cambiar el régimen de flujo de completamente mezclado a pistón, lo cual ocasionó que el intercambio local de agua se redujera en un 20-30% en la superficie del agua y en un 80-90% en el fondo. Por último, este autor indicó que las relaciones críticas de escala de longitud encontradas en su investigación pueden ser referencia para otros tanques con similares geometrías y relaciones de aspecto (H/D).

Mahmood et al. (2005) estudiaron tres tanques (superficial, elevado y esbelto) a través de la medición en campo de temperatura (durante 20 días) y cloro residual y a través de la simulación CFD de la inyección de trazador en los mismos. Los resultados de temperatura mostraron variaciones cíclicas de esta variable de acuerdo con los ciclos de vaciado y llenado de los tanques, se identificó amplia estratificación térmica en éstos entre un punto medio del nivel del agua y la superficie libre (entre 0,45 y 1,70 °C). Estos autores también encontraron adecuada concordancia entre los datos de cloro y temperatura medidos en campo. La modelación CFD de estos tanques permitió recomendar la reducción del diámetro de la tubería para incrementar el momento y evitar el choque del chorro de agua que entra a los tanques contra las paredes para evitar la pérdida de momento y así impedir la mezcla ineficiente. Dichas modificaciones se aplicaron en los tanques y nuevas mediciones de temperatura permitieron establecer que los datos medidos en la superficie y fondo del agua convergieron en la noche, indicando así adecuada mezcla.

Stamou (2008) estudió nueve tanques del SDA de la ciudad de Atenas usados para desinfección, a través de la modelación CFD, tanto para la geometría inicial de éstos como para modificaciones físicas de los mismos. En las geometrías iniciales, el flujo se caracterizó por altos niveles de cortos circuitos, grandes regiones de recirculación y un alto grado de mezcla. En cuanto a las modificaciones físicas, el uso de deflectores creó campos de flujo con volúmenes significativos de flujo pistón, se redujeron los cortos circuitos, se disminuyeron las zonas de recirculación y, por lo tanto, se redujo la mezcla. Dichas modificaciones resultaron en una mejor eficiencia hidráulica.

A pesar de que las simulaciones CFD para tanques de compensación se han realizado en la mayoría de los casos con nivel de agua constante para un caudal de entrada específico, Nordblom (2004) investigó la influencia de una mayor densidad del agua que entra a un tanque cilíndrico en procesos transitorios de mezcla, utilizando los modelos de malla dinámica y deformación de malla para representar los ciclos de llenado y vaciado de los tanques. A partir de numerosas simulaciones bajo las condiciones críticas de mezcla y basado en el criterio de mezcla como la altura de penetración, se estableció un rango de la relación nivel de agua/diámetro del tanque (H/D) en el que se presenta una adecuada mezcla. El resultado más importante de este trabajo fue la evidencia de que existe un valor inicial crítico de Fd/H (F : número de Froude, d : diámetro tubería de entrada, H : nivel de agua) bajo el cual no puede mantenerse la circulación a lo largo de las fronteras durante el periodo de llenado.

En cuanto a calidad de agua, la modelación CFD de tanques se ha limitado a establecer los patrones de flujo y la variación de un trazador en su interior. El estudio del cloro en estas estructuras se ha realizado con mediciones en campo. Boulos et al. (1996) realizaron un ensayo de trazador con flúor y midieron el cloro residual libre y temperatura del agua almacenada en un tanque de Azusa (CA), para lo cual se realizó un montaje al interior de éste a través de la ventilación central y acceso perimetral, dada la facilidad de introducir las tuberías de toma de muestras por estos orificios. A partir de las mediciones en campo, se estableció el patrón de flujo del tanque estudiado como de flujo rotacional relativamente rápido alrededor de un gran anillo externo junto con un flujo lento descendente dentro de un pequeño núcleo central. Así mismo se determinó que, para los caudales del estudio, el reservorio se comportó como un RCM con un tiempo de residencia de 9,7 horas y una pérdida de cloro residual libre insignificante. Finalmente, los autores recomiendan que las mediciones en campo se realicen regularmente para facilitar la operación de los sistemas de almacenamiento.

Respecto a la modelación CFD del decaimiento del cloro residual libre en tanques, la información disponible muestra que ésta ha sido escasa, resaltándose el trabajo doctoral de van der Walt (2002) que incluye, además de simulaciones CFD en floculadores, sedimentadores, cámaras de contacto de cloro e inyección de trazador en tanque, simulaciones de diversos escenarios sobre el decaimiento del cloro residual libre en un tanque cilíndrico. El autor concluyó que la concentración de cloro a la salida del tanque no representa la de su interior y estableció que el límite mínimo permisible de cloro residual puede ser el criterio para escoger una alternativa de modificación física y/u operativa en un tanque para mejorar la calidad del agua almacenada.

De acuerdo con lo anterior, es claro que todavía en el tema de modelación CFD de tanques de almacenamiento de agua potable (especialmente de los tanques de compensación) se requiere profundizar en la aplicación de modelos que representen la variación del nivel de agua y el decaimiento del cloro residual libre. Sin embargo, no debe desconocerse que existe un progreso conseguido a través de la investigación en el tema, el cual se ha dado

principalmente en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Suecia, Sudáfrica y en países en desarrollo como Colombia, en el cual Muriel (2008) aplicó la modelación CFD a los tanques Ciudad Jardín y Nápoles de la ciudad de Cali, simplificando los casos de estudio e infiriendo problemas de calidad de agua relacionados con la presencia de zonas de recirculación que ocasionan la pérdida del cloro residual.

En esta ciudad se han elaborado otras modelaciones realizadas en el marco de proyectos de consultoría o investigación aplicada y orientadas a la red de distribución (tanto de tipo hidráulico como de calidad de agua: cloro residual libre y trihalometanos). Cabe destacar el estudio realizado por EMCALI EICE ESP y Universidad del Valle (2007) en el que se modeló hidráulicamente y la calidad del agua en un sector del SDA de la ciudad y el de Ruiz y Rojas (2008) sobre el decaimiento del cloro en este mismo sector, encontrando que las mayores edades del agua en el sistema fueron el resultado del almacenamiento de agua en el TCJ2. De acuerdo con EMCALI EICE ESP y Universidad del Valle (2007), el problema del envejecimiento del agua se presenta en ciertas horas en aproximadamente el 17% de las tuberías del sector, que corresponden a 132 tramos de la red, en los cuales la edad del agua puede alcanzar hasta las 70 horas (3 días) y según Ruiz y Rojas (2008), las zonas influenciadas por este tanque presentaron edades del agua entre 14 y 145 horas, determinadas a partir de la estación de bombeo Nápoles (entrada al sector).

Lo descrito previamente muestra los esfuerzos realizados para desarrollar herramientas que permitan conocer las variaciones de calidad de agua afectadas por el almacenamiento en los SDA, principalmente en términos del patrón de flujo y régimen de mezcla. En consecuencia, la herramienta más reciente y que ha tenido gran auge en los últimos años en la industria del agua es la modelación CFD por su exactitud y flexibilidad para adaptarla a condiciones particulares, por lo cual se hace necesario incursionar en este campo para aprovechar sus múltiples beneficios, como contribución al alcance de los objetivos de los PSA, principalmente asociada al decaimiento del cloro residual libre en tanques de almacenamiento, con miras a minimizar el riesgo microbiológico presente en un SDA.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 ALMACENAMIENTO Y CALIDAD DE AGUA POTABLE

Los tanques y reservorios son usados para suministrar capacidad de almacenamiento ya sea para agua cruda en el caso de embalses y lagos como para agua potable, de tal manera que se amortigüen las fluctuaciones de la demanda de agua, que existan reservas para atender emergencias como incendios y se igualen presiones en el SDA (van der Walt, 2002; EPA, 2005). De acuerdo con diversos criterios, los tanques para almacenamiento de agua potable pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Clasificación de los tanques de acuerdo con varios criterios

Criterio	Clasificación
Posición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevado ▪ Superficial ▪ Enterrado
Material	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concreto

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acero
Geometría	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cilíndricos: de baja relación altura/diámetro (tanques bajos) y de alta relación altura/diámetro (tanques esbeltos). ▪ Rectangulares ▪ Esféricos
Condiciones hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Completamente mezclado ▪ Flujo pistón ▪ Combinación de los dos anteriores ▪ No definido

Fuente: adaptada de van der Walt, 2002; EPA, 2005

Los tanques de almacenamiento son los componentes más visibles de los SDA pero son generalmente poco entendidos en términos de su impacto sobre la calidad del agua. Desde el momento en que el agua deja las plantas de tratamiento, la edad del agua se incrementa y se generan cambios en la calidad como resultado de reacciones químicas y biológicas a lo largo del tiempo y del espacio (Kennedy et al., 1993). En general, los SDA por su gran complejidad, podrían representar riesgos en la salud de los usuarios y más aun hablando del almacenamiento que tiene asociados diversos problemas de tipo químico, microbiológico y físico, aunque algunos de estos problemas podrían estar en más de una categoría (Kirmeyer et al., 1999).

4.1.1.1 Problemas físicos

Un problema de calidad de agua puede estar relacionado con fenómenos físicos como acumulación de sedimentos y entrada directa de contaminantes al interior de los tanques. Estos problemas físicos pueden conducir a otros problemas químicos y/o microbiológicos si no se sigue un plan de mantenimiento programado de estas estructuras. Además de la acumulación de hierro y manganeso en tanques de almacenamiento de agua potable debido a la precipitación química, también puede sedimentarse otro material suspendido presente en el agua.

Los sedimentos se acumulan frecuentemente en zonas donde la velocidad es mínima y pueden resuspenderse debido a aumentos repentinos del flujo que sale o entra del sistema, fomentando el aumento de la demanda de cloro en el agua (Kirmeyer et al., 1999; Martel et al., 2002). Beuhler et al. (1994), citados por Kirmeyer et al. (1999), rastrearon una alta contaminación microbiológica en sistemas de almacenamiento a partir del sedimento acumulado; así mismo, Burlingame y Brock (1985), citados por Kirmeyer et al. (1999), especularon que un problema de sabor y olor estuvo ligado al sedimento de fondo de un tanque de almacenamiento, dada la abundancia de sustrato para el crecimiento biológico.

Un método para prevenir que los sedimentos acumulados en un tanque reingresen a la red de distribución consiste en instalar una tubería de salida más elevada que el fondo del tanque. En el caso de una operación inadecuada de la planta de potabilización, la medida a tomar sería optimizar los procesos de tratamiento para reducir la cantidad de partículas suspendidas en el agua que se distribuye. Adicionalmente, la limpieza de los sistemas de almacenamiento minimizarán su acumulación y el lavado de tuberías a través de purgas por hidrantes (flushing) pueden remover los sedimentos acumulados en las redes, evitando así que lleguen a los tanques.

Block et al. (1996), citados por Kirmeyer et al. (1999), colectaron muestras de sedimentos de tanques de almacenamiento y redes de distribución y determinaron su composición, encontrando que, en cuanto a los tanques, las características de los sedimentos variaron en su apariencia (color), textura (granos y flóculos) y estaban constituidos de insolubles (18%), óxidos de hierro (19%), sólidos volátiles (19% del total), hidróxidos de aluminio (15%), carbonatos de calcio (10%) y no identificados (16%). Adicionalmente, se identificó que los sedimentos

estaban colonizados por microorganismos y que la fracción mineral actuaba como soporte para las bacterias, mientras que el número de éstas estaba condicionado por la concentración de materia orgánica. Finalmente, evidenciaron que los sedimentos y partículas acumulados en las redes de distribución pueden resuspenderse y llegar a los sistemas de almacenamiento, donde se sedimentan.

Los problemas de calidad de agua mencionados anteriormente están estrechamente asociados a la presencia de zonas muertas donde se reduce el intercambio de flujo con la masa de agua, generando altos tiempos de residencia en los tanques (Martel et al., 2002). Estas zonas se presentan inicialmente en regiones distantes de la salida/entrada u otros dispositivos del tanque y su localización y extensión (volumen), configuración de entrada/salida, presencia de gradientes de temperatura del agua almacenada y el volumen húmedo total del tanque. Otros fenómenos como cortos circuitos pueden también predominar en una estructura de almacenamiento de agua (Lansey y Boulos, 2005).

Por otra parte, el volumen de agua para atención de emergencias puede permanecer en el tanque por largos periodos de tiempo generando agua de pobre calidad, mezclándose con el agua que entra al tanque y así impactando la calidad del agua en el sistema. En consecuencia, las políticas operacionales que disminuyen el volumen de emergencia almacenado pueden mejorar la calidad del agua y una adecuada mezcla eliminaría zonas muertas, prevendría cortos circuitos entre la entrada y salida del tanque y evitaría la acumulación de sedimentos (EPA, 2002b; National Research Council, 2006). Sin ningún almacenamiento de emergencia, se evita en gran parte el decaimiento del cloro en la masa de agua, lo cual ocurre durante los periodos de llenado (Lansey y Boulos, 2005).

A manera de ejemplo, en la mayoría de los SDA de los Estados Unidos, menos del 25% del volumen almacenado en tanques se usa activamente durante el día bajo condiciones rutinarias. Cuando los niveles de agua disminuyen, se requiere incrementar el caudal de bombeo para satisfacer las demandas de agua y llenar de nuevo los tanques. El agua remanente en los tanques (70-75%) normalmente permanece como reserva para la atención de emergencias. Dicha agua estancada podría causar problemas de calidad de agua si, en algún momento, sale del tanque o se mezcla con el agua que entra a éste, afectando el área abastecida por él (EPA, 2005).

Como se discutió previamente, los sistemas de almacenamiento de agua son más complejos de lo que se creía pues tienen asociados diversos problemas que pueden afectar negativamente la calidad de agua que se distribuye al consumidor, dados los excesivos tiempos de retención que se podrían presentar en éstos que, en conjunto con una mezcla pobre, son probablemente los factores más influyentes en la calidad del agua en un tanque de almacenamiento (Boulos et al., 1996). Lo anterior evidencia la necesidad de darle la importancia necesaria a estos sistemas en los programas de operación y mantenimiento de los SDA.

4.1.1.2 Problemas químicos

De acuerdo con Kirmeyer et al. (1999), existen varios problemas de calidad de agua asociados con el almacenamiento que son causados por o son el resultado de una reacción química, tales como la pérdida del desinfectante residual, formación de subproductos de la desinfección (SPD), generación de olor y sabor, incremento del pH, corrosión, acumulación de hierro y manganeso, presencia de sulfuro de hidrógeno y lixiviación de los revestimientos internos. Según lo expuesto por Kirmeyer et al. (1999), a continuación se discuten los dos primeros, dado que son quizás los problemas químicos más comunes y la pérdida de desinfectante residual conduce a problemas microbiológicos como se verá más adelante.

▪ **Pérdida del desinfectante residual**

Este problema es el resultado de la disminución del desinfectante (generalmente cloro libre o total) como una función del tiempo y la tasa de decaimiento. Esta última puede verse afectada por contaminación microbiológica, temperatura, nitrificación, exposición a luz ultravioleta (sol) y cantidad y tipo de sustancias que demanden desinfectante (orgánicas e inorgánicas). Ya que el volumen de agua en un tanque es normalmente grande comparado con el área superficial expuesta, no se considera significativo el efecto de las paredes y el fondo sobre el decaimiento del desinfectante, por lo que la pérdida de desinfectante se atribuye normalmente más a la masa de agua que a las paredes.

Un sistema de almacenamiento de agua potable puede incrementar el decaimiento del desinfectante al incrementar el tiempo que permanece el agua en el SDA antes de llegar al consumidor, dado que los tiempos de retención pueden ser excesivamente extensos, alrededor de semanas e incluso meses en tanques donde el agua es subutilizada o donde hay poca circulación o zonas muertas. Un alto tiempo de retención puede generar que el desinfectante se pierda por completo, ocasionando así que el agua potable no tenga protección contra contaminantes microbiológicos que puedan estar presentes aguas abajo del sistema de almacenamiento. De esta manera, se afectaría negativamente la calidad del agua suministrada a los usuarios y podría incumplirse la normatividad de calidad del agua potable.

Actividades de monitoreo, inspección y mantenimiento tales como limpieza regular del tanque ayudarán a mejorar la habilidad del sistema para mantener adecuadas concentraciones del desinfectante residual. Rutinas operativas como incremento de la cantidad de agua que fluye a través del sistema de almacenamiento son importantes para minimizar la pérdida de desinfectante residual. Consideraciones de diseño como dimensionamiento y direccionamiento de entradas de agua para aumentar la mezcla, instalación de un sistema de mezcla dentro del tanque, reubicación de la entrada o salida o instalación de un sistema de bombeo para incrementar el flujo a través del tanque normalmente reducirán zonas estancadas, disminuyendo así la cantidad de desinfectante residual perdido.

▪ **Formación de subproductos de la desinfección (SPD)**

Los SPD se forman cuando el desinfectante usado reacciona químicamente con la materia orgánica presente en el agua y la variedad de éstos depende del tipo de desinfectante empleado. De éstos, los que más han sido regulados son los THM y los HAA. De acuerdo con Reli (1993), citado por Kirmeyer et al. (1999), los principales factores que influyen la formación de SPD incluyen el tiempo de contacto, dosis y residual de cloro, temperatura, pH, concentración de precursores y concentración del ion bromuro.

En los sistemas de almacenamiento de agua potable, la formación de SPD está usualmente ligada a cuatro de estos seis factores. Como se explicó previamente, el tiempo de contacto en estas estructuras es grande y entre más se incrementa, se aumenta la formación de SPD; la reclaración dentro de tanques de almacenamiento expone el agua a altos residuales de cloro, incrementando el potencial de formación de SPD; las altas temperaturas del agua pueden incrementar la formación de SPD dado que las reacciones químicas se aceleran con el incremento de la temperatura y, finalmente, el pH puede aumentarse en algunos tanques debido a la lixiviación de hidróxidos y carbonatos de superficies nuevas de concreto donde los tiempos de retención son altos, elevando el potencial de formación de THM.

4.1.1.3 Problemas microbiológicos

Los microorganismos pueden ingresar a un tanque de almacenamiento a través de la biopelícula de las redes de distribución, tuberías nuevas o reparadas, tratamiento de agua ineficiente, infiltración de agua en el tanque, conexiones cruzadas y debido a la desinfección inadecuada de los tanques. Otras fuentes las constituyen reservorios abiertos; coberturas de tanques mal diseñadas y/o construidas; juntas en techos y paredes y ventilaciones defectuosas, accesos y otras aberturas; así como la atmósfera, a través de la interfaz aire-agua de los tanques.

▪ **Recrecimiento bacteriano**

Según Hess y Hubbs (1990), citados por Kirmeyer et al. (1999), los factores ambientales que favorecen el crecimiento bacteriano en un SDA incluyen las variaciones temporales de la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes y minerales que promueven el crecimiento, la presencia de productos de corrosión del SDA, las prácticas de desinfección del SDA y la hidrodinámica del sistema (flujo y velocidad).

El crecimiento bacteriano es común en las superficies de los tanques y en las zonas de no circulación de éstos, conocido comúnmente como biopelícula. La presencia de ésta puede ser una preocupación con relación a la normatividad y puede contribuir al incremento de la demanda de cloro, creación de problemas de agua roja, disminución de la concentración de oxígeno disuelto, protección de microorganismos patógenos contra el desinfectante, incremento de la corrosión en las estructuras, generación de olor y sabor en el agua, nitrificación y proliferación de macro invertebrados (EPA, 2002c; Martel et al., 2002), contribuyendo así al deterioro de la calidad del agua que llega al consumidor (Gauthier et al., 1998; EPA, 2002b). Los factores que favorecen el recrecimiento bacteriano son concentraciones bajas o nulas de desinfectante residual, niveles adecuados de nutrientes y aguas cálidas.

▪ **Nitrificación**

La nitrificación es un proceso microbiológico de dos pasos que incluye la conversión del amoníaco a nitritos y éstos a nitratos. La nitrificación puede presentarse en un SDA con una fuente natural de amoníaco o en aquellos en que se emplean las cloraminas como desinfectante (Kirmeyer et al., 1993; citados por Kirmeyer et al., 1999). Ciertas condiciones de calidad de agua y del sistema pueden conducir a la nitrificación en un SDA; en cuanto a las primeras se encuentran el pH, temperatura, residual de cloraminas, concentración de amoníaco, relación cloro:cloraminas y concentración de compuestos orgánicos. Respecto a las segundas, factores importantes del sistema incluyen el tiempo de retención, operación y diseño del reservorio, presencia de sedimentos y tubérculos en tuberías, biopelícula y ausencia de luz solar.

La nitrificación en un SDA o en un sistema de almacenamiento puede tener varios impactos sobre la calidad del agua como degradación de la cloramina residual; consumo de oxígeno disuelto; decrecimiento ligero del pH; incremento significativo de bacterias heterotróficas; aumento de concentraciones de nitratos, nitritos y nitrógeno orgánico y decrecimiento de las concentraciones de amoníaco en el SDA. Concentraciones excesivas de nitratos y nitritos pueden causar sanciones por incumplimiento de la normatividad en agua potable debido a su asociación con la metahemoglobinemia.

Desde el punto de vista de los tanques de almacenamiento, entre los métodos para reducir la nitrificación se encuentran incrementar el flujo de agua a través del tanque para facilitar la reducción del tiempo de retención, promover la mezcla para evitar las zonas muertas y sacar el tanque de servicio para aplicar la cloración en el punto

de quiebre. Operacionalmente, el cambio de la relación cloro:amoniaco podría reducir la ocurrencia de nitrificación al reducir el amoniaco disponible.

▪ **Gusanos/Insectos**

Es posible que gusanos y/o insectos entren al SDA a través de un tanque de almacenamiento, conexiones cruzadas, zonas muertas o de sedimentos resuspendidos de las redes de distribución. Larvas de moscas, las cuales parecen gusanos pequeños, pueden entrar a un tanque que no esté equipado con trampas para insectos en ventilaciones y accesos y depositarse en los sedimentos acumulados en estas estructuras (Burlingame y Brock, 1985; citados por Kirmeyer et al., 1999).

4.2 DESINFECCIÓN

Al principio de la historia de los sistemas de abastecimiento de agua, el énfasis fue tener acceso a fuentes seguras; recientemente, el enfoque ha estado orientado hacia la aplicación de tratamientos más efectivos para reducir contaminantes microbiológicos. Actualmente, está creciendo el interés de proteger las fuentes de abastecimiento, aplicar procesos para producir agua segura y mejorar la integridad del SDA para que no se presente contaminación del agua desde la salida de las plantas hasta el consumidor final. En la potabilización del agua, la reducción de contaminantes microbiológicos se alcanza a través de su remoción e inactivación o desinfección, la cual puede ser primaria para inactivar los microorganismos y secundaria para asegurar un residual en el SDA (MWH, 2005).

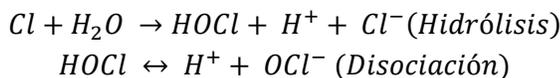
Actualmente, se usa el cloro libre como agente desinfectante en el agua para consumo humano, cloro combinado, ozono, dióxido de cloro y luz ultravioleta (MWH, 2005). Aunque existe variedad de desinfectantes, el cloro libre sigue siendo uno de los más usados por sus múltiples ventajas como la facilidad de uso, bajo costo, alto rango de efectividad y su efecto residual (Ruiz y Rojas, 2008). En este sentido, la Resolución 2115 de 2007 (expedida por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) establece una concentración mínima de cloro residual libre de 0,3 mg/L en cualquier punto del SDA y la WHO (2004) recomienda una concentración residual de cloro libre igual o superior a 0,5 mg/L después de un tiempo de contacto de mínimo 30 minutos para que la desinfección sea eficaz; esto con el fin de proteger el agua de una posible contaminación microbiológica, minimizar la presencia de biopelícula en el SDA y reducir el riesgo de eventos en salud derivados del consumo de agua (Al-Jasser, 2007).

De acuerdo con Ruiz y Rojas (2008), el cloro es una sustancia química relativamente inestable que reacciona con los constituyentes del agua, biopelícula e incrustaciones de los componentes de un SDA (Al-Jasser, 2007), lo cual conduce a un decaimiento gradual del cloro en el sistema y a la generación de SPD indeseables como los trihalometanos, resultado de su reacción con la materia orgánica natural.

4.2.1 Reacciones del cloro en el agua

4.2.1.1 Reacciones hidrolíticas

Cuando el cloro es adicionado al agua, se producen ácido hipocloroso (HOCl) e ión hipoclorito (OCl⁻), compuestos conocidos como cloro libre o cloro residual y se forman en dos etapas:



La proporción en que existe HOCl u OCl⁻ depende directamente del pH y tiene mucha importancia por cuanto el HOCl es un bactericida poderoso mientras que el ión hipoclorito es un agente desinfectante bastante pobre (Arboleda, 2000). Por esta razón, en las plantas de tratamiento se debe clorar el agua, asegurándose de que la especie que se forma en la hidrólisis sea el HOCl.

4.2.1.2 Reacciones de óxido-reducción

De acuerdo con Arboleda (2000), el cloro puede reaccionar con muchas de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua por ser un fuerte oxidante, en especial con los compuestos nitrogenados. Cuando ocurren reacciones con el nitrógeno amoniacal se forman las cloraminas (cloro combinado con poder desinfectante) y cuando ocurren con el nitrógeno orgánico u otras sustancias se forman otros compuestos clorados no utilizables como desinfectante. Estas reacciones ocurren muy lentamente por lo que pueden llegar a demorar días y hasta semanas, al contrario del nitrógeno amoniacal, el cual reacciona con el cloro con relativa rapidez (menos de una hora) (Arboleda, 2000).

4.2.2 Cinética del decaimiento del cloro en un SDA

El consumo de cloro residual en los SDA está influenciado por un gran número de factores tales como la reacción con sustancias orgánicas e inorgánicas, reacción con biopelícula adherida a las paredes de las tuberías, accesorios y tanques del SDA, corrosión, transporte de masa de cloro y otros reactivos entre el flujo y las paredes de la tubería (Ruiz y Rojas, 2008). De acuerdo con Zhang et al. (1992) y Kiéné et al. (1998), citados por Al-Jasser (2007), el consumo del cloro residual en el agua tratada puede clasificarse en dos etapas: i) reacciones del cloro con compuestos fácilmente oxidables en la primera hora o hasta las cuatro primeras horas (Jada-Hecart et al., 1992; citados por Al-Jasser, 2007) y ii) consumo del cloro a largo plazo, la cual es mucho más lenta que la primera y puede ser expresada generalmente como una reacción de primer orden de la siguiente manera (Wable et al., 1991; Biswas et al., 1993; Rossman et al., 1994; Kiéné et al., 1998. Citados por Al-Jasser, 2007):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

dC/dt: tasa de decaimiento del cloro (mg/L-día)

k: constante de decaimiento de primer orden

Al integrar la Ecuación 4.1 y establecer C igual a C₀ cuando t = 0, se usa la Ecuación 4.2 para describir la pérdida de cloro.

$$C = C_0 e^{-kt} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

C₀: concentración inicial de cloro (mg/L)

t: tiempo (días)

Según Rossman et al. (1995), citados por Ruiz y Rojas (2008), el coeficiente de decaimiento total de cloro en las tuberías se debe a la reacción simultánea tanto en las paredes de la tubería como en la masa de agua que es transportada por éstas. Bajo una cinética de primer orden, el coeficiente de reacción es la suma de los coeficientes de cada una de estas reacciones como se muestra en la Ecuación 4.3.

$$k = k_w + k_b \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

K_b : coeficiente de reacción en la masa de agua

K_w : coeficiente de reacción en las paredes de las tuberías

4.3 HIDRÁULICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA POTABLE

Con el fin de comprender las aproximaciones a la modelación, se requiere conocer los antecedentes sobre hidráulica de tanques, la cual se fundamenta en que la mezcla del agua en un tanque se genera por un chorro de entrada y está limitada por la estratificación dentro de éste (Lansey y Boulos, 2005).

4.3.1 Chorros turbulentos

Un chorro turbulento que entra a un tanque causará turbulencia y una mezcla en el agua almacenada. Una buena mezcla eliminará las áreas estancadas y los efectos de estratificación que puedan conducir a agua de pobre calidad. Los chorros laminares tienen menos efecto en el tanque comparados con los turbulentos además que la mezcla lateral al chorro será mínima. Por lo tanto, es deseable tener un chorro totalmente turbulento para proveer un adecuado momento y mezcla dentro del tanque. Las condiciones de turbulencia para un chorro con velocidad V_j y diámetro de entrada D_j deberían mantenerse si el número de Reynolds del chorro es superior a 3000 ($\Re_j = V_j^* D_j/\nu$) (Grayman et al., 2004).

4.3.2 Estratificación térmica

Teniendo en cuenta que la densidad del agua varía con la temperatura y que al interior de un tanque puede ocurrir enfriamiento y/o calentamiento del agua, el agua almacenada puede estar a temperaturas diferentes a la del agua que entra. Un diferencial de temperatura puede causar fuerzas flotantes que pueden afectar negativamente la mezcla del agua. La flotabilidad negativa se presenta cuando el agua de entrada es más fría y más densa que el contenido del tanque y las fuerzas flotantes positivas se presentan en condiciones contrarias. El número adimensional de Froude (\mathfrak{F}_d) es la relación de fuerzas flotantes y provee una medida para valorar si se presentará estratificación. Dicho número se define por la Ecuación 4.4 (Lansey y Boulos, 2005).

$$\mathfrak{F}_d = \frac{V_j}{(g'D_j)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

\mathfrak{F}_d : número adimensional de Froude

V_j : velocidad del chorro

$g' = g|\rho_j - \rho_a|/\rho_a$; aceleración gravitacional

ρ_j : densidad del agua del chorro
 ρ_a : densidad del agua del ambiente del tanque
 D_j : diámetro de la tubería de entrada

Del laboratorio y otros experimentos, Rossman y Grayman (1999), citados por Lansey y Boulos (2005) han mostrado que las condiciones de mezcla se generarán en un tanque si:

$$\mathcal{F}_d > C_b \left(\frac{H_T}{D_j} \right) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

C_b : Coeficiente de estratificación de primer orden
 H_T : profundidad del agua en el tanque
 D_j : diámetro de la tubería de entrada

4.3.3 Tiempo de mezcla

Además de garantizar las condiciones hidráulicas adecuadas para la mezcla, el tiempo de llenado debe ser lo suficientemente largo para asegurar la mezcla del agua que entra y la que se encuentra en el tanque. Una vez el agua se mezcla, ésta permanecerá así pero si la mezcla es incompleta, se pueden formar bolsas de agua estancada. En ciclos posteriores, estas porciones de agua permanecerán probablemente aisladas y su calidad se deteriorará (Lansey y Boulos, 2005). De acuerdo con Rossman y Grayman (1999), el tiempo de mezcla debe ser menor al tiempo que duran los periodos de llenado y su cálculo se realiza con la ecuación de Okita y Oyama que incluye la influencia del nivel de agua sobre las condiciones de mezcla, como se nota en la Ecuación 4.6.

$$\tau_m = \frac{KH^{1/2}D^{3/2}}{M^{1/2}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:

τ_m : Tiempo de mezcla
 K : Constante que depende de la definición de mezcla completa
 H : Nivel de agua
 M : Flujo de momento en la entrada el cual se define en la Ecuación 4.7.

$$M = Qu \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

Q : Caudal de entrada
 u : Velocidad en la entrada

4.4 MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

4.4.1 Modelos a escala física

Los modelos a escala física han sido herramientas importantes durante muchos años en estudios de recursos hídricos y suministran, a un costo relativamente bajo, un mecanismo para estudiar las características de mezcla al interior de tanques (EPA, 2005). Antes del auge de los computadores, estos modelos sirvieron como el principal medio para simular el complejo fenómeno hidráulico. El término “modelo físico” se refiere a un modelo escalado geoméricamente que tiene un comportamiento similar al sistema a escala real y se construye para simular cualquier configuración de tanque o reservorio y para evaluar los impactos de cambios operativos y de su estructura interna (Lansey y Boulos, 2005).

Las dimensiones de los modelos físicos están basados sobre principios de similitud (geométricos, cinemáticos y dinámicos) para asegurar que el modelo represente exactamente la configuración, características y comportamiento (procesos físicos) del prototipo (Lansey y Boulos, 2005) y su tamaño puede variar en tamaño y complejidad desde un modelo de mesa a modelos de gran escala construidos en laboratorios especializados (EPA, 2005). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que nunca se alcanza una similitud total ya que los modelos físicos están sujetos a los efectos de la escala (Lansey y Boulos, 2005).

4.4.2 Modelos de sistemas

Las soluciones analíticas para el desarrollo de las ecuaciones básicas matemáticas que reflejan los principios físicos que controlan los cambios en las concentraciones en agua almacenada y de salida están limitadas a pocos casos teóricos específicos. Bajo patrones de flujo más generales y reales, es necesaria la simulación numérica (mediante formas algebraicas discretizadas) para entender la operación de un tanque. Programas de simulación de redes tratan a los tanques como cajas negras en los cuales las condiciones de mezcla son supuestas, pueden emplear representaciones alternativas del tanque como modelos de sistemas o compartimentos, los cuales también se refieren como modelos de “entrada y salida” (van der Walt, 2002; EPA, 2005). Según EPA (2005), los modelos de sistemas se basan en hacer varias suposiciones sobre la mezcla del agua al interior de los tanques incluyendo mezcla completa e instantánea, LIFO (last in-first out, por sus siglas en inglés), FIFO (first in-first out, por sus siglas en inglés) y múltiples compartimentos, como se describen en las siguientes secciones.

4.4.2.1 Reactores completamente mezclados – RCM

En este modelo se asume que toda el agua que entra al tanque se mezcla total e instantáneamente con el agua ya almacenada. Este es el modelo más sencillo y no requiere de ninguna configuración extra para lograr su funcionamiento (Lansey y Boulos, 2005).

4.4.2.2 Modelo de reactor flujo pistón LIFO (last in-first out)

Los tanques con un dispositivo simple de entrada y salida pueden presentar también características de flujo pistón donde las porciones de agua pueden distribuirse verticalmente en capas estratificadas. Bajo condiciones pobres de mezcla, el primer volumen de agua que entra al tanque asciende a medida que entra más agua; este proceso continúa desarrollando así una serie de capas. Cuando el agua abandona el tanque, los volúmenes de agua que se encuentran en los niveles más bajos (last in) son los primeros en salir (first out). Este patrón de flujo pistón se describe como sistema LIFO (Lansey y Boulos, 2005).

4.4.2.3 Modelo de reactor flujo pistón FIFO (first in-first out)

Si la mezcla no es significativa, los tanques pueden ser representados por sistemas de reactor flujo pistón con las porciones de agua que entran al tanque actuando como pulsos independientes y que no interactúan con otra porción de agua en el tanque, la cual es utilizada comúnmente para modelar el flujo en tuberías. Cuando la entrada y salida están localizadas en lados opuestos del tanque, la representación FIFO es el modelo de flujo pistón más apropiado (Lansey y Boulos, 2005). En esta configuración para un tanque, el agua se mueve en pulsos y la primera porción de agua que entra al tanque (first in) es la primera en abandonar éste (first out) en el lado opuesto de la entrada al tanque. La variación del agua dentro de cada pulso puede asumirse lineal o ser tratada como una mezcla uniforme del agua que entra al tanque durante el pulso (Lansey y Boulos, 2005).

4.4.2.4 Modelo de dos compartimentos en el tanque

Un RCM es probablemente el modelo de mezcla más ampliamente usado para SDA. Sin embargo, estudios de campo han mostrado que esta configuración no es la más apropiada (Grayman y Clark, 1993; Kennedy et al., 1993; Mau et al., 1995, 1996, 1998; Boulos et al., 1998; citados por Lansey y Boulos, 2005). Como ya se discutió anteriormente, el diseño del tanque o factores ambientales como la estratificación de la temperatura pueden generar dos o más zonas conocidas como compartimentos. El flujo puede entrar y dejar el tanque y sólo afectar parte de éste sin mezclarse con el agua que existía antes.

Para representar el fenómeno descrito anteriormente, puede emplearse un modelo de dos compartimentos, tratando cada uno como RCM independientes (ver Figura 4.1). En el periodo de llenado, el compartimento A recibe agua del sistema de distribución y se llena primero. Cuando éste se llena totalmente, el agua excedente pasa al compartimento B. Cuando el agua sale del tanque, deja el compartimento A. Simultáneamente, el agua deja el compartimento B para mantener el A lleno hasta que este último se vacíe. Además, el compartimento B recibe agua que ha sido almacenada por algún tiempo en el compartimento A, la cual es más vieja y tendrá menores concentraciones del elemento y luego dejará el tanque (Lansey y Boulos, 2005).

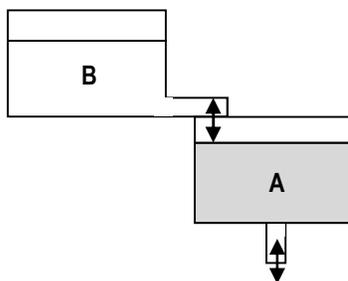


Figura 4.1. Representación de un modelo de dos compartimentos

4.4.2.5 Modelo de múltiples compartimentos en el tanque

La hidráulica de algunos tanques resulta en zonas muertas que no se mezclan con toda la masa de agua. Como se muestra en la Figura 4.2a, un amplio tanque circular puede tener una o más zonas muertas con entrada/salida opuestas. Similarmente, las zonas muertas pueden aparecer en la parte superior de un tanque comparable al primer pulso del agua que entra al agua (Figura 4.2b). En ambos casos, el flujo puede estar activamente mezclado cerca a la entrada/salida y parcialmente mezclado con el agua en el cuerpo principal del tanque; sin embargo, el intercambio con las zonas muertas es limitado. Para modelar estas zonas, Grayman y Clark (1993) y Grayman et al. (2000), citados por Lansey y Boulos (2005), propusieron una formulación numérica de tres compartimentos mientras que Mau

et al. (1995, 1998) y Boulos et al. (1996), citados por Lansey y Boulos (2005), derivaron expresiones analíticas más rigurosas para la misma configuración de tanque.

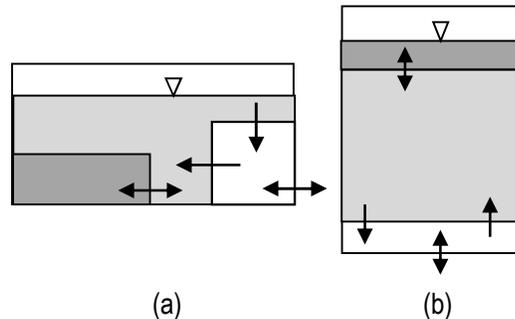


Figura 4.2. Representación de un modelo de múltiples compartimentos

Adicionalmente se han desarrollado modelos de tres o más compartimentos. Como ejemplos se tiene un compartimento B de volumen fijo en un modelo de tres compartimentos y compartimentos de entrada y salida separadas en un modelo de cuatro compartimentos (Grayman et al., 1996). En los modelos de sistemas se puede tener mayor complejidad con mayor flexibilidad al añadir más parámetros de modelación, pero que deben determinarse con un trabajo de campo más intenso.

4.4.3 Modelos hidrodinámicos

De acuerdo con EPA (2005), para describir la mezcla y el movimiento del agua y elementos dentro de un tanque se pueden utilizar modelos más complejos que los de sistemas. La CFD o modelación hidrodinámica posee gran exactitud en términos de la simulación hidráulica debido a que considera las fuerzas básicas y la energía del fluido que se mezcla, usando ecuaciones matemáticas para simular los patrones de flujo, transferencia de calor y reacciones químicas, conduciendo así a un problema matemático no lineal que requiere del cálculo en computador para su solución (Grayman et al., 1996). A partir de ecuaciones diferenciales parciales (EDP), este tipo de modelación divide un sistema de fluido en una malla o pequeños volúmenes discretos conocidos como elementos finitos para aproximarse a la geometría del tanque (EPA, 2005; Lansey y Boulos, 2005). Existen tres pasos básicos para representar un objeto físico en un modelo CFD: modelo matemático, representación numérica del modelo matemático y elección del método computacional para solucionar el modelo numérico (Grayman et al., 1999).

4.4.3.1 Modelo matemático

La CFD es una metodología basada en la modelación física del movimiento del fluido que parte desde los primeros principios. Cinco (5) EDP acopladas y no lineales describen las propiedades básicas de la conservación de la masa, el momento (en x , y y z) y la energía. Existe una variedad de métodos numéricos exitosos para resolver estos sistemas matemáticos. La aproximación más común es reescribir los principios de conservación mencionados previamente en términos de un sistema de EDP que se resuelvan simultáneamente. El método numérico debe ser estable, robusto y converger a soluciones que sean consistentes con la física aproximada a las ecuaciones matemáticas. Lo anterior no es una tarea simple y ha sido objeto de investigación con métodos numéricos sofisticados desde los años 60 (Grayman et al., 1999).

4.4.3.2 Representación numérica del modelo matemático

Según Grayman et al. (1999), la formulación matemática de los movimientos de un fluido puede transformarse en una representación numérica de diferentes maneras. Los métodos estándar implementados en programas comerciales emplean las EDP en un conjunto de operaciones aritméticas aplicadas a una grilla o malla de nodos y elementos que se aproximan al volumen del fluido de interés.

Otras diferencias entre los algoritmos están relacionadas con el orden de la exactitud para aproximar los términos en las EDP, el cálculo de las soluciones en los centros del elemento opuesto a las interfaces entre éstos y métodos para reducir errores. Los métodos numéricos para CFD están en constante evolución; sobre los últimos 40 años, las mejoras realizadas en el propósito general de los algoritmos hacia solucionar las EDP en CFD han avanzado más que las realizadas sobre la velocidad del hardware en el mismo periodo de tiempo (Grayman et al., 1999).

4.4.3.3 Método computacional para solucionar el modelo numérico

Actualmente el desarrollo de las técnicas computacionales y los programas para solucionar la formulación numérica del flujo de fluidos están disponibles para la generalidad de la comunidad, si bien la mayoría de programas son licenciados, existen algunos desarrollados como software libre. Los métodos varían de caso a caso, pero todos tienen el mismo objetivo general: reemplazar las derivadas de las ecuaciones integrales y diferenciales parciales de los principios físicos por formas algebraicas discretizadas que puedan ser resueltas (integrar el sistema de ecuaciones no lineales) consistentes con el conjunto apropiado de las condiciones de frontera. La mayoría de los programas realizan esta integración sobre una malla de elementos finitos o celdas. Las metodologías más utilizadas para este propósito se clasifican en dos grupos: métodos de elementos finitos y métodos de volúmenes finitos (Grayman et al., 1999).

Lansey y Boulos (2005) consideran que los modelos CFD pueden suministrar resultados muy exactos con pocos datos de campo y pueden aplicarse a todos los tipos de configuraciones, características y condiciones hidráulicas de tanques de almacenamiento. Para su aplicación se requieren datos importantes de entrada como geometría del tanque, características del agua de entrada, energía del agua que entra y factores internos tales como energía de entrada para las distribuciones de temperatura. Además, los requerimientos computacionales para los modelos CFD son mayores que para los modelos de sistemas, empleando tiempos de corrida del modelo de muchas horas, días o incluso semanas para casos de gran complejidad (EPA, 2005; Lansey y Boulos, 2005).

Sin embargo, cabe resaltar que los modelos de sistemas son limitados en cuanto a su inhabilidad para representar los patrones de flujo dentro de los tanques, siendo incapaces de asegurar altos niveles de exactitud. Dada la consideración explícita del momento y los balances de energía dentro del fluido que se mezcla, los modelos CFD simulan con mayor exactitud el comportamiento de la mezcla y la distribución de la concentración química dentro del tanque de almacenamiento. Ya que a los modelos CFD se incorporan representaciones detalladas del tanque, éstos permiten a los ingenieros mejorar nuevos diseños y elaborar planes de reestructuración para sistemas existentes (Lansey y Boulos, 2005). No obstante, de acuerdo con van der Walt (2002), no puede perderse de vista que los modelos CFD son una aproximación a la realidad como todos los demás modelos y, por lo tanto, están sujetos a ciertas limitaciones; tampoco son copias perfectas de la realidad por lo que requieren ser validados con datos de campo y, en el caso que no sea posible por las limitaciones físicas o financieras, estos modelos deberían compararse con otros similares.

4.5 ESTUDIOS EN CAMPO

Según Lansey y Boulos (2005), el muestreo en campo en conjunto con ensayos de trazadores pueden suministrar información de diagnóstico para agilizar el proceso de detección de problemas, evaluar su alcance, decidir entre posibles soluciones y evaluar la efectividad de diseños alternativos. El muestreo en campo de un sistema de almacenamiento puede orientarse para cuantificar cambios hidráulicos y de calidad de agua dentro y a la salida del tanque o reservorio. Para contar con datos útiles, los trazadores inyectados deben ser conservativos (inertes) tales como fluoruro, cloruro de calcio, cloruro de sodio y cloruro de litio; cuando éstos son utilizados en agua potable, debe tenerse especial cuidado para asegurar que no representen ningún efecto adverso sobre la salud humana y que no se incurra en violaciones de la normatividad respectiva (EPA, 2005).

Dicho muestreo puede ser invasivo (muestreo interior) o simplemente en la entrada y salida (muestreo exterior). El muestreo exterior puede suministrar información útil para estimar la distribución de la calidad de agua dentro del tanque. Por otra parte, el muestreo interior puede medir efectivamente y verificar la variabilidad de la calidad del agua (perfil tridimensional) a través del tanque. Con información distribuida espacialmente, pueden conocerse los complejos procesos físicos que ocurren durante la mezcla y pueden usarse para predecir mejor el comportamiento del sistema bajo condiciones diferentes. Los dos tipos de muestreo pueden combinarse para arrojar una representación exacta de las variaciones espaciales en el tiempo (Boulos et al., 1996). Además del diagnóstico, los datos recolectados pueden usarse para calibrar y validar modelos matemáticos del sistema de almacenamiento.

Las pruebas con trazadores pueden ser de dos tipos según la forma de dosificación: adición instantánea, en la que se aplica una concentración C_0 a la entrada de la unidad en un tiempo muy corto, el cual en teoría debe ser inferior a $1/30$ del tiempo teórico de detención y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua que se piensa analizar; y la adición continua, en la cual se inyecta una concentración de trazador C_0 continuamente a tasa constante, por un tiempo no menor de tres veces el periodo de detención teórico, y luego debe interrumpirse bruscamente la dosificación (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Una prueba de dosificación instantánea se realiza mediante la adición de una masa conocida de trazador en un tiempo, en teoría infinitamente pequeño en la entrada al reactor y el control a la salida del reactor se inicia al mismo tiempo que la adición del trazador. Los resultados son un conjunto de puntos de datos (tiempo y concentración de trazador en el efluente) que, representado en una gráfica bidimensional, se obtiene una curva conocida como curva de trazador (curva C). Con el fin de facilitar las comparaciones de una curva a otra, es útil normalizar los datos en términos de tiempos de concentración. Esta normalización es obtenida dividiendo tiempo observado (t) sobre el tiempo medio de residencia (\bar{t}) (\bar{t} es el mismo tiempo de retención hidráulico, T , cuando no hay zonas muertas y cortocircuito) (Teefy, 1996).

Una prueba de dosificación continua se efectúa mediante la inyección sostenida de un trazador químico en una dosis constante (C_0) a la entrada del reactor y el control a la salida se inicia también cuando comienza la adición de trazador. Al final de la prueba se obtienen puntos de datos (tiempo y concentración del trazador al efluente) que se normalizan dividiendo los tiempos observados (t) el tiempo medio de residencia (\bar{t}) y las concentraciones observadas (C_s) por C_0 . La gráfica obtenida de estas relaciones se refiere comúnmente a una curva F, la cual también podría obtenerse mediante la integración de la curva C. En teoría, la información obtenida de ambos tipos de pruebas de trazadores es idéntica; sin embargo, en la realidad podrían ser diferentes (Teefy, 1996).

Cabe destacar que este tipo de pruebas en tanques de compensación presenta diversas variaciones respecto a aquellas realizadas en reactores con entrada y salida independientes y/o de caudal de constante. De acuerdo con Grayman et al. (1999), las soluciones de sal no deberían añadirse tan rápido dada su alta gravedad específica y su tendencia a formar gradientes de densidad y por lo tanto, no mezclarse adecuadamente. Por esta razón, el método de adición continua es recomendado cuando se utilizan sales como trazador. Adicionalmente, dado que los caudales de entrada a un tanque varían en el periodo de llenado, es necesario ajustar el caudal de inyección del trazador periódicamente (cada 15-30 min.) para mantener constante la concentración de entrada. Por otra parte, el trazador debería inyectarse durante uno o varios periodos de llenado, aunque la condición óptima es hacerlo durante todo un ciclo de llenado y las muestras deben colectarse en varios periodos de llenado y vaciado o hasta que el agua del tanque alcance la concentración base del trazador (Grayman et al., 1999).

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a mejorar el conocimiento del efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable almacenada en un tanque de compensación de la red baja de distribución de la ciudad de Cali.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar experimentalmente las condiciones hidráulicas y la variación espacio-temporal del cloro residual libre y temperatura al interior del tanque.
- Realizar una simulación numérica para determinar las condiciones hidráulicas y la variación espacio-temporal del cloro residual libre y temperatura al interior del tanque.
- Analizar los efectos de modificaciones físicas en la entrada del tanque sobre el comportamiento hidráulico y de calidad del agua potable a través de la simulación numérica.

6 METODOLOGÍA

Con en esta investigación se quiso conocer cuál es el efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua almacenada en el tanque de compensación Ciudad Jardín 2, perteneciente al sector Nápoles-Ciudad Jardín de la red baja de distribución de la ciudad de Cali, el cual despierta interés ya que está ubicado en el extremo sur del SDA de la ciudad, donde se presume que se existen las mayores edades del agua del sistema. Además, los antecedentes de este tanque permiten retomar resultados de investigaciones previas para fortalecer la información disponible sobre calidad de agua en los sistemas de almacenamiento. En la Figura 6.1 se presenta el esquema metodológico seguido en el estudio para información general y en las siguientes secciones se explica en detalle la metodología empleada para alcanzar el objetivo general.

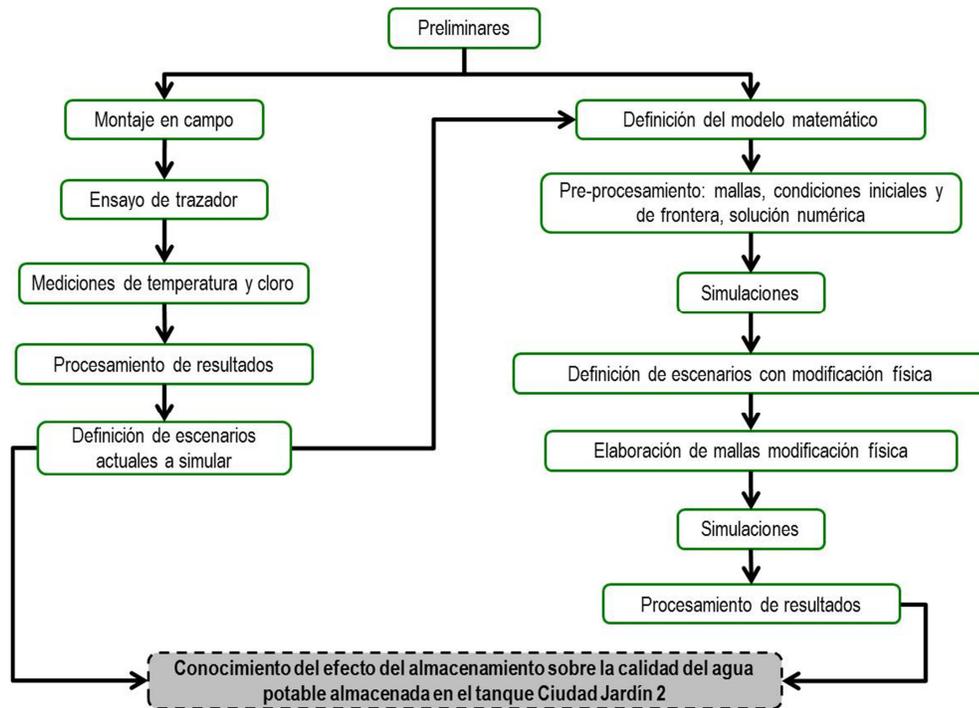


Figura 6.1. Esquema metodológico del estudio

6.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CALI

6.1.1 Aspectos generales

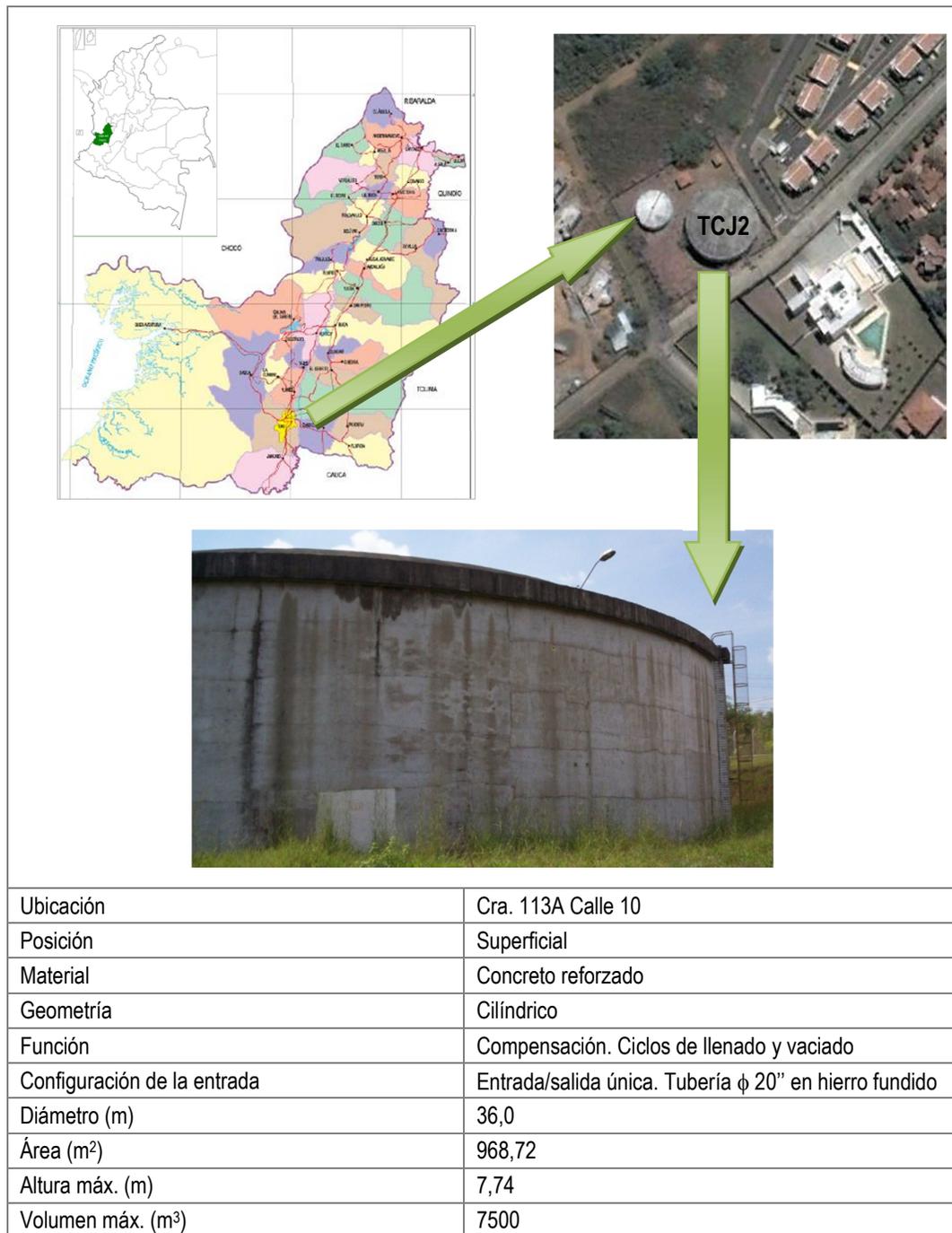
El sistema de abastecimiento de la ciudad de Cali se compone de cuatro fuentes superficiales (ríos Pance, Meléndez, Cali y Cauca) y cinco plantas de potabilización (La Ribera, La Reforma, Río Cali, Río Cauca y Puerto Mallarino), aplicando en todas cloro líquido o gaseoso como desinfectante. Estas plantas dan origen a cuatro subsistemas conocidos como red Pance, red Reforma, red Alta y red Baja, abastecidas por cada una de las plantas mencionadas anteriormente, respectivamente; la red Baja es abastecida por las plantas Río Cauca y Puerto Mallarino.

La red de distribución tiene una longitud total de 2.703 km, compuesta por un conjunto de tuberías de diámetros entre 25,4 y 1.422 mm y diferentes materiales de tubería (hierro fundido, asbesto cemento, acero, CCP, PVC, PAD, hierro dúctil y hierro galvanizado). Adicionalmente, el SDA se constituye por 34 tanques de almacenamiento de los cuales 12 tienen la función de compensar presiones en la red de distribución y 9 estaciones de bombeo, de las cuales dos funcionan solamente en época de estiaje de los ríos Cali o Meléndez (EMCALI EICE ESP, 2006).

6.1.2 Sistema de compensación Ciudad Jardín

Este sistema se destaca por estar ubicado en el extremo sur de la red, el cual cuenta con dos tanques de almacenamiento (1 y 2), de concreto (paredes y cubierta) y volúmenes de 1000 y 7500 m³, respectivamente. También hay una estación de bombeo que impulsa el agua desde el tanque 2 (TCJ2) hacia un tanque de acero inoxidable y volumen igual a 900 m³.

En la Figura 6.2 se presenta la descripción de TCJ2, el cual pertenece a la zona piloto Nápoles-Ciudad Jardín, se abastece con agua tratada de las plantas Río Cauca y Puerto Mallarino, a través de la estación de bombeo Nápoles, mediante una tubería de hierro fundido de 20" de diámetro, la cual termina a ras del piso del tanque. También posee una tubería de salida de 16" de diámetro, en hierro dúctil, para la succión de la estación de bombeo. Dado que este tanque se encarga de compensar las presiones en el sector que abastece, éste presenta ciclos de llenado y vaciado a través de la tubería de 20", funcionando como entrada/salida. La duración de un ciclo de llenado varía entre 7 y 17 horas, mientras que la del vaciado fluctúa entre 4,75 y 16,75 horas.



Fuente: adaptada de EMCALI EICE ESP (2006) y Ruiz y Rojas (2008)

Figura 6.2. Localización y descripción de TCJ2

6.2 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

6.2.1 Montaje

Para realizar la evaluación experimental de TCJ2 se contó con dos bombas sumergibles ubicadas en el centro y perímetro del mismo (ver Figura 6.3). Desde la parte externa del tanque se controló manualmente el movimiento vertical de las bombas para la toma de muestras, a través de un sistema de guayas con carretes y contador de vueltas calibrado, que permitió conocer con precisión los puntos de toma de muestra. De esta manera, para un mismo tiempo, siempre existieron dos datos a la misma altura en la masa de agua. Así mismo, adyacentes a las bombas, se ubicaron dos termocuplas para medición de la temperatura del agua. En el exterior del tanque también se contó con un centro de operaciones donde se ubicaron los equipos e insumos para la medición y reporte de los datos de campo (ver Fotografía 6.1).

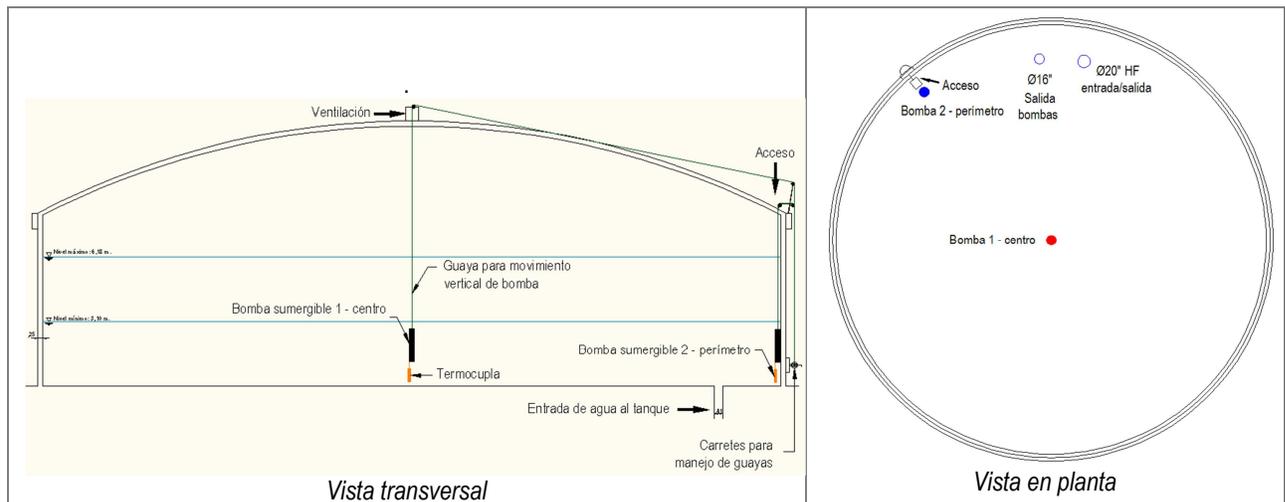


Figura 6.3. Esquema del montaje experimental en TCJ2



Fotografía 6.1. Montaje externo en TCJ2

6.2.2 Ensayo de trazador

6.2.2.1 Infraestructura externa del ensayo

Para el ensayo de trazador se utilizó el montaje experimental descrito previamente y adicionalmente se contó con dos recipientes de 250 L para la preparación, almacenamiento y succión de la solución trazadora (ver Figura 6.4). La

inyección se realizó a través de una bomba neumática que impulsó la solución desde el exterior del tanque hasta la tubería de entrada/salida de éste. El ensayo fue de tipo continuo, el trazador empleado fue cloruro de sodio, la variable de respuesta fue conductividad y la concentración de sodio se determinó a través de una curva de calibración construida en el laboratorio. En la Tabla 6.1 se detallan las características del ensayo.

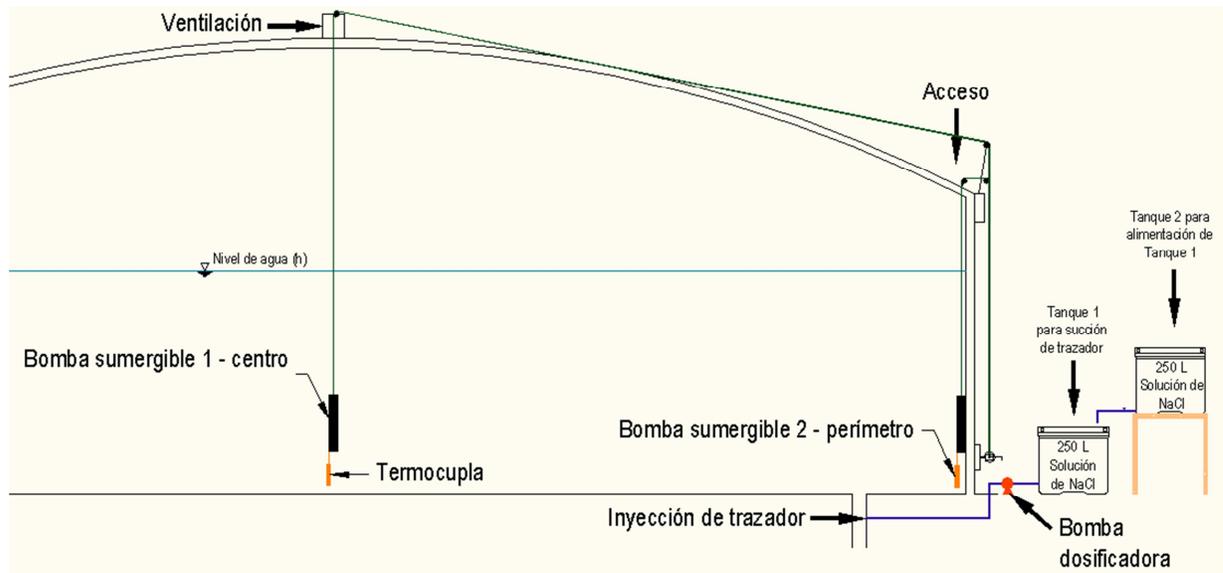


Figura 6.4. Esquema del montaje experimental para ensayo de trazador

Tabla 6.1. Condiciones de ensayo de trazador

Ítem	Descripción	Ítem	Descripción
Fecha del ensayo	22 de junio - 5 de julio de 2010	Tipo de ensayo	Continuo durante un ciclo de llenado: 11 horas
Trazador	Cloruro de sodio	Duración de la prueba	13 días (312 horas)
Masa de trazador añadida	550 Kg	Variable de respuesta	Conductividad
Bomba de inyección	Bomba neumática Wilden – Compresor de aire DeWalt	Curva de calibración	$Y = 0,4644X - 62,917$ Y: concentración de Na (mg/L) X: Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Equipo de medición	Conductímetro marca HACH hg30D flexi		

6.2.2.2 Puntos de muestreo

Como se observa en la Figura 6.5, las muestras internas se tomaron en 6 puntos tanto en centro como en perímetro y en el fondo, medio y superficie de acuerdo con el nivel de agua existente al momento de la toma de muestras. Ésta se iniciaba en el fondo del tanque y, posteriormente, se trasladaban las bombas sumergibles al medio y, por último, a superficie; luego se volvía al fondo, repitiendo el mismo procedimiento durante todo el trabajo de campo. Adicionalmente se tomaron muestras del agua que entra/sale del tanque y de la que es impulsada al tanque metálico; la primera se recolectó en la tubería de 20", a través del dispositivo instalado para medición en línea de cloro, turbiedad y pH existente en este sistema y la segunda en un grifo ubicado en la tubería de succión de las bombas (Figura 6.5a).

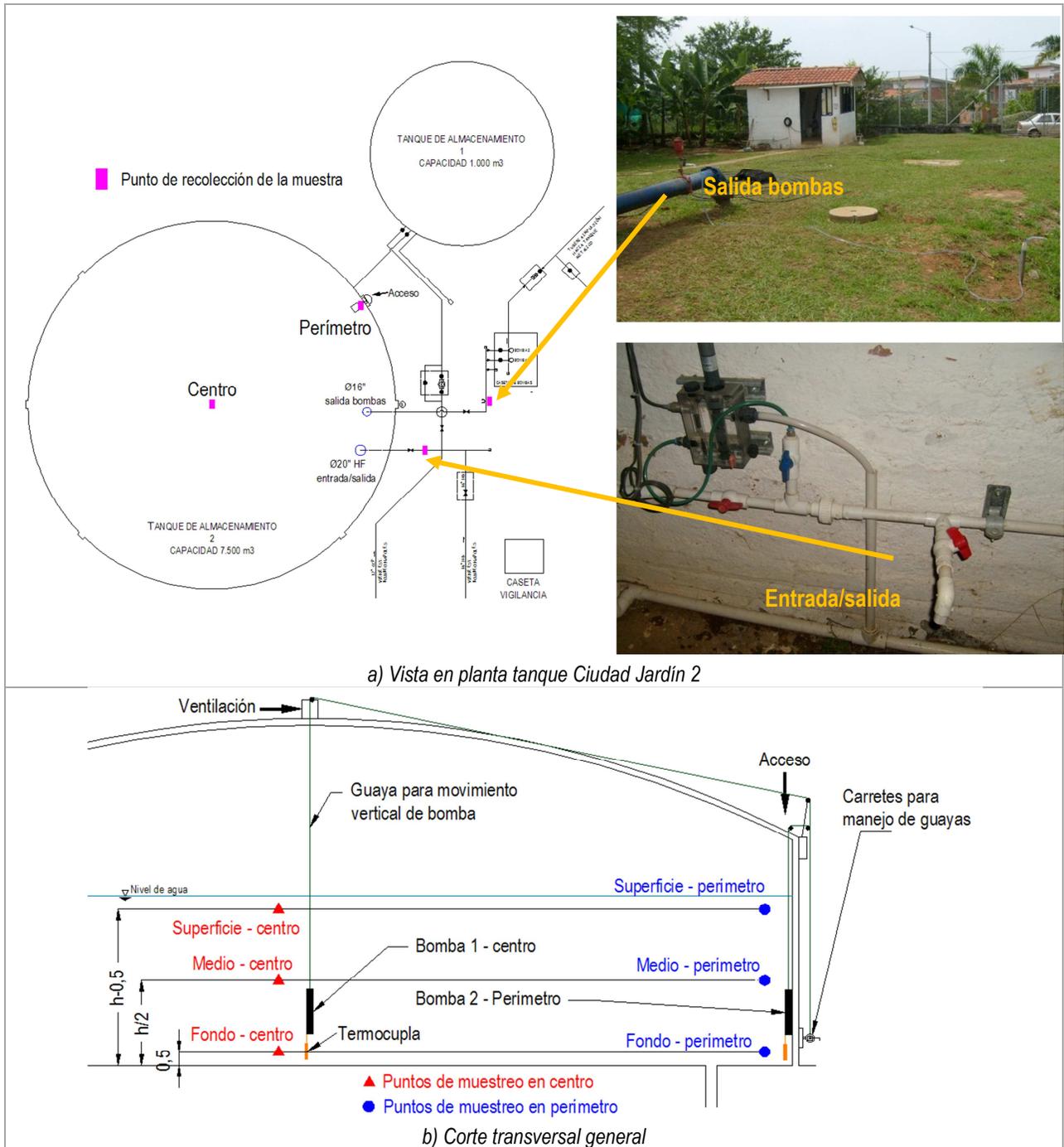


Figura 6.5. Puntos de toma de muestras en TCJ2

6.2.3 Medición de temperatura y cloro residual libre

La medición de temperatura y cloro residual libre se realizó durante 9 días que incluyeron 5 días hábiles y 4 de fin de semana, lo cual coincidió con el momento en el que el trazador había alcanzado la mezcla completa en el tanque. El cloro residual libre se midió con un colorímetro portátil marca HACH y la temperatura con dos termocuplas tipo J en bulbo de 3/16x15 cm y termómetro marca Fluke. El montaje y puntos de muestreo fueron los mismos ilustrados en la Figura 6.5b.

6.3 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A SIMULAR: CONDICIONES ACTUALES

Inicialmente se hizo una aproximación en 2D empleando el modelo VOF (Volume of Fluid) para representar la variación del nivel de agua a través del cambio del volumen de fluido a medida que la interfase aire-agua se desplazaba al interior del tanque durante el llenado del tanque; en la versión digital de este documento se adjunta un video de lo logrado en 2D (Anexo A). La aplicación del modelo VOF en el caso 3D no arrojó del todo los resultados esperados, principalmente en la definición de la interfase aire-agua y el paso temporal adecuado a usar, del tal manera que se optimizara el tiempo computacional requerido, razón por la cual las simulaciones CFD de patrón de flujo, mezcla de trazador y decaimiento del cloro residual libre se realizaron con niveles de agua constantes, planteando tres escenarios operativos, una vez se ejecutó la evaluación experimental (Tabla 6.2). Por lo anterior, no fue posible validar los resultados de la simulación numérica con los experimentales.

Tabla 6.2. Escenarios con condiciones actuales para simulación de TCJ2

Escenario	Valores de cada escenario		Flujo másico (Kg/s)	Velocidad media (m/s)	Flujo de momento (m ⁴ /s ²)	Tiempo teórico de retención (h)
	Nivel (m)	Caudal (m ³ /h)				
1. Nivel <u>máximo</u> de agua – caudal correspondiente.	6,60	569,84	158,00	0,78	0,12	11,22
2. Nivel <u>medio</u> de agua – caudal correspondiente.	4,97	598,33	165,90	0,82	0,14	8,05
3. Nivel <u>mínimo</u> de agua – caudal correspondiente.	3,71	14,68	4,07	0,02	8x10 ⁻⁵	244,82

6.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA

La simulación numérica del TCJ2 comprendió el patrón de flujo, mezcla de trazador y el decaimiento del cloro residual libre. En las siguientes secciones se describe el modelo matemático empleado, el pre-procesamiento, la solución numérica y el post-procesamiento.

6.4.1 Modelo matemático

En la modelación CFD del TCJ2 se empleó el código de Fluent 6.3 (Fluent Inc., 2006), el cual utiliza el método de volúmenes finitos para la solución de las ecuaciones empleadas, las cuales correspondieron a las de conservación de la masa, momento y energía. Esta última se empleó en el escenario 2, sin y con la flotabilidad para determinar la influencia de la temperatura sobre el patrón de flujo y la mezcla de trazador. Además, se incluyó el modelo estándar de turbulencia k-epsilon ($k-\epsilon$), la inyección de un trazador y el decaimiento del cloro residual libre. A continuación se presenta el modelo matemático empleado en cada uno y en el Anexo B se presentan la ecuación de conservación de energía y las condiciones de las simulaciones con temperatura.

6.4.1.1 Conservación de la masa

El primer término de la Ecuación 6.1 representa la tasa de cambio de masa en el elemento fluido y el segundo término representa la tasa neta de flujo másico al interior del elemento fluido (Versteeg and Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

u, v, w : componentes del vector velocidad del fluido

Para un fluido incompresible, su densidad es constante por lo que:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

6.4.1.2 Conservación del momento

La conservación del momento se refiere generalmente a la segunda ley de Newton. El primer término de las Ecuaciones 6.2a, b y c (componentes en x, y y z) representa la tasa de incremento de momento de una partícula fluida y el segundo término representa la suma de fuerzas que actúan sobre dicha partícula (Versteeg and Malalasekera, 1995).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad \text{Ecuación 6.2a}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad \text{Ecuación 6.2b}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad \text{Ecuación 6.2c}$$

Donde:

p : presión – tensión normal

τ : esfuerzo viscoso

S_M : término fuente debido solamente a contribuciones de fuerzas del cuerpo

6.4.1.3 Modelo estándar de turbulencia k-ε

El modelo estándar de turbulencia k-ε es uno de los modelos completos más simples y se compone de dos ecuaciones de transporte, cuya solución por separado permite determinar la velocidad turbulenta y las escalas de longitud, independientemente. Desde que fue propuesto por Launder y Spalding (1979; citados por Fluent Inc., 2006), este modelo ha sido el más usado comúnmente en la práctica de ingeniería relacionada con los fluidos, debido a su robustez, economía y exactitud razonable para un amplio rango de flujos turbulentos.

k-ε es un modelo semi-empírico basado en el modelo de ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε). El modelo de ecuación de transporte para k es derivado de la ecuación exacta, mientras que el de ε se obtuvo usando razonamiento físico. En la derivación del modelo k-ε, el supuesto es que el flujo es totalmente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Por lo tanto, este modelo es válido sólo para flujos totalmente turbulentos (Fluent Inc., 2006). k y ε se obtienen de las siguientes ecuaciones de transporte (Tu et al., 2008):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P - D$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{P} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} D)$$

$$P = 2v_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + v_T \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2$$

Donde:

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$: Constantes ($C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$)

σ_k y σ_ε : Números de Prandtl para k y ε , respectivamente ($\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$)

La interpretación física de este modelo es que la tasa de cambio y el transporte advectivo de k o ε es igual al transporte difusivo combinado con la tasa de producción y destrucción de k o ε (Fluent Inc., 2006).

6.4.1.4 Transporte escalar

La concentración del trazador y el decaimiento del cloro residual libre se obtuvieron al solucionar la siguiente ecuación generalizada del transporte escalar:

$$\frac{d}{dt}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho U_c - (T_c + T_{c,t}) \nabla c) = S_c$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

U : velocidad del fluido

c : fracción de masa de la sustancia

T_c : coeficiente de difusión de la sustancia ($T_c = \rho D_c$, D_c : difusividad de la sustancia)

$T_{c,t}$: difusividad turbulenta de la sustancia

S_c : término fuente (igual a cero para el trazador)

Para el caso del transporte de masa del trazador, el término fuente es igual a cero ($S_c = 0$) ya que no hay generación ni pérdida de éste (sustancia conservativa). Por otra parte y como se discutió previamente, el cloro residual libre en el agua potable es una sustancia no conservativa, pues es un agente oxidante volátil que también reacciona con la materia orgánica e inorgánica presente en la masa de agua y en las paredes que la contienen. En este sentido, el término fuente para el decaimiento del cloro residual libre es igual a $-\rho_{\text{fluido}} * k * C$, el cual se incluyó al modelo a través de una UDF (User Defined Function), así como la difusividad turbulenta ya que no viene por defecto en Fluent 6.3. Esta propiedad es definida como la viscosidad dinámica turbulenta sobre el número de Schmidt y se empleó una difusividad del cloro en el agua de 14,4 Kg/m-s. La constante de decaimiento del cloro para TCJ2 fue igual a 0,00000247 s⁻¹, de acuerdo con lo encontrado por EMCALI EICE ESP y Universidad del Valle (2007).

6.4.2 Preprocesamiento

6.4.2.1 *Mallas computacionales*

En la Figura 6.6 se muestra la malla computacional típica empleada para simular los escenarios operativos actuales definidos en la evaluación experimental de cada tanque, la cual es de tipo hexaédrica y el número de elementos osciló entre 590.000 y 600.000. Cabe destacar que, dado que los tanques no operan con entrada y salida de agua simultánea, fue necesario definir una salida en la malla para mantener el nivel constante de agua, ubicándola en el fondo del tanque y cercana a la entrada para establecer una configuración lo más cercana posible a la realidad. La diferencia entre las mallas de los escenarios la constituyó la altura que representa cada nivel de agua simulado.

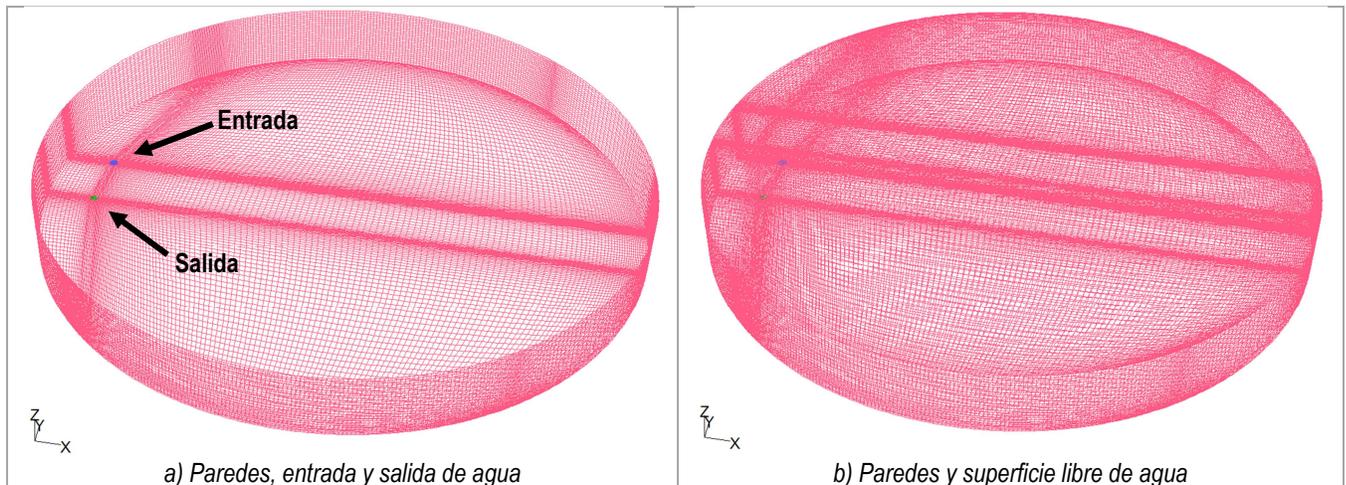


Figura 6.6. Malla computacional para simulaciones de condiciones actuales

6.4.2.2 *Verificación de la discretización espacial*

Para analizar el impacto del espaciamiento de la malla sobre la velocidad en la salida del tanque, se construyeron tres tamaños de malla (aproximadamente 200.000, 600.000 y 1'000.000 de elementos) que fueron simuladas en estado estacionario, de las cuales se seleccionó la del tamaño intermedio malla de acuerdo con el análisis estándar de verificación de independencia de la malla (Roache, 1998). El valor máximo de la velocidad a la salida estuvo en función del tamaño relativo de malla definido como $\Delta x / \Delta x_{\text{malla fina}}$ (Δx es el tamaño característico de la celda en la malla considerada), donde el valor 1 corresponde a la malla más fina considerada (alrededor de 1'000.000 elementos). En la Figura 6.7 se muestra el valor de la extrapolación de Richardson para el límite de número de nodos, tendiendo al infinito.

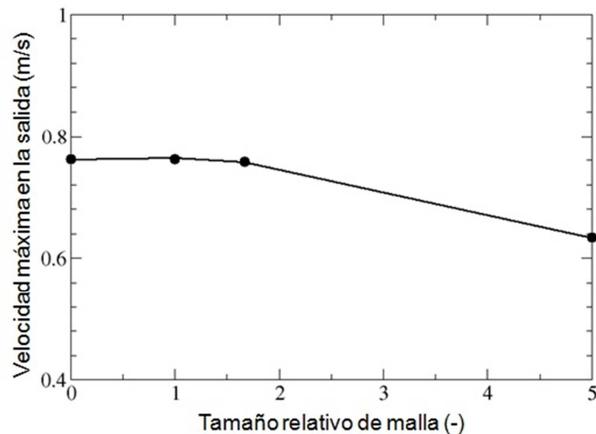


Figura 6.7. Variación de la variable objetivo (velocidad máxima a la salida) en función de la densidad de la malla

6.4.2.3 Condiciones iniciales y de frontera

La simulación numérica de los tanques estudiados se realizó con el programa para modelación CFD Fluent 6.3. El modelo de turbulencia es $k-\epsilon$ estándar y las velocidades en la entrada se calcularon desde esta frontera a través de la inicialización de las simulaciones. Las condiciones de frontera generales en todas las simulaciones realizadas se presentan en la Tabla 6.3 y las condiciones específicas para otras simulaciones se describen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.3. Condiciones de frontera en simulación numérica de TCJ2

Frontera	Condición
Entrada	Flujo másico. Vector en dirección Z
Salida	Presión igual a cero
Superficie de agua	Pared con cero esfuerzos constantes
Paredes	Pared

Tabla 6.4. Condiciones específicas de otras simulaciones de TCJ2

Simulación	Condición
Trazador	Escalar. Valor igual a 1 en la entrada durante la inyección e igual a 0 una vez finalizada la inyección. La duración de la inyección fue dos veces el tiempo de retención teórico para cada escenario.
Decaimiento del cloro residual libre	Concentración al interior del tanque: 0,92 mg/L. En la entrada se colocó cero para evaluar el tiempo en eliminar todo el cloro al interior del tanque.

A pesar de que el Ministerio de Desarrollo Económico (2000) sugiere que la duración de la inyección no debe ser menor a 3TRH y Teefy (1996) menciona que éste debe estar entre 3 y 5 veces el TRH teórico para ensayos de trazador a escala real en reactores con entrada y salida simultánea de fluido, las simulaciones de inyección de trazador se realizaron con 2TRH debido a los altos tiempos computacionales que dichas recomendaciones implican, especialmente en el escenario 3 que tiene el TRH más alto.

6.4.2.4 Solución numérica

Para el acoplamiento entre la velocidad y la presión se empleó el esquema SIMPLE y para la discretización del momento, turbulencia y escalar (trazador y cloro) se utilizó esquema de segundo orden.

6.4.3 Procesamiento

Las simulaciones numéricas se realizaron con el programa Fluent 6.3, en un computador con procesador AMD Phenom (tm) 9750 Quad-Core 2399 MHz, tarjeta de video NVIDIA GeForce 8100 / nForce 720a, memoria RAM de 3,3 GB y disco duro de 1 Tera y se empleó un paso temporal de 10 s para las simulaciones en estado transitorio (mezcla de trazador y decaimiento del cloro residual libre). Las corridas para determinar el patrón de flujo en cada escenario demoraron entre 2 y 3 días, las de mezcla de trazador entre 2 y 4 semanas y las de decaimiento del cloro entre 4 y 7 semanas. Los periodos más largos de las simulaciones en estado transitorio correspondieron a las del escenario 3 debido a que con menor caudal demoró más la inyección y salida del trazador y cloro.

6.4.4 Postprocesamiento

El postprocesamiento correspondió a la visualización de los resultados, para el caso del patrón de flujo, a través de las líneas de corriente, vectores, contornos de velocidad, construcción de isosuperficies de velocidad y superposición de dichas isosuperficies con las líneas de corriente. En el caso de la mezcla de trazador y decaimiento del cloro se monitorearon estas sustancias en los puntos de interés y se desplegaron los contornos respectivos.

6.5 SIMULACIÓN DE NUEVA CONFIGURACIÓN DE ENTRADA DE AGUA AL TANQUE

Teniendo en cuenta que la configuración física de un tanque y particularmente la de entrada y salida de agua juegan un papel importante en la mezcla del agua, en TCJ2 se evaluó un escenario que consistió en modificar la entrada de agua, cambiándola por cuatro boquillas de diámetro 6" para aumentar el momento, elevadas 50 cm sobre el fondo del tanque y distribuidas por cuadrantes, manteniendo las mismas condiciones de nivel y caudal de agua del escenario 1; las características del chorro en cada boquilla se presentan en la Tabla 6.5 y las condiciones iniciales y de frontera para este escenario fueron las mismas que para las condiciones actuales del tanque.

La elección de esta nueva configuración se basó en los resultados obtenidos por Tian y Roberts (2008), quienes evaluaron a través de ensayos de trazadores, 24 combinaciones de tanques (cilíndricos, esbeltos y rectangulares), construidos a escala, con diferentes configuraciones de la entrada. Sus resultados les permitieron definir que el empleo de cuatro boquillas verticales disminuyó su tiempo de mezcla en un 40%. En la Figura 6.8 se presenta el esquema de la configuración evaluada y la malla computacional correspondiente.

Tabla 6.5. Características de la simulación de TCJ2 con modificación de entrada de agua

Escenario	Valores de cada escenario		Flujo másico (Kg/s)	Velocidad media (m/s)	Flujo de momento (m ⁴ /s ²)	Tiempo teórico de retención (h)
	Nivel (m)	Caudal (m ³ /h)				
Nivel <u>máximo</u> de agua con <u>modificación</u> de la configuración de entrada de agua al tanque.	6,60	142,46 por boquilla	39,50 por boquilla	2,17 por boquilla	0,086 por boquilla	11,22

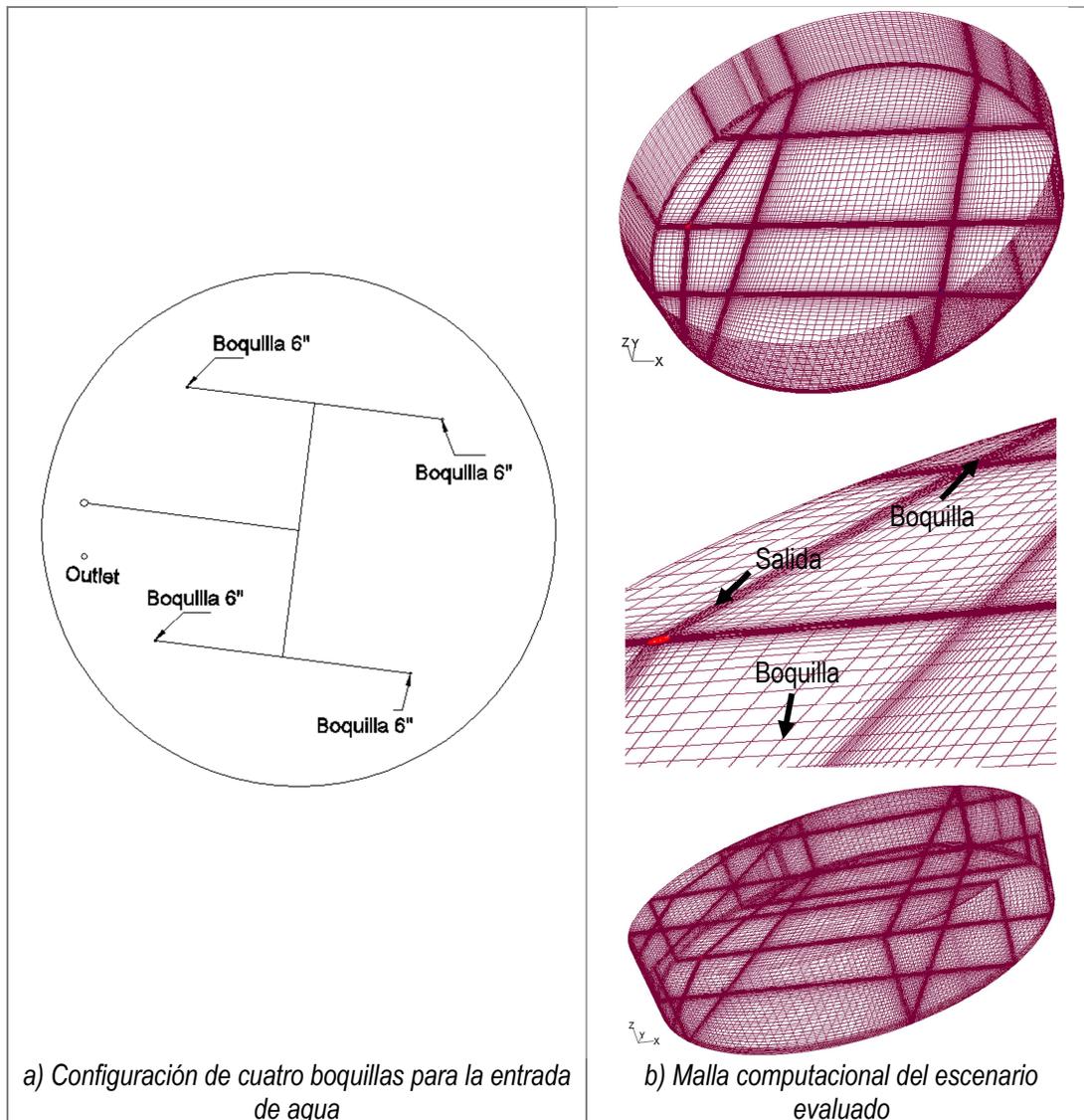


Figura 6.8. Descripción y malla computacional de la modificación de entrada de agua a TCJ2

6.6 PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

6.6.1 Tiempo de mezcla

A partir de los resultados del ensayo de trazador se determinó el momento en el que se alcanzó buena mezcla en el tanque a partir del cálculo del coeficiente de variación (CV), tal como lo propusieron Rossman y Grayman (1999) y considerando como criterio CV menores a 0,1 (Tian y Roberts, 2008), representando que el tiempo en el que se alcanza dicho valor no debe ser mayor a la duración de los periodos de llenado del tanque.

6.6.2 Diseño de experimentos

Para la evaluación experimental de los tanques se aplicó la metodología del diseño de experimentos ya que la estructura del trabajo de campo así lo permitió, además de cumplirse con los supuestos estadísticos requeridos por

esta técnica. El análisis de varianzas (ANOVA por sus siglas en inglés) es una prueba paramétrica que permitió establecer diferencias estadísticas en las variables cloro y temperatura, entre las posiciones radiales y profundidades del agua en el tanque, como se esquematiza en la Figura 6.9. Tales diferencias se identificaron por ciclos de llenado y vaciado de los tanques para distinguir el comportamiento del cloro residual libre y temperatura al interior del tanque bajo estas dos condiciones.

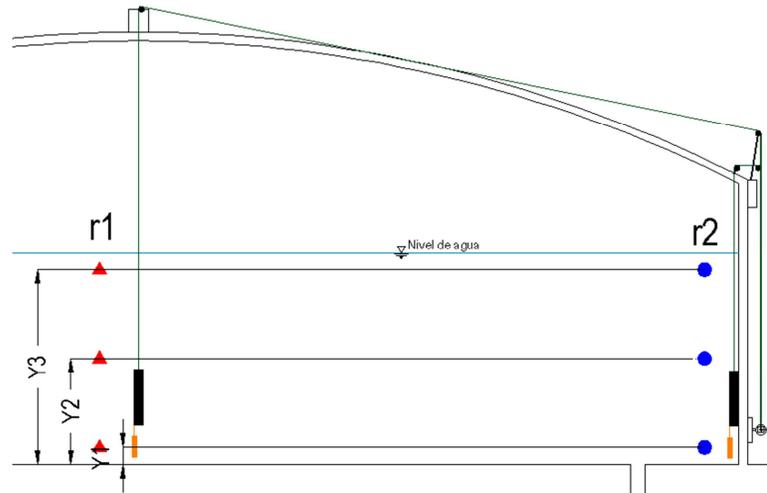


Figura 6.9. Esquema del experimento

El diseño del experimento se constituyó por:

Factores y niveles

Profundidad del agua en el tanque: Y1

Posición radial: r1 y r2

Tratamientos

r1 - Y1 r2 - Y1

VARIABLES DE RESPUESTA

Temperatura

Unidad experimental

Volumen de agua que pasa por cada punto de muestreo.

Modelo matemático

$$Y_{ijk} = \mu + Y_i + r_j + (Yxr)_{ij} + \beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : variable de respuesta

μ : media general de la variable de respuesta

Y_i : efecto del i-ésimo nivel del factor profundidad del agua en el tanque
Y1

r_j : efecto del j-ésimo nivel del factor posición radial
r1, r2

$(Yxr)_{ij}$: efecto de la interacción entre profundidad del agua en el tanque y posición radial

β_{ij} : efecto del bloque

ε_{ijk} : error experimental

▪ Pruebas de hipótesis sobre el efecto de los factores

Las inferencias sobre los efectos de factores individuales dependen de la presencia o ausencia de interacción. Primero se determina la significancia de la interacción antes de establecer cualquier significancia para los efectos principales de los factores.

Hipótesis nula para la interacción:

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = \mu_{ij} - \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j + \bar{\mu} = 0$$

El efecto debido a la interacción entre los factores profundidad de agua en el tanque y posición radial no es significativo.

Hipótesis nula para el efecto del factor profundidad de agua en el tanque:

$$H_0: \bar{\mu}_{1.} = \bar{\mu}_{2.} = \bar{\mu}_{a.}$$

El efecto debido al factor profundidad de agua en el tanque no es significativo.

Hipótesis nula para el efecto del factor posición radial:

$$H_0: \bar{\mu}_{.1} = \bar{\mu}_{.2} = \bar{\mu}_{.b}$$

El efecto debido al factor posición radial no es significativo.

Una vez definido si existieron diferencias entre los tratamientos, se procedió a aplicar la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar entre cuáles se presentaron las diferencias. Para aquellos modelos de análisis de varianza que no cumplieron los supuestos de normalidad y/o homogeneidad de varianzas, fue necesario aplicar una prueba de aleatorización (análisis de varianza no paramétrico) con el fin de determinar diferencias entre los tratamientos. En la Tabla 6.6 se explica cuál tipo de análisis de varianza se aplicó en cada modelo y en el Anexo C se incluyen la validación de los supuestos.

Tabla 6.6. Tipos de análisis de varianza aplicados en cada modelo

Modelo	Cloro	Temperatura
Periodo de llenado	Prueba no paramétrica (prueba de aleatorización)	Prueba paramétrica (ANOVA)
Periodo de vaciado	Prueba paramétrica (ANOVA)	Prueba no paramétrica (prueba de aleatorización)

6.6.3 Intercambio de agua y estratificación térmica

Para los resultados obtenidos sobre la variación del nivel de agua y temperatura en TCJ2, se aplicaron los conceptos desarrollados por Rossman y Grayman (1999) sobre intercambio de agua y estratificación térmica, los cuales establecen que, en el primer caso, el porcentaje de intercambio de agua mínimo que debe presentarse para alcanzar buena mezcla, en función del volumen de agua al inicio de los ciclos de llenado, nuevo volumen que entra y diámetro de tubería de entrada (Ecuación 6.3) debe ser menor a la duración de los ciclos de llenado. En el segundo caso, ellos definieron una expresión para calcular el diferencial de temperatura crítico necesario para causar estratificación térmica, para un rango de temperatura del agua entre 10-30 °C (Ecuación 6.4).

$$\frac{\Delta V}{V} > \frac{9d}{V^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

ΔV : Nuevo volumen de agua que entra al tanque durante el ciclo de llenado

V: volumen de agua al inicio del ciclo de llenado

d: diámetro de tubería de entrada al tanque

$$|\Delta T| < \left(\frac{9,371}{gC^2} \right) \left(\frac{Q^2}{H^2 d^3} \right) \quad \text{Ecuación 6.4}$$

Donde:

ΔT : diferencia de temperatura entre el agua almacenada y la que entra

g: aceleración de la gravedad

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

Q: caudal de entrada

H: nivel de agua

d: diámetro de tubería de entrada al tanque

6.6.4 Tiempo medio de retención simulado

Con los datos de trazador en la salida de TCJ2 obtenidos a partir de la simulación CFD, se elaboró la curva de distribución de tiempos de residencia acumulada $F(t)$ para cada uno de los escenarios simulados (actuales y con modificación de entrada), tanto en la inyección (curva ascendente) como una vez finalizada ésta (curva descendente). Para el desarrollo de la curva $F(t)$ correspondiente a los datos obtenidos finalizada la inyección se restó a la unidad el valor de cada concentración y, con base en ésta se determinó el tiempo medio de retención simulado (TRH_{sim}), a partir del cálculo del área bajo de la curva $t^* E(t)$ (Ecuación 6.5).

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad \text{Ecuación 6.5}$$

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

7.1.1 Niveles y caudales

En la Figura 7.1 se presentan los niveles de agua y caudales de TCJ2, en la cual los caudales negativos representan los ciclos de vaciado del tanque. La curva de nivel muestra que los niveles al final de los ciclos de vaciado se encontraron entre 1,93 y 6 m y al final de los ciclos de llenado entre 4,44 y 7,62 m, destacándose que durante los primeros nueve días de mediciones se intercalaron día de por medio niveles mínimos altos (4,13 - 5,95 m) con niveles mínimos bajos (2,21 - 3,34 m). Posterior al día noveno, se repitieron niveles mínimos bajos (1,77 y 2,42 m) y los últimos dos días del estudio se presentaron niveles mínimos altos (4,35 y 4,71 m).

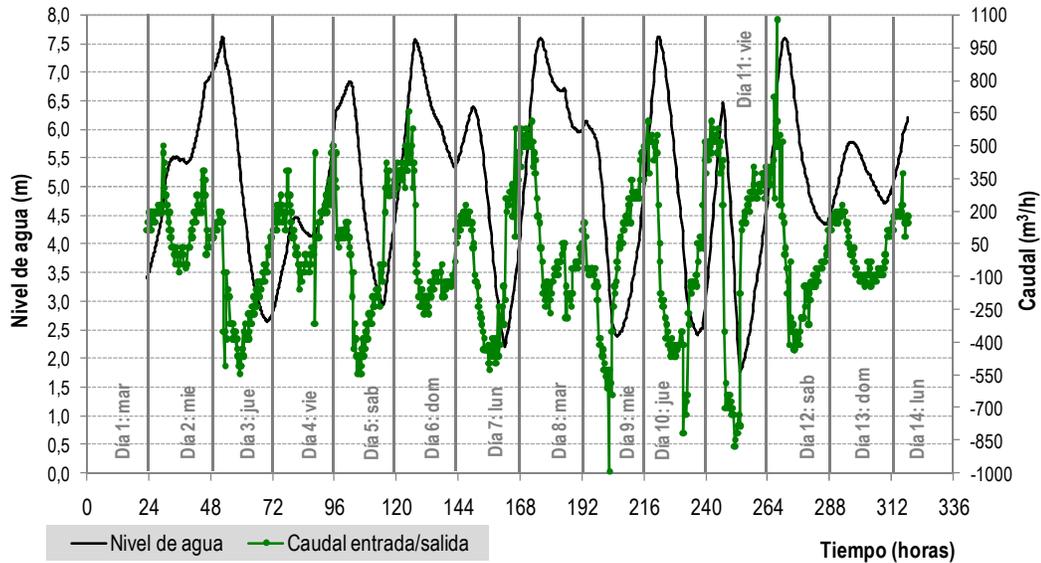


Figura 7.1. Variación de niveles y caudales en TCJ2

De la Figura 7.1 también se resalta que la duración de los ciclos operativos del tanque fue heterogénea, pues la duración de un ciclo de llenado varió entre 7 y 17 horas y la del vaciado entre 4,75 y 16,75 horas; durante los días domingo se presentaron menores consumos de agua que en otros días de la semana, situación que históricamente se ha dado debido al cambio de hábitos rutinarios de la población abastecida por este tanque. Lo anterior permite verificar lo establecido para la operación del tanque que considera mantenerlo lleno y sostener niveles mínimos altos, lo cual podría provocar altas edades del agua y aumento del decaimiento del cloro residual libre como se verá más adelante. Los valores de caudales están en concordancia con los niveles de agua medidos, pues cuando se presentaron los niveles más bajos se produjeron los caudales de salida más altos y viceversa. Durante los periodos de llenado, los caudales oscilaron entre 29,1 y 1075,3 m³/h, dando lugar a flujos de momento entre 3×10^{-4} y 0,44 m⁴/s² y durante los periodos de vaciado los caudales oscilaron entre 29,1 y 988,1 m³/h.

7.1.2 Ensayo de trazador

La Figura 7.2 muestra el comportamiento del trazador en los perfiles verticales de centro y perímetro, entrada/salida y salida hacia estación de bombeo en TCJ2.

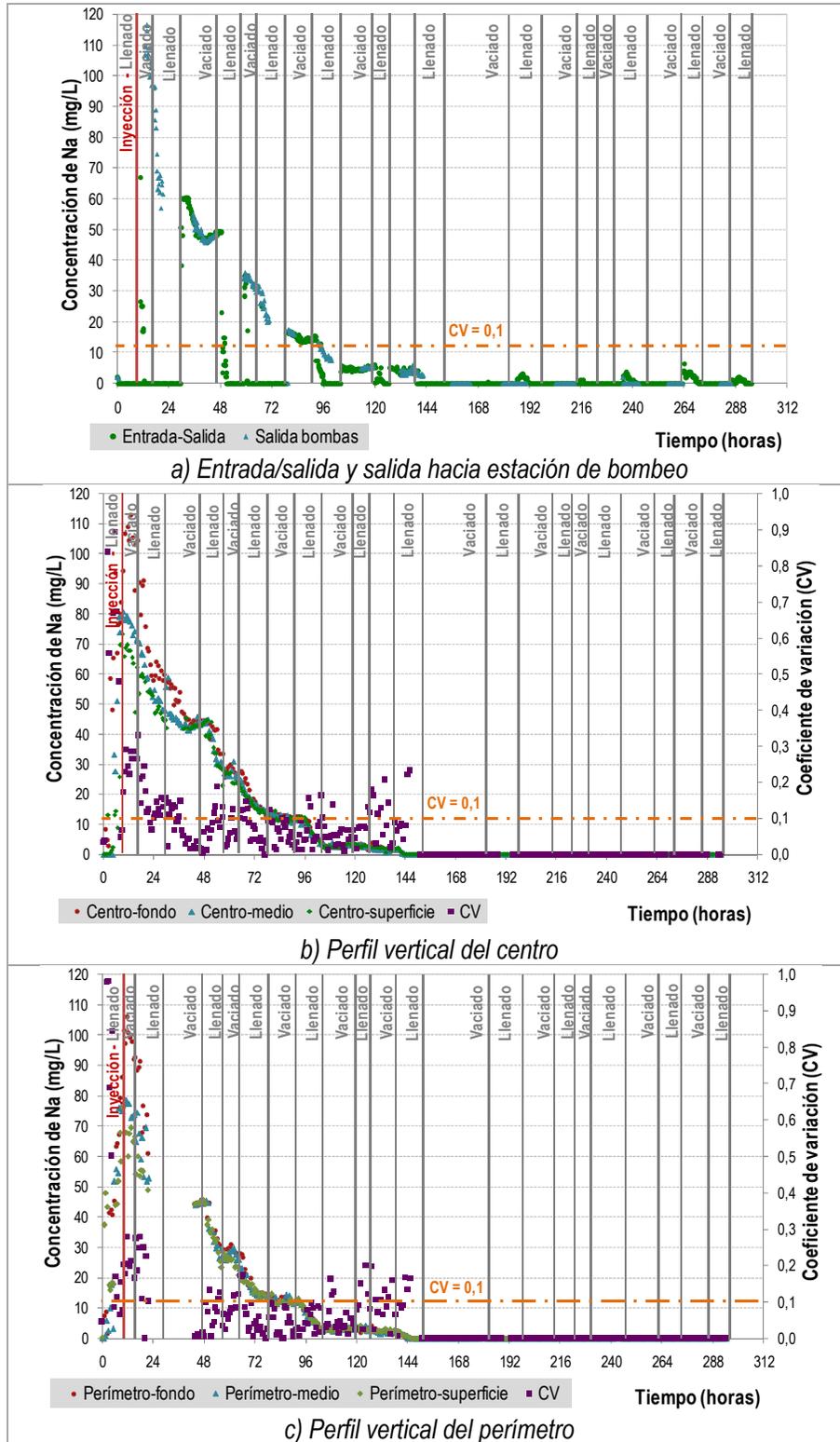


Figura 7.2. Comportamiento del trazador en TCJ2

De acuerdo con la Figura 7.2, el trazador llegó casi al mismo tiempo a las tres profundidades evaluadas tanto en centro como en perímetro. Adicionalmente, en ambos perfiles verticales se observa que durante las primeras 40,5 horas del ensayo, la concentración de trazador es mayor en el fondo, seguido por el medio y luego por la superficie,

evidenciando que el trazador se transporta de abajo hacia arriba durante este periodo de tiempo, lo cual podría estar asociado con la permanencia del agua fresca en el fondo del tanque y la más antigua en la superficie como se explicará más adelante. Luego de la hora 40,5, la mayoría de los CV son menores a 0,1, indicando buena mezcla, pero debe prestarse atención a la interpretación del tiempo de mezcla, pues este parámetro se calcula a partir de la ubicación arbitraria de los puntos de muestreo de trazador, el cual resulta en un valor particular que no sería igual para toda la masa de agua, tal como lo planteó Jayanti (2001)

La comparación del trazador entre centro y perímetro por profundidades de TCJ2 permitió establecer que no se observan diferencias entre estos puntos. Por otra parte, las mayores concentraciones de trazador se presentaron en la salida hacia la estación de bombeo (valor máximo: 123,82 mg/L), mientras que en la entrada/salida del tanque se presentó un valor máximo de 64,75 mg/L en el primer ciclo de vaciado, pero en los siguientes las concentraciones de trazador en ambas salidas de agua fueron similares. Lo anterior refleja que al interior del tanque se presentaron corrientes de flujo que podrían haber transportado el trazador en mayor o menor cantidad hacia ciertas zonas del tanque y luego de aproximadamente 35,25 horas, se alcanzó buena mezcla. El comportamiento del trazador al interior, en la salida hacia la estación de bombeo y en la entrada/salida del tanque muestra que éste salió totalmente de TCJ2 sobre las 133 horas (5,5 días).

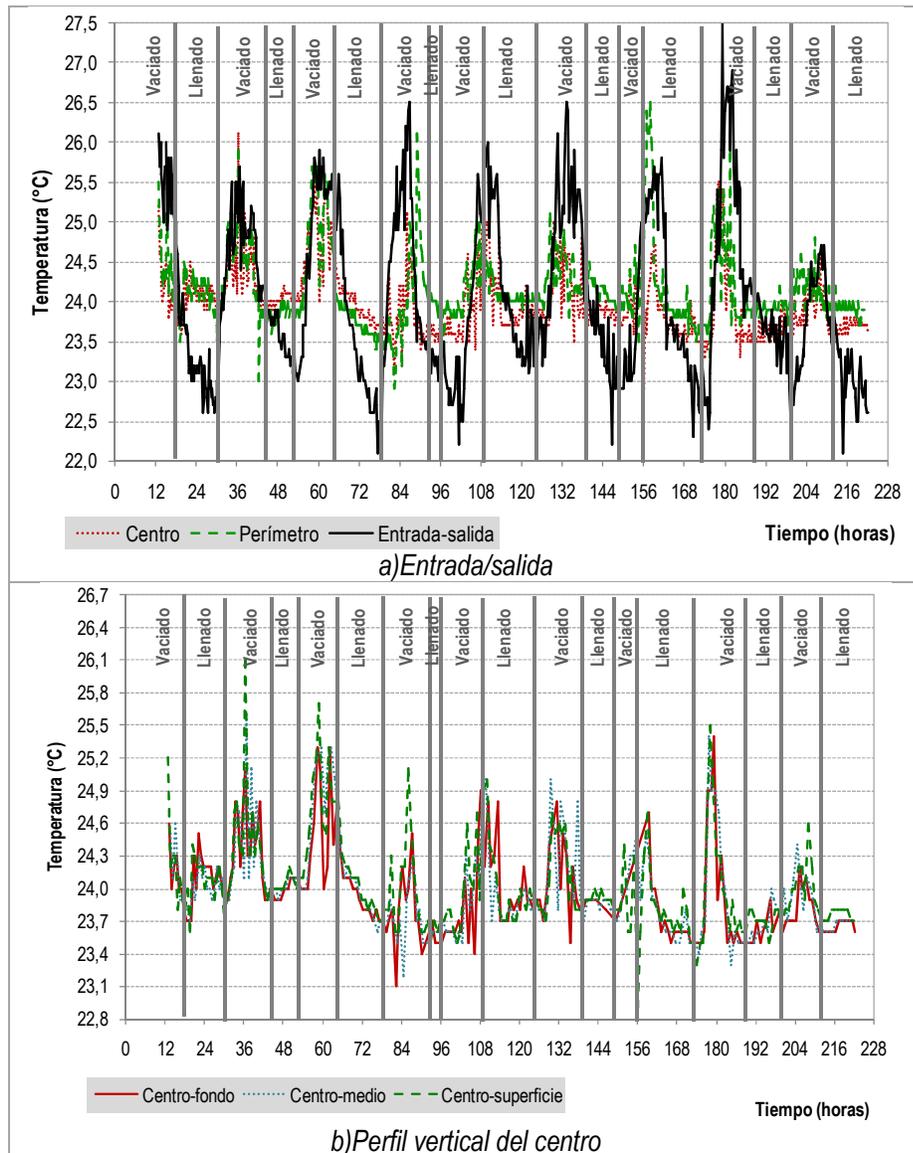
Teniendo en cuenta los desarrollos conceptuales de Rossman y Grayman (1999) sobre tiempos de mezcla e intercambio de agua (aplicables para el presente caso), se nota que este tanque presenta deficiencias en cuanto a su mezcla pues el tiempo en el que se alcanza buena mezcla ($CV < 0,1$) es mucho mayor que la duración de los ciclos de llenado (29,5 horas vs. 7-17 horas). Adicionalmente y como ya se preveía con el comportamiento de los niveles finales de los ciclos de llenado y vaciado, la operación del tanque no permite un intercambio de agua adecuado ya que éste varió durante el estudio de campo entre el 1 y 20%, mientras que lo requerido para asegurar condiciones de buena mezcla fue 25-38%.

Cabe destacar que, de acuerdo con las mediciones de trazador en la entrada/salida del tanque y como es de esperarse en este tipo de estructuras, se recircula en promedio un 15,7% del agua que entró en cada ciclo de llenado, lo cual representa que los altos tiempos de retención en éste también están asociados con el reingreso de una masa de agua que ha estado previamente almacenada en él. Es así como se hace necesario ajustar la operación de TCJ2 para mantener niveles más bajos de los actuales al final de los ciclos de vaciado, estos resultados concuerdan con el trabajo desarrollado por Ruiz y Rojas (2008) quienes también recomendaron cambiar los niveles operativos de este tanque; para solucionar el problema generado por presiones menores a 15 m.c.a en las zonas adyacentes, sugirieron instalar un tramo de tubería de 350 m y diámetro 6" para conectar el sistema abastecido por el tanque metálico con las zonas de baja presión.

7.1.3 Temperatura

La Figura 7.3 presenta la variación de la temperatura en centro, perímetro, entrada/salida y salida hacia estación de bombeo. Según los resultados de la Figura 7.3a, en general se nota que la variación de la temperatura en todos los puntos de muestreo (internos, entrada/salida) presenta un comportamiento cíclico, encontrándose diferencias entre los valores máximos y mínimos entre 2 y 5 °C; dichos valores coinciden con las horas del mediodía (máximos) y de la madrugada (mínimo), reflejando el efecto de la radiación solar sobre el calentamiento del agua durante su almacenamiento.

En esta figura también se nota que durante los ciclos de llenado, el agua que entra al tanque es más fría que la almacenada. La aplicación del análisis de estratificación térmica desarrollado por Rossman y Grayman (1999) muestra que TCJ2 presentó flotabilidad negativa durante la mayoría de los ciclos de llenado incluidos en la evaluación de este tanque; dicho análisis permitió identificar que los diferenciales de temperatura entre entrada e interior del tanque oscilaron entre 0,1 y 1,90 °C mientras que el diferencial máximo permitido para evitar la estratificación térmica varió entre 0 y 0,03 °C.



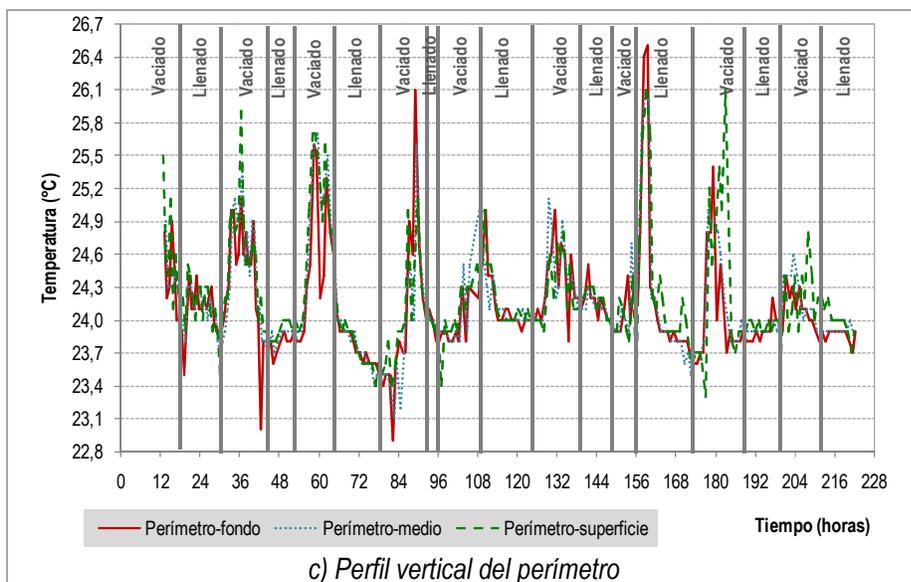


Figura 7.3. Variación de la temperatura en TCJ2

Lo anterior representa que el agua fresca que entra a TCJ2, por ser más fría, es más densa y permanece en el fondo del tanque mientras que la almacenada (de mayor edad) queda encima y, en el siguiente periodo de vaciado, saldría el agua que entró al final del periodo anterior, provocando que el agua de mayor edad se haga cada vez más antigua; lo anterior puede conllevar a problemas de calidad de agua relacionados con la pérdida del cloro residual. Dicha estratificación podría estar dominando el régimen de mezcla en TCJ2 ya que el ensayo de trazador indicó que las mayores concentraciones de éste se encontraron en el fondo, seguido por el medio y superficie, durante 40,5 horas. Lo anterior indica que la modelación de la red de distribución influenciada por TCJ2 podría incluir el modelo de sistemas LIFO para establecer la forma como este tanque afecta dicha red.

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

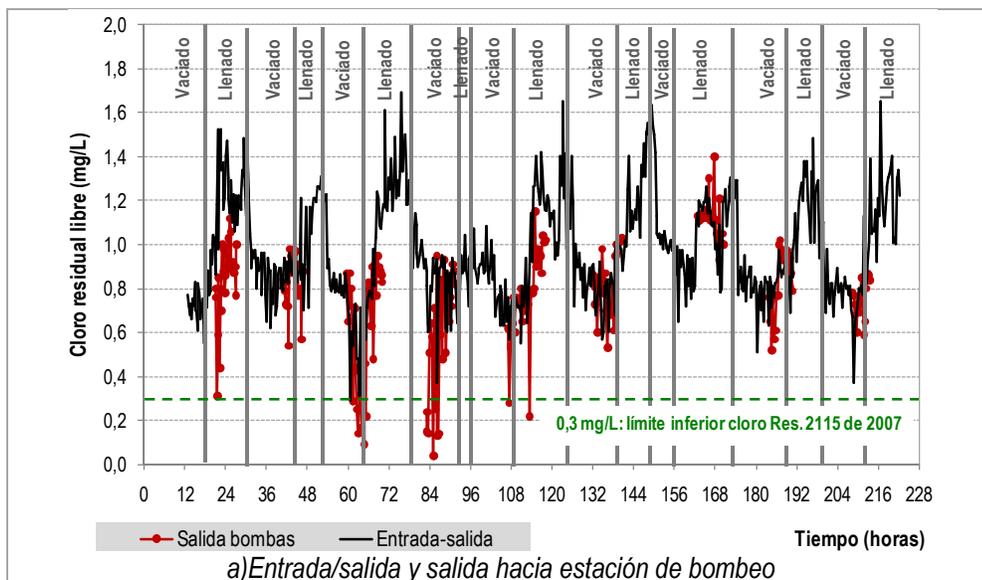
Se destaca que mientras estudios como el de Mahmood et al. (2005) encontraron amplia estratificación térmica en tres tanques con variaciones de temperatura entre un punto medio y la superficie libre entre 0,45 y 1,70 °C y que el de Chuo (2003) también estableció estratificación térmica por diferenciales verticales de temperatura entre 2 y 3 °C, para el caso de TCJ2 se identificó una estratificación puntual que se presenta en los periodos de llenado mientras se iguala la temperatura del agua que entra con la de la almacenada; en las Figuras 7.3b y c se nota que la temperatura en la superficie es ligeramente mayor que la de medio y fondo en dichos periodos.

7.1.4 Cloro residual libre

La Figura 7.4 presenta la variación del cloro residual libre en la entrada/salida, salida hacia la estación de bombeo y perfiles verticales en centro y perímetro de TCJ2. En general, el cloro residual libre en todos los puntos de muestreo

presentó el mismo comportamiento de los ciclos operativos del tanque, ya que el cloro se incrementa paulatinamente hasta llegar a un valor máximo, luego disminuye hasta un valor mínimo y se repite este ciclo hasta el final del estudio, mostrando el efecto del agua fresca en el ciclo de llenado. Es así como los valores bajos de cloro obtenidos en cada ciclo de llenado (Figura 7.4) se deben a la recirculación de agua que ocurre en los tanques de compensación como se describió en la sección 7.1.2. Las diferencias entre las concentraciones de cloro residual libre entre entrada y salida representan el decaimiento de éste en el almacenamiento, como es de esperarse ya que el cloro en el agua es una sustancia no conservativa. Lo anterior también se identificó en los trabajos de Gauthier et al. (2000) y Ecuru et al. (2010).

Tanto en los perfiles verticales como en las posiciones radiales no se observaron diferencias notorias entre la concentración de cloro de cada punto de muestreo. El análisis de varianza para el cloro mostró diferencias estadísticamente significativas entre algunos puntos de muestreo pero no se consideran relevantes desde el punto de vista práctico (alrededor de 0,1 mg/L; los resultados detallados se encuentran en el Anexo D). Se destaca que tanto en la entrada/salida como al interior del tanque no se obtuvieron valores de cloro residual menores a 0,3 mg/L (límite inferior para agua potable según la Resolución 2115 de 2007), exceptuando un dato de la posición perímetro-medio y en la salida del tanque (0,28 y 0,29 mg/L, respectivamente).



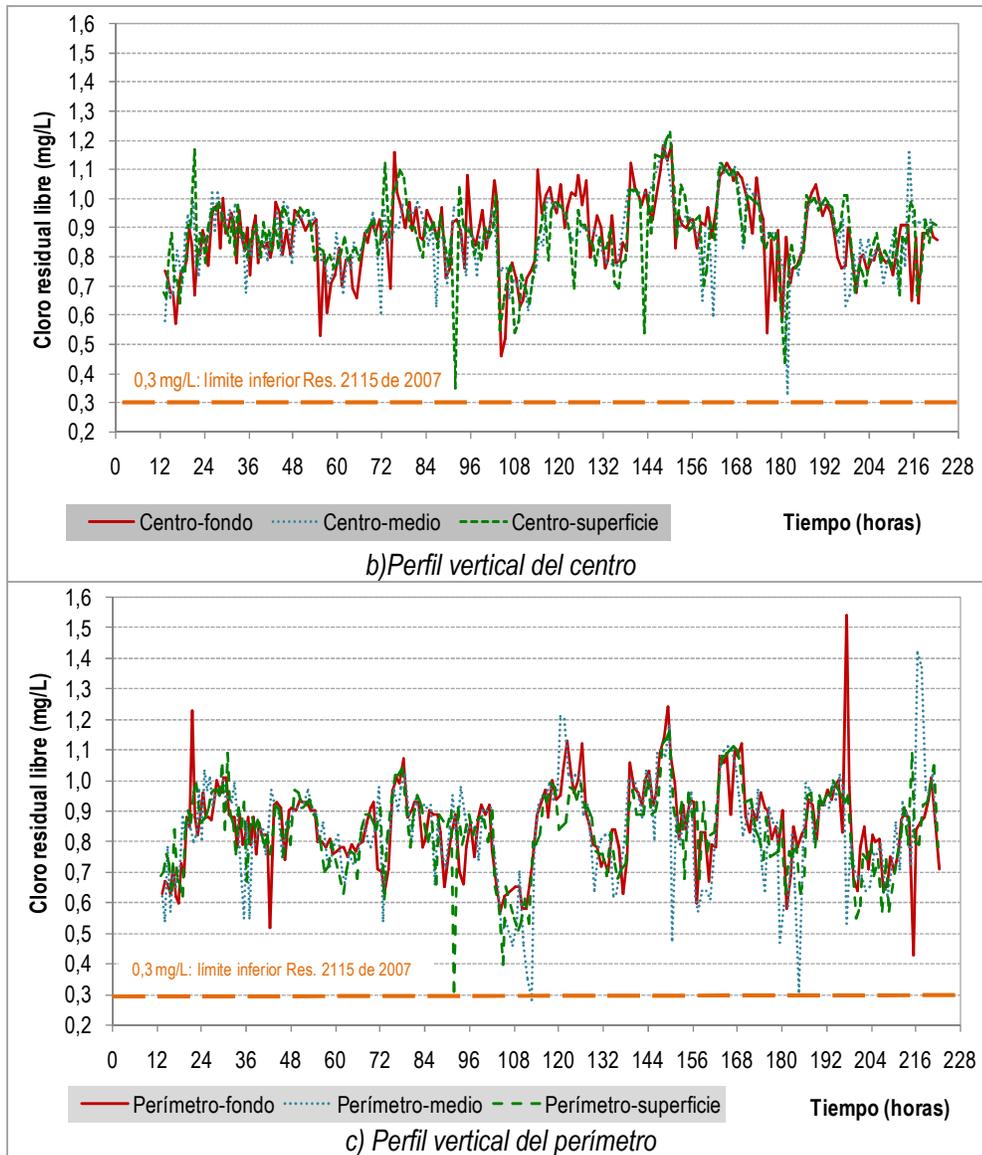


Figura 7.4. Variación del cloro residual libre en TCJ2

La EPA sugiere que el cloro residual libre debe ser al menos 0,2 mg/L, no menor a este valor durante más de 4 horas y no puede ser indetectable en más del 5% del total de muestras recolectadas en un mes (EPA, 2006). Dado que se identificaron 16 datos menores a 0,3 mg/L en la salida hacia la estación de bombeo (valor mínimo de 0,04 mg/L) durante los días 3 y 4 del estudio, posiblemente asociado a la evacuación por esta tubería de alguna zona de agua con alta edad del agua, deben tomarse medidas para prevenir el riesgo sanitario. En este sentido, EMCALI EICE ESP está instalando una estación de recloración en la impulsión de agua hacia el tanque metálico.

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

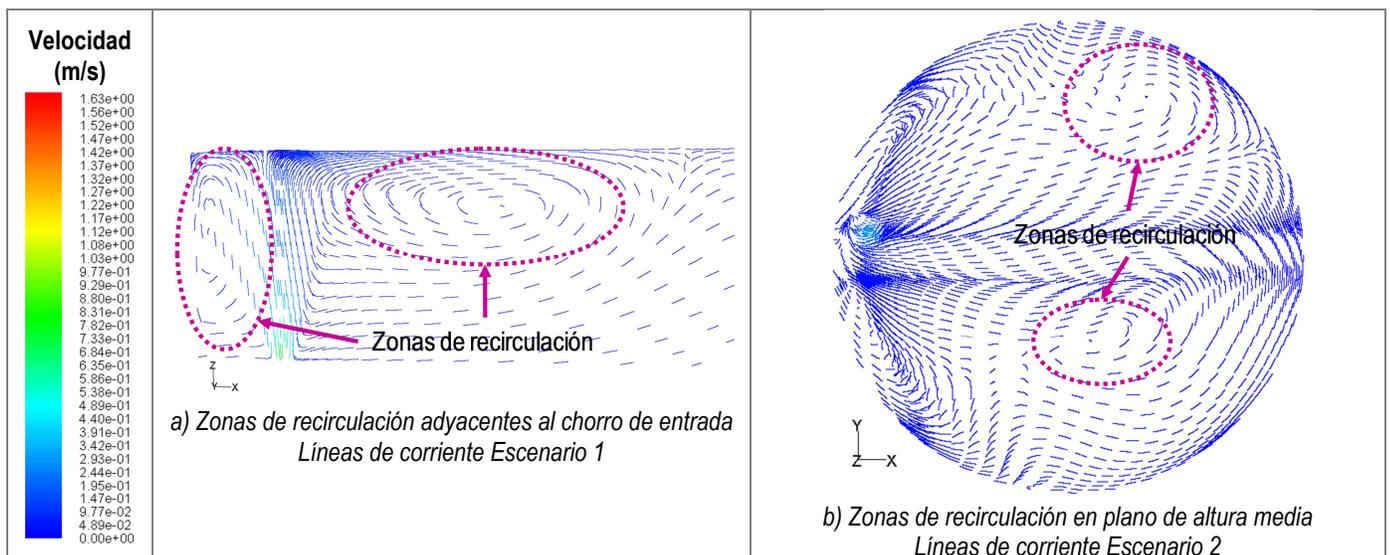
La evaluación experimental del TCJ2 permitió establecer que su operación actual no permite el intercambio de agua adecuado y su mezcla es ineficiente, incrementándose así los TRH y la aparición de zonas muertas, lo cual conlleva a la pérdida de cloro residual libre que podría llegar a ser significativa en términos sanitarios si no se toman las medidas adecuadas para prevenirlo. Dicha pérdida de cloro ocasionaría un deterioro microbiológico del agua representado en el recrecimiento bacteriano en la masa de agua, aparición y desprendimiento de biopelícula en las superficies del tanque y aparición de especies de fitoplancton, zooplancton y macroinvertebrados.

7.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

7.2.1 Patrón de flujo

7.2.1.1 Condiciones actuales

Inicialmente, la variación del flujo másico indicó que se alcanzó la conservación de la masa durante la simulación del patrón de flujo de TCJ en los tres escenarios planteados. Los vectores y líneas de corriente muestran que en todos éstos se presentan zonas de recirculación adyacentes al chorro de entrada, tanto en la superficie del agua como en la zona comprendida entre la pared y el chorro (Figura 7.5a); también hay zonas de recirculación en el plano ubicado en la altura media del tanque (Figura 7.5b). Las isosuperficies muestran que, para los escenarios 1 y 2 son escasas las zonas de baja velocidad (1×10^{-3} m/s), mientras que en el escenario 3 se presenta una zona más grande con velocidades pequeñas del orden de 1×10^{-5} m/s (zonas muertas - Figura 7.5c). La superposición de estas isosuperficies con las trayectorias de velocidad permite determinar que al menos una corresponde a zonas muertas, como se muestra en la Figura 7.5d para el escenario 3. Todos los resultados detallados del patrón de flujo se encuentran en el Anexo E.



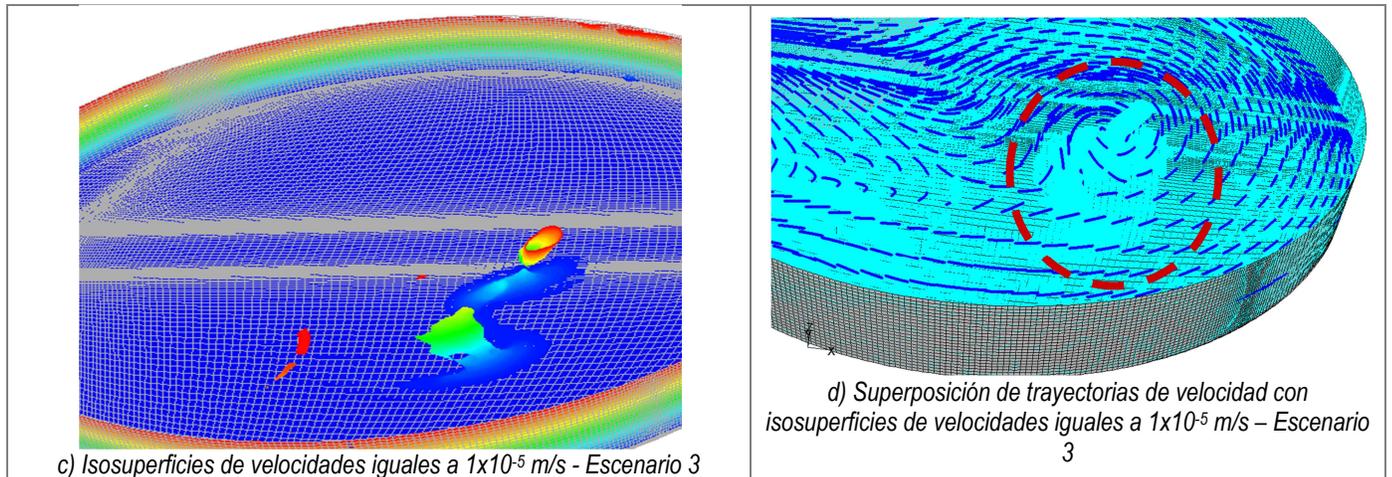


Figura 7.5. Patrón de flujo de TCJ2 – condiciones actuales

Lo anterior evidencia que la hidrodinámica interna del tanque está caracterizada por la presencia de diversas zonas de recirculación cuya magnitud de velocidad dependerá del caudal de entrada de agua al tanque durante los ciclos de llenado. Por esta razón, las zonas identificadas en el escenario 3 son de velocidades con magnitud más baja que los otros dos escenarios, teniendo en cuenta que éste presenta el menor caudal de entrada y, por lo tanto, el menor flujo de momento; tales zonas podrían generar el incremento de los tiempos de residencia y disminución significativa del cloro residual libre.

Muriel (2008) también simuló con el programa Hydrotank el patrón de flujo y decaimiento del cloro en el tanque Ciudad Jardín 2 en periodos de llenado y vaciado, a partir de una geometría cilíndrica con la entrada ubicada en el centro del tanque y planteando diversos escenarios que combinaron condiciones de caudal y nivel máximo, medio y mínimo. Este autor encontró zonas de mezcla y de recirculación que provocan la pérdida del cloro residual libre en todos los escenarios e identificó que las condiciones más críticas se presentan para caudales bajos (menores energía del chorro de entrada) y niveles de agua altos, ratificándose así lo encontrado en este estudio. La presencia de zonas muertas está asociada principalmente con la pérdida del cloro residual libre y la sedimentación de partículas suspendidas en la masa de agua que se acumulan en el fondo del tanque, por lo tanto éstas deben evitarse al máximo para prevenir posibles eventos de deterioro de la calidad del agua almacenada.

7.2.2 Mezcla de trazador

En la Figura 7.6 se presentan los contornos de trazador para cada escenario, los cuales muestran que a pesar que se inyectó el trazador durante el doble del TRH teórico, sólo se alcanzó una concentración entre el 70 y 76% de la esperada para los escenarios 1 y 2, respectivamente, mientras que para el escenario 3 se obtuvo el 100% de la concentración esperada, indicando así que para grandes volúmenes de agua se requiere de mayor tiempo de inyección para lograr la concentración de trazador esperada, dados los caudales actuales de operación. Las simulaciones de trazador muestran que éste no se mezcla completamente con toda la masa de agua, entra y choca contra la superficie del agua y se mueve desde el perímetro hacia el centro, razón por la cual se notan menores concentraciones en esta región al final del periodo de inyección (todos los resultados detallados de estas simulaciones se encuentran en el Anexo F).

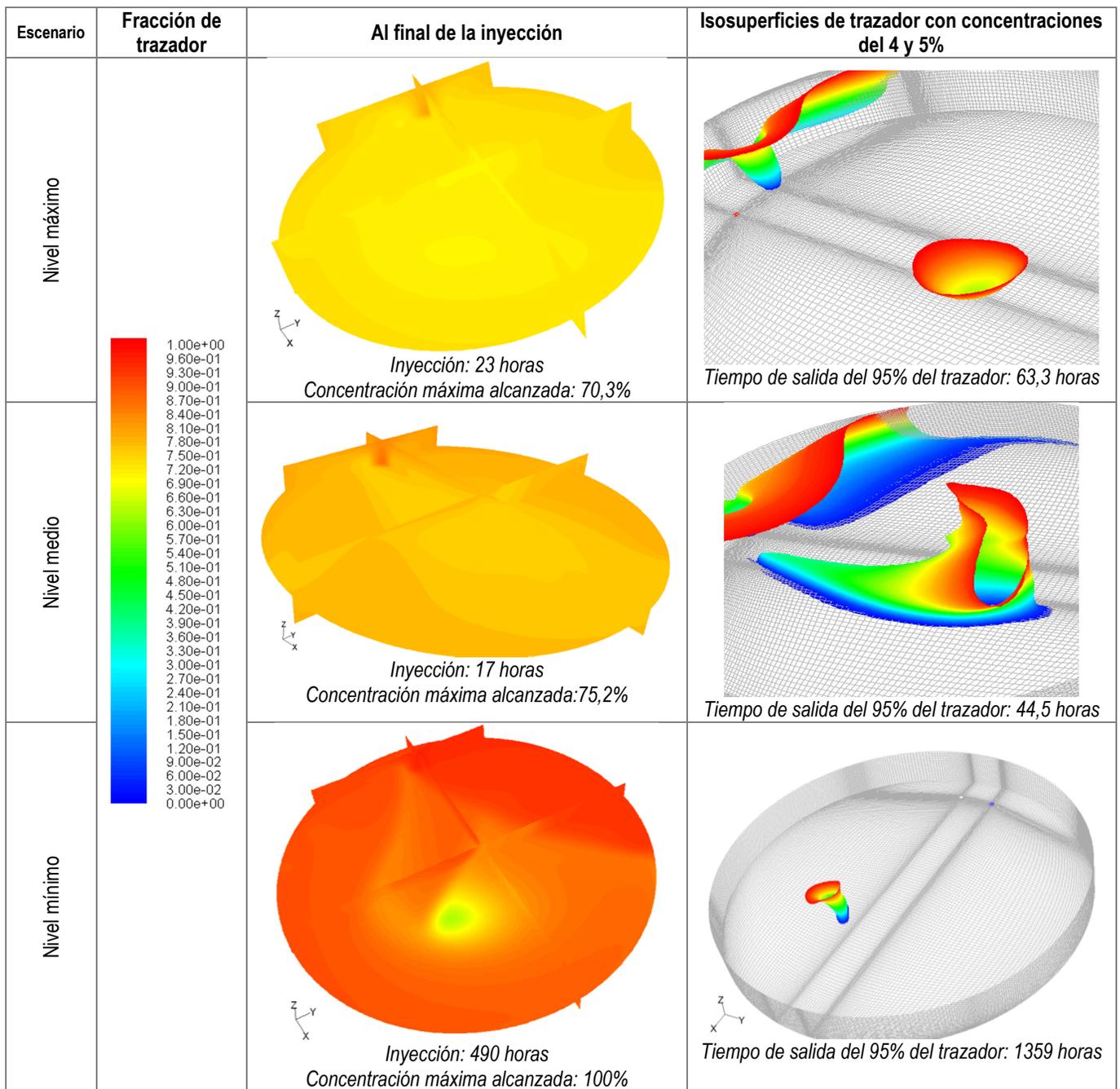


Figura 7.6. Contornos de trazador – condiciones actuales

Las isosuperficies de trazador reflejan la influencia del flujo másico en este tipo de simulaciones pues para el escenario 2, el tiempo en el que sale del tanque el 95% del trazador es menor que para el escenario 1 (44,5 vs. 63,3 horas) y notoriamente inferior respecto al escenario 3 (1359 horas). Sin embargo, dado que en el escenario 2 se alcanzan mayores concentraciones de trazador que en el escenario 1, son mayores los volúmenes de agua que quedan todavía en el tanque con concentraciones del 4 y 5%. Además, la superposición de las líneas de corriente con las isosuperficies de trazador permite identificar que las zonas muertas de cada escenario corresponden al menos a una región del tanque que todavía conserva el 4 y 5% del trazador, indicando así que bajo las condiciones actuales, el tanque presenta zonas en las que la mezcla es ineficiente y que puede presentar deterioro de la calidad del agua como pérdida significativa del cloro residual libre.

Con el fin de replicar lo realizado en el trabajo de campo de este estudio, se realizó un monitoreo del trazador en el centro y perímetro del tanque (ventanilla de acceso) en las posiciones verticales de fondo, medio y superficie, encontrándose que en estos perfiles se logra la mezcla completa con un 90% de homogenización ($CV < 0,1$) a pocos minutos de iniciarse la inyección para el caso del perímetro y a escasas horas para el caso del centro del tanque (Anexo F).

La simulación numérica bajo las condiciones actuales indicó que la mezcla completa se presentó luego de minutos y horas en los perfiles verticales de centro y perímetro pero los contornos evidenciaron que dicha mezcla no es total en toda la masa de agua pues, durante la inyección, hay más concentración de trazador en el perímetro del tanque que en el centro y durante la salida existen zonas en las que todavía permanece un 4 y 5% de trazador luego de un determinado tiempo como se describió anteriormente, ratificando lo resaltado en la sección 7.2.2 en cuanto a la interpretación del tiempo de mezcla de acuerdo con Jayanti (2001). Al comparar los tiempos de retención teóricos con los obtenidos a partir de las curvas de trazador (Tabla 7.1), se nota que en todos los escenarios se presentaron cortos circuitos dado que los segundos son notoriamente menores a los primeros con diferencias entre el 32,4 y 46,1%, situación asociada con la cercanía de la salida a la entrada del tanque.

Tabla 7.1. Tiempos de retención – condiciones actuales

Escenario	Tiempo teórico de retención (h)	Tiempo medio de retención simulado (h)
1	11,22	6,05
2	8,05	5,14
3	244,82	132,62

Por otra parte, los resultados obtenidos con la inclusión de la temperatura y la flotabilidad reflejan algunas diferencias en el patrón de flujo del escenario 2, principalmente en la extensión de las zonas muertas (velocidades menores a 1×10^{-3} m/s), la cual es mayor cuando se incluye la flotabilidad con diferenciales de temperatura de 1,9 °C entre el agua que entra y la almacenada, de acuerdo con lo encontrado en la evaluación experimental del tanque. Los contornos de trazador muestran disimilitudes en cuanto a la extensión y ubicación de las regiones con contenido remanente de trazador de 4 y 5% y los perfiles verticales muestran que las mayores desigualdades se observan en el centro del tanque en donde el trazador presenta mayor concentración en el fondo, seguido por medio y luego en superficie durante la inyección cuando se incluye la flotabilidad; dicho comportamiento se invierte cuando finaliza la inyección.

En general, bajo las condiciones de entrada y salida simultánea de agua, el diferencial máximo de temperatura obtenido en la evaluación experimental del TCJ no es suficiente para reflejar en la simulación numérica corrientes de densidad significativas y, por lo tanto, no se identificaron diferencias en la mezcla del trazador. Los resultados comparativos de estas simulaciones se encuentran en el Anexo B.

7.2.3 Decaimiento del cloro residual libre

Para evaluar el decaimiento del cloro residual libre en TCJ2 se realizaron simulaciones con una concentración igual a 0 mg/L en la entrada y 0,92 mg/L al interior de acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación experimental. Se monitoreó el cloro en varios puntos internos tanto cerca de las paredes como en el centro del tanque (ver ubicación de puntos y resultados detallados en el Anexo G). En la Figura 7.7 se muestran los contornos de cloro para

las condiciones actuales y en la Figura 7.8 se presenta la comparación del decaimiento del cloro en varios puntos internos y salida del tanque para los escenarios 2 y 3 y el ajuste exponencial del decaimiento de esta sustancia en la salida para el escenario 3.

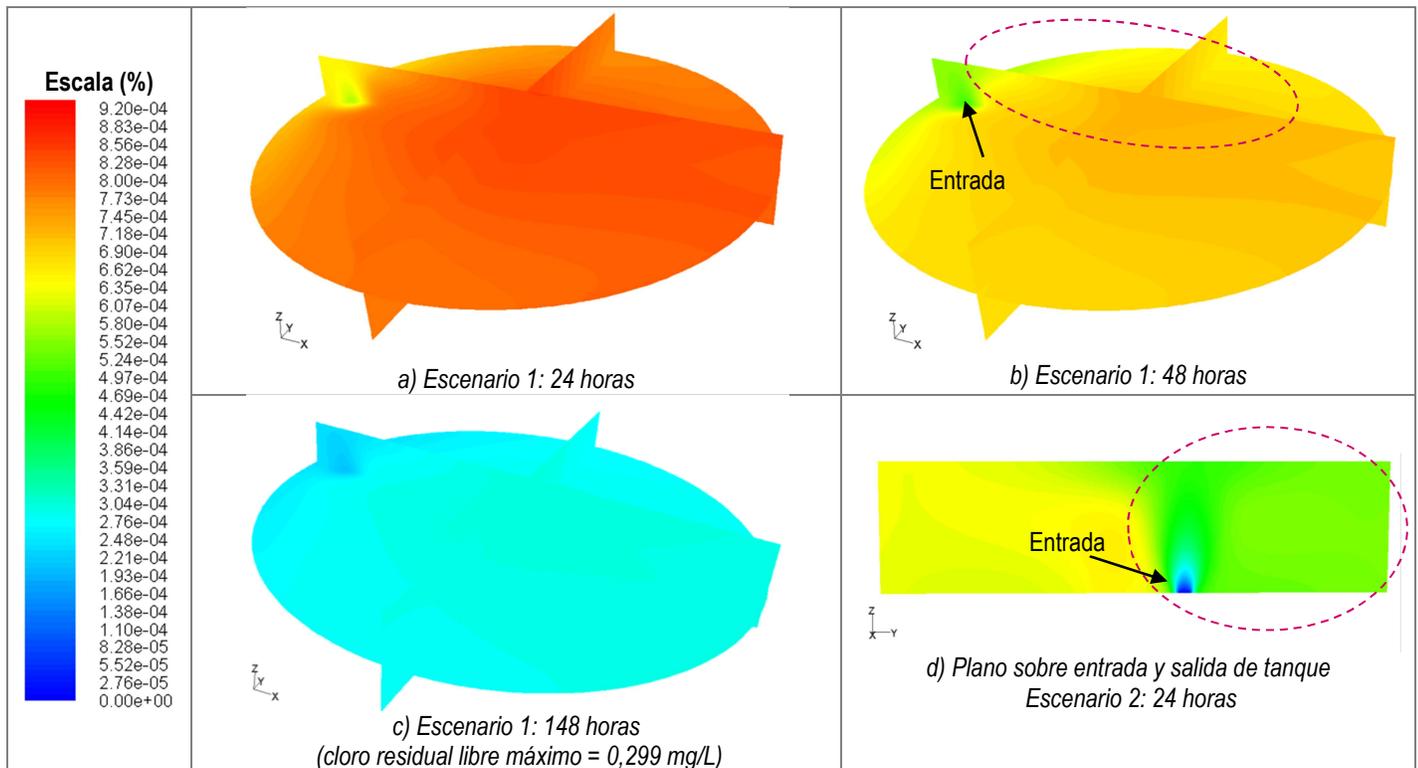


Figura 7.7. Contornos de cloro residual libre – condiciones actuales

Con relación a los contornos, el decaimiento del cloro es mayor en el perímetro del tanque, particularmente en la zona adyacente la entrada de agua y es menor en el centro, tal como se destaca en las Figuras 7.7b y d, lo cual se correlaciona con el comportamiento del trazador donde las menores concentraciones de éste se encontraron en esta región del tanque. De la Figura 7.7 y el Anexo G se deduce que los resultados de las simulaciones de decaimiento de cloro aplicando la metodología descrita también están ligados al caudal de cada escenario pues el tiempo en el que se alcanzó una concentración de 0,3 mg/L fue de 184, 109,6 y 565,3 horas para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente.

Lo anterior también se puede corroborar observando la Figura 7.8a y b en la que se nota que el decaimiento del cloro es mayor en los puntos ubicados adyacentes a la entrada (P4 y P5) debido al transporte por esa zona del agua fresca que entra; dicho decaimiento es menor en los puntos ubicados por la zona adyacente a la salida (P6 y P7), los opuestos a la entrada (P2 y P3) y en el centro (P1). En resumen, podría decirse que el transporte del cloro es perimetral, empezando desde la entrada y terminando en la salida y siendo menor en el centro del tanque.

Como se mencionó previamente, el decaimiento del cloro está fuertemente ligado al flujo de agua por lo que el ajuste exponencial de éste en cada escenario resulta en unas constantes de decaimiento de primer orden correlacionadas con el flujo másico correspondientes, es así como el escenario 2 presenta la constante más alta ($0,330 \text{ día}^{-1}$), seguido por el escenario 1 y 3 ($0,158 \text{ día}^{-1}$ y $0,085 \text{ día}^{-1}$, respectivamente) (Figura 7.8b).

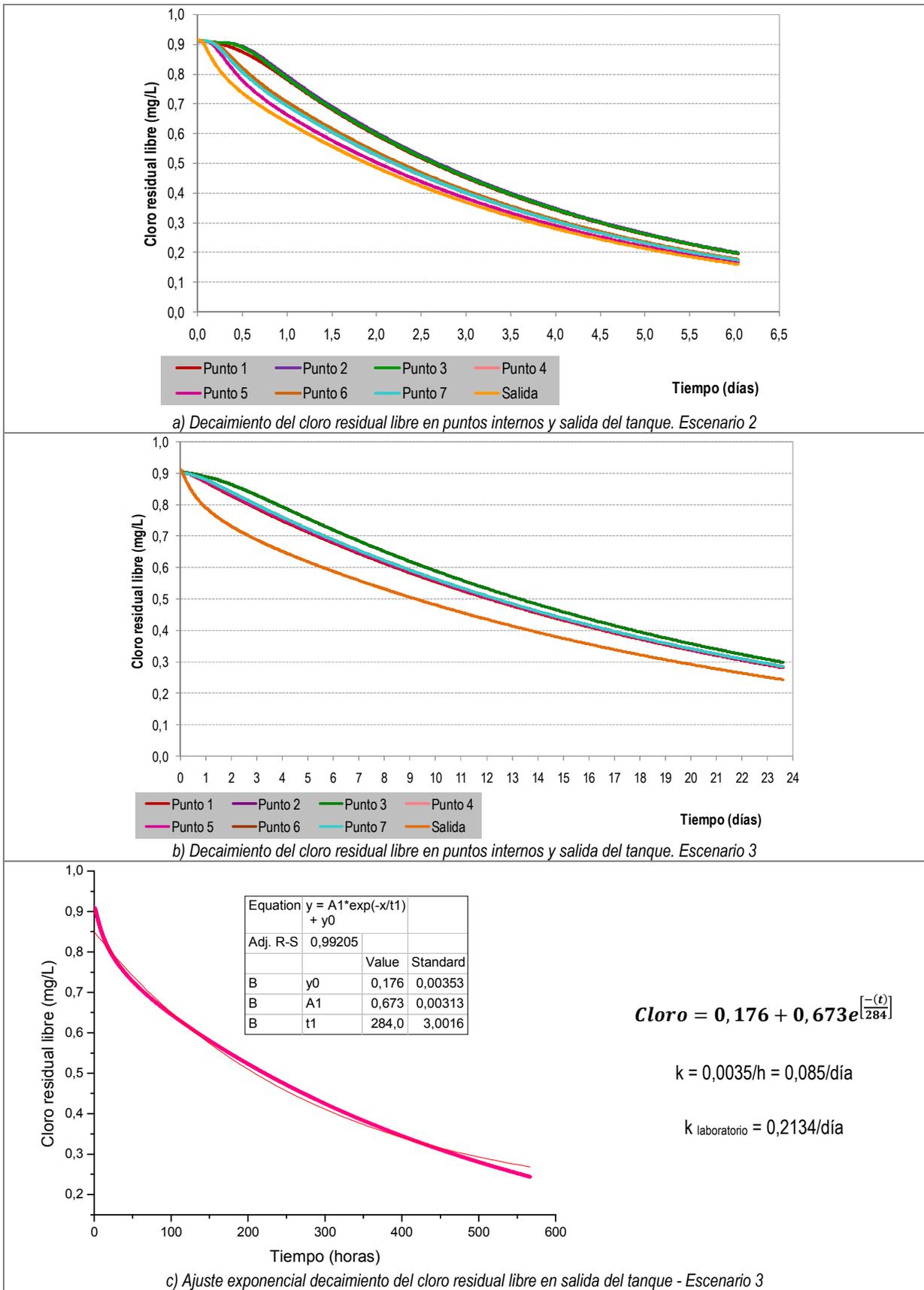


Figura 7.8. Decaimiento del cloro residual libre y ajuste exponencial

Cabe destacar que, aunque a partir del patrón de flujo y trazador se identificaron zonas muertas dentro del tanque en los tres escenarios simulados bajo condiciones actuales, no se establecieron regiones que presentaran reducción significativa del cloro residual libre tal como se identificó en la evaluación experimental. Esto podría estar asociado con la adopción de una configuración de operación del tanque diferente a la real, pues el funcionamiento de un tanque de compensación implica la reserva de un volumen de agua para atención de emergencias, incrementando los TRH y favoreciendo la pérdida del cloro; mientras que las simulaciones CFD se realizaron con entrada y salida de agua simultánea y considerando una concentración inicial igual en toda la masa de agua.

A partir de los resultados obtenidos en la simulación numérica, se evidencia que los caudales actuales de operación del tanque no permiten la mezcla eficiente y con los caudales menores la situación empeora a pesar del nivel mínimo. Dado que la variación de caudales en el sistema de compensación es algo que depende de la demanda de agua en el sistema Nápoles-Ciudad Jardín y que incrementarlos para obtener mayores flujos de momento en la entrada representa mayores costos en el bombeo, se hace necesario disminuir los niveles mínimos para aumentar el intercambio de agua como se constató en la evaluación experimental de TCJ2.

Los resultados CFD del cloro residual libre en este tipo de estructuras representan un avance en la investigación de calidad de agua en los componentes de un SDA, teniendo en cuenta que la mayoría de las publicaciones se han centrado en estudios de campo y comparación de resultados experimentales de trazadores con simulaciones computacionales en reactores que funcionan a escala real con entrada y salida simultánea de fluido. La mayor aplicación de la CFD para el decaimiento del cloro residual libre se ha realizado en cámaras de contacto de cloro, reactores caracterizados por tiempos de retención pequeños (del orden de minutos) y mayores tasas de decaimiento con relación a los tanques de almacenamiento, como se discutió en el Capítulo 3.

En cuanto a tanques de almacenamiento, se conoce hasta la fecha el trabajo de van der Walt y Haarhoff (2000) quienes incorporaron, entre otros, el tema de calidad de agua desde el punto de vista del cloro residual libre, evaluando diversas configuraciones internas para un tanque con entrada y salida de agua simultánea. Su estudio les permitió establecer que no es posible utilizar los mismos indicadores del comportamiento de un trazador que para el decaimiento del cloro y que se deben favorecer las condiciones de flujo pistón para reducir los cortos circuitos y zonas muertas, a través de la ubicación de deflectores, coincidiendo con lo obtenido por Stamou (2008). van der Walt y Haarhoff (2000) también concluyeron que es necesario profundizar en la metodología y el análisis de la calidad del agua en tanques de almacenamiento en términos del decaimiento del cloro residual libre.

Por el contrario, otros autores afirman que es mejor favorecer la mezcla completa ya que este tipo de estructuras no tienen como objetivo ofrecer tiempo de contacto como en los tanques de desinfección, por lo cual debe aprovecharse la energía del chorro de entrada, evitando que éste choque contra cualquier superficie y disminuyendo el decaimiento del cloro al interior de los tanques (Rossman y Grayman, 1999; Jayanti, 2001; Kirmeyer et al., 2001; Duer, 2003; Grayman et al., 2004; Nordblom y Bergdahl, 2004); lo obtenido en este trabajo coincide con los autores anteriores.

Lo anterior evidencia que son escasos los avances en las simulaciones CFD de tanques de compensación que operan con ciclos de llenado-vaciado, dada la dificultad que implica la representación numérica de la variación del nivel de agua que conlleva la modificación de la malla. Nordblom (2004) presenta un avance en este tema en su tesis doctoral al usar mallas dinámicas. Los resultados poco satisfactorios de la aplicación del modelo VOF en 3D obtenidos en este estudio sugieren que es necesario ahondar en la investigación de los esquemas numéricos

adecuados que deben emplearse para obtener una adecuada representación de la variación de niveles de agua en reactores que presentan este comportamiento, de tal manera que sea posible validar las simulaciones con datos experimentales.

7.3 NUEVA CONFIGURACIÓN DE ENTRADA DE AGUA AL TANQUE

7.3.1 Patrón de flujo

Los vectores y líneas de corriente reflejan la presencia de zonas de recirculación entre los chorros y entre éstos y las paredes (Figura 7.9a), lo cual es igual para cada uno de los planos perpendiculares a las boquillas. En el plano perpendicular a Z a la mitad de la altura del tanque no se observan estas zonas a diferencia de lo encontrado en el escenario 1 actual (Figura 7.9b). Adicionalmente, con esta modificación la magnitud de las regiones de baja velocidad se incrementa de 1×10^{-3} m/s a 5×10^{-3} m/s, con relación al escenario 1 (Figura 7.9c), de las cuales una coincide con zonas de recirculación (Figura 7.9d).

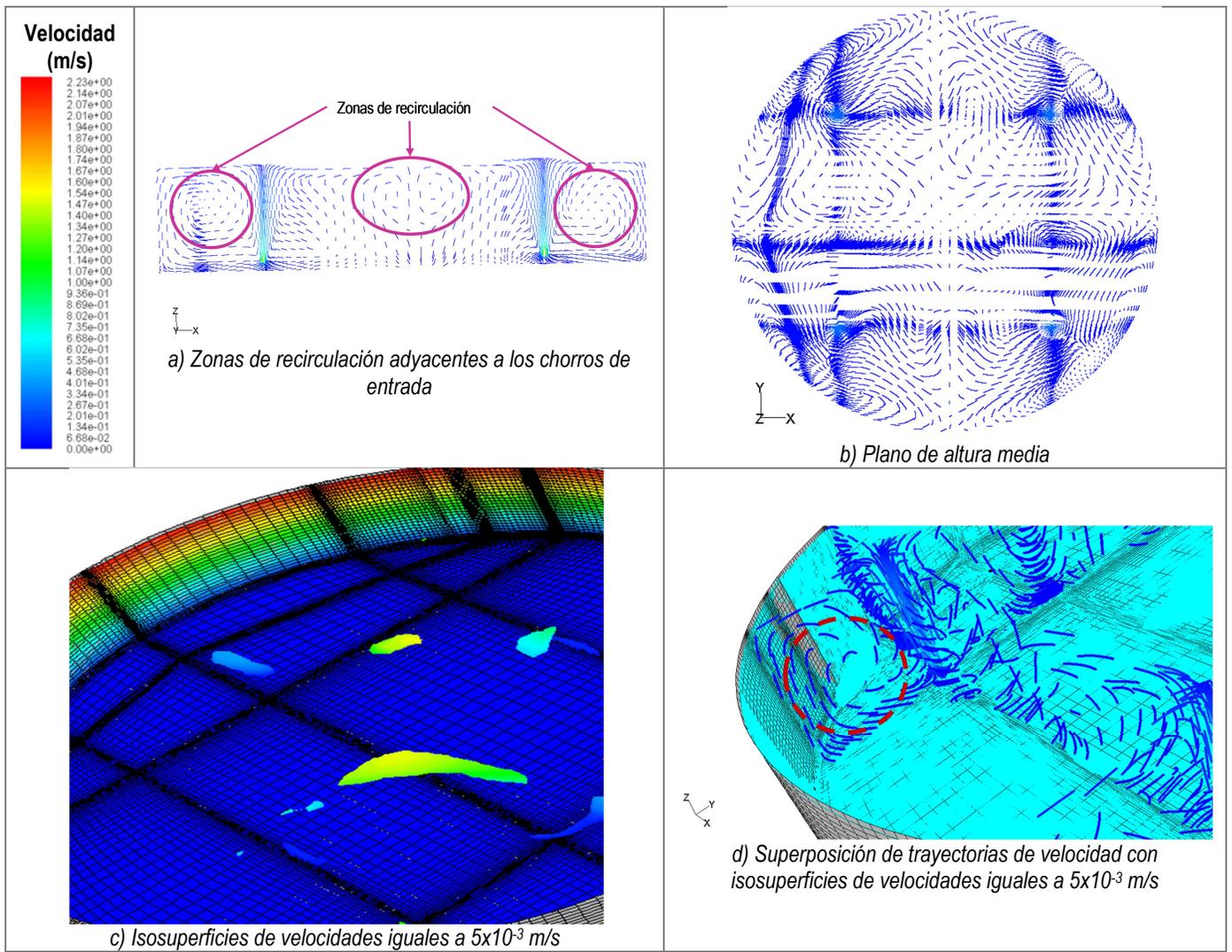


Figura 7.9. Patrón de flujo de TCJ2 – modificación de entrada de agua

7.3.2 Mezcla de trazador

Como se observa en la Figura 7.10, el cambio en la configuración de la entrada provoca indiscutiblemente la reducción del volumen de agua con concentraciones de trazador de 4 y 5% y mejora notablemente la mezcla pues se nota mayor homogeneidad del trazador en toda la masa de agua, con relación al escenario 1 actual.

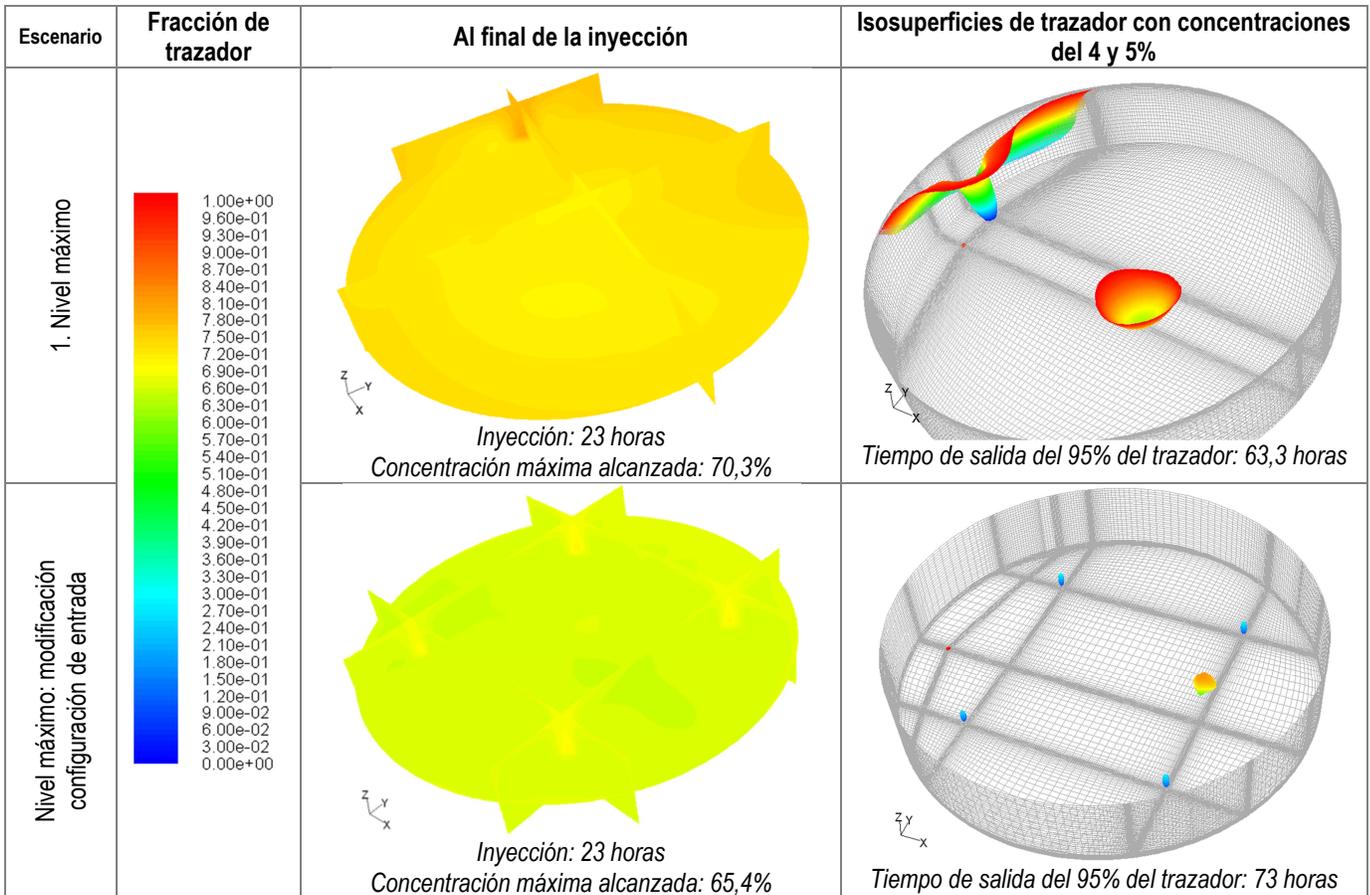


Figura 7.10. Comparación contornos de trazador escenario 1 vs. modificación entrada de agua al tanque

Las diferencias entre el trazador de los perfiles verticales y la concentración en la salida encontradas en el escenario 1 actual se eliminan en el escenario modificado pues las concentraciones de trazador coinciden en perímetro, centro y salida y la mezcla completa en ambas posiciones internas se alcanza pocos minutos después de iniciada la inyección (Figura 7.11). Estos perfiles también reflejan cierta similitud con las curvas de trazador obtenidos en la evaluación experimental del tanque, en cuanto a que se obtiene un valor máximo al final de la inyección y luego va decayendo a medida que sale el trazador del tanque; la principal diferencia que se presenta en un tanque de compensación es la recirculación que se genera cuando ingresa trazador que ha salido previamente del tanque, ha quedado retenido en las tuberías y entra nuevamente en el siguiente periodo de llenado, además de la dilución generada al interior del tanque cuando entra masa de agua libre de trazador.

Como se mencionó en la sección 7.2.2, la cercanía de la salida a la entrada de agua al tanque provocó cortos circuitos en las tres condiciones actuales simuladas, los cuales se redujeron en el escenario modificado pues el TRH teórico es 11,22 horas y el calculado con los resultados de simulación de mezcla de trazador fue 8,68, representando así una diferencia de 22,6%, comparado con 46,1% en el escenario 1 actual.

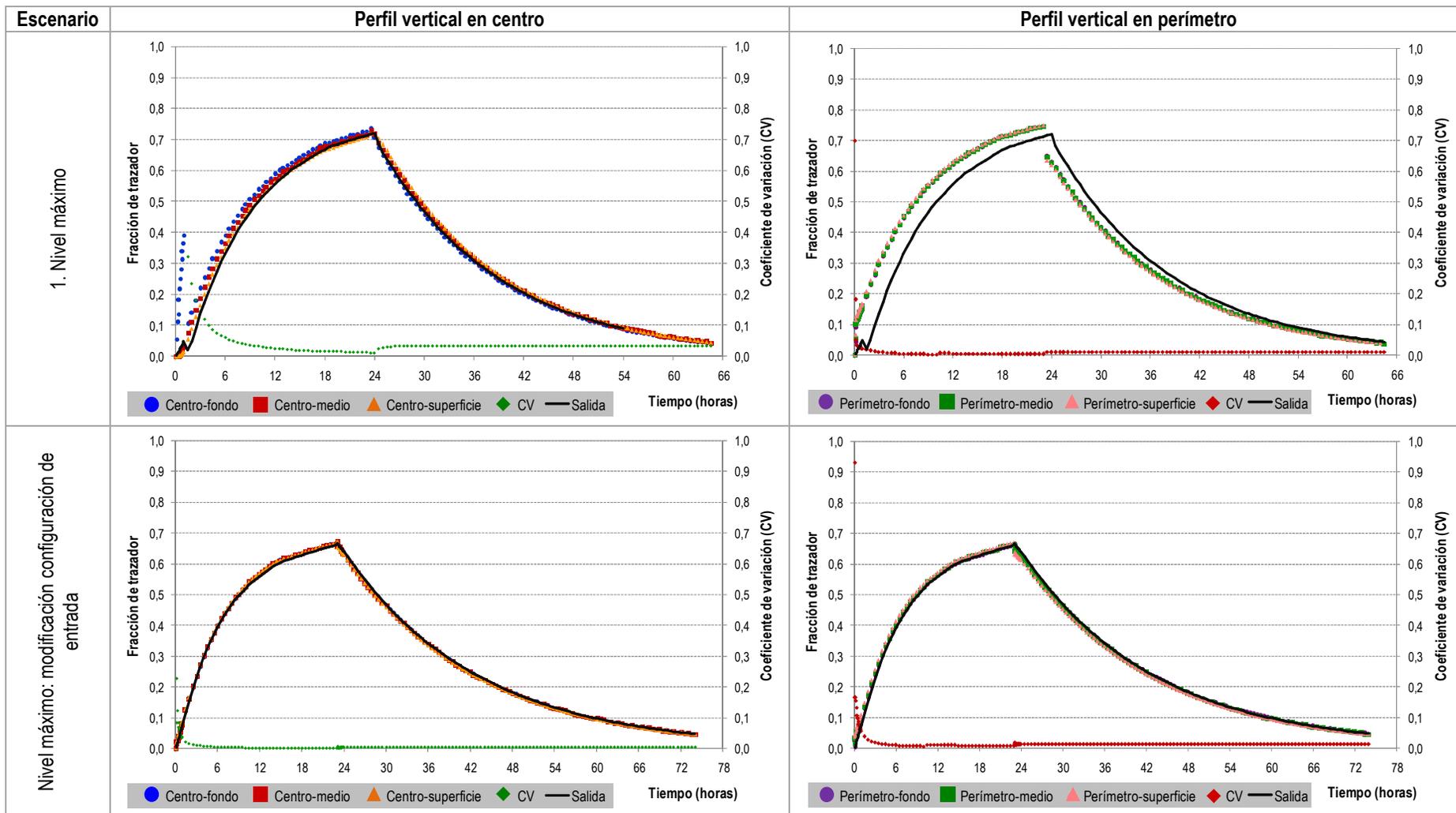


Figura 7.11. Comparación de perfiles verticales en centro y perímetro de tanque de escenario 1 vs. Modificación entrada de agua al tanque

7.3.3 Decaimiento del cloro residual libre

Como se nota en la Figura 7.12, la modificación de la entrada de agua al tanque ocasiona que el decaimiento del cloro sea más homogéneo en toda la masa de agua y su constante de decaimiento se incrementa levemente de $0,158 \text{ día}^{-1}$ en el escenario 1 actual a $0,162 \text{ día}^{-1}$ con la nueva configuración de entrada de agua al tanque.

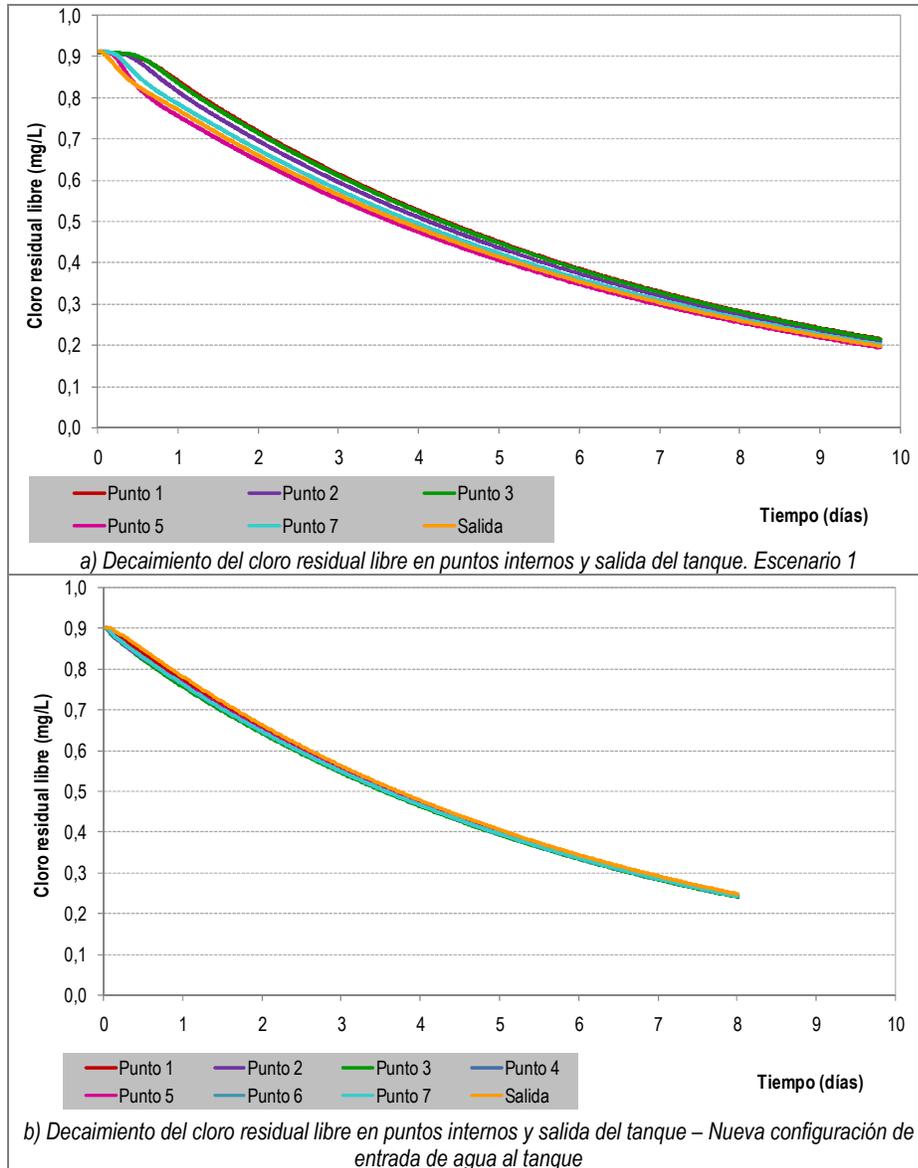


Figura 7.12. Comparación del decaimiento del cloro residual escenario 1 vs. modificación entrada de agua al tanque

Los resultados de patrón de flujo, mezcla de trazador y decaimiento del cloro residual libre obtenidos con la modificación de la configuración de entrada de agua al tanque evidencian el mejoramiento de las condiciones de mezcla al interior del TCJ2 bajo las mismas condiciones de nivel de agua y caudal del escenario 1 actual. Lo anterior podría estar asociado principalmente a la distribución de la energía del chorro y en segundo lugar al flujo de momento, pues el escenario 1 actual tiene un flujo de momento de $0,120 \text{ m}^4/\text{s}^2$ concentrado en un punto cerca al perímetro del tanque y, aunque el escenario con la modificación de la entrada de agua tiene un flujo de momento menor ($0,086 \text{ m}^4/\text{s}^2$), éste está distribuido proporcionalmente en cuatro puntos de la base del tanque.

7.4 CONSOLIDADO DE RESULTADOS DEL ESTUDIO

En la Tabla 7.2 se presenta el consolidado de los resultados obtenidos en el presente estudio, la cual permite establecer en términos generales, que en el tanque Ciudad Jardín 2 se presentan condiciones inconvenientes para la conservación de la calidad del agua potable, considerando el alto tiempo máximo de retención hidráulica, tiempo de mezcla mayor a la duración de los periodos de llenado, bajo intercambio de agua y presencia de una estratificación térmica puntual; reflejándose en la obtención de algunas muestras con concentraciones de cloro menores a 0,3 mg/L (16 datos obtenidos en dos días consecutivos).

Los resultados de la simulación numérica también evidenciaron que la energía del chorro generada con los actuales caudales de operación correspondientes a los niveles máximo, medio y mínimo no permiten la mezcla completa; así como también indicó que distribuir la energía del chorro a través de boquillas verticales ubicadas en el fondo del tanque mejora las condiciones de mezcla y, por lo tanto, favorece la calidad del agua en términos de la reducción de zonas muertas, lo cual beneficia la conservación de adecuadas concentraciones de cloro residual libre.

Tabla 7.2. Consolidado de resultados del estudio

Objetivo	Ítem	Resultado	
Evaluación experimental	Duración periodos de llenado (h)	7,00 - 17,00	
	Niveles al final de periodos de llenado (m)	4,44 - 7,62	
	Niveles al final de periodos de vaciado (m)	1,93 - 6,00	
	Intercambio de agua (%)		Obtenido: 1 - 20
			Requerido: 25 - 38
	Tiempo de mezcla (h)	29,5	
	Tiempo máximo de retención (h)	133	
	Diferenciales de temperatura		Obtenido entre agua que entra y almacenada: 0,1 - 1,9
			Requerido para evitar estratificación térmica: 0,00 - 0,03
	Tiempo que se presentó estratificación térmica (%)		100% del tiempo acumulado de duración de los periodos de llenado.
Modificaciones requeridas para reducir estratificación térmica		Incrementar cuatro veces el caudal de entrada reduce la duración de estratificación térmica en 1,1%.	
		Incrementar diez veces el caudal de entrada reduce la duración de estratificación térmica en 19,2%.	
		Reducir el diámetro de la tubería de entrada a 4" reduce la duración de estratificación térmica en 24,9%.	
		Reducir el diámetro de la tubería de entrada a 2" reduce la duración de estratificación térmica en 66,7%.	
		Simultáneamente, incrementar el caudal de entrada cuatro veces y reducir el diámetro de la tubería de entrada a 4" reduce la duración de la estratificación térmica en 82,7%.	
Número de datos menores a 0,3 mg/L de cloro residual libre		16 en la salida hacia la estación de bombeo.	
Simulación numérica	Patrón de flujo	Presencia de zonas de recirculación alrededor del chorro de entrada.	
	Mezcla de trazador	El trazador no se mezcla homogéneamente en toda la masa de agua.	
		Existe al menos una zona muerta dentro del tanque en la que el agua podría permanecer indefinidamente.	
Decaimiento del cloro residual libre		Decaimiento de primer orden y heterogéneo en toda la	

Objetivo	Ítem	Resultado
		masa de agua.
Modificación de configuración de entrada de agua	Patrón de flujo	Incrementa zonas de mezcla alrededor de los chorros.
		Disminuye cantidad de zonas muertas.
	Mezcla de trazador y decaimiento de cloro residual libre	Reduce tiempos de retención hidráulica.
		Mezcla de trazador y decaimiento del cloro residual libre homogéneo en toda la masa de agua.

8 CONCLUSIONES

La evaluación experimental del tanque Ciudad Jardín 2 permitió establecer:

- El tanque estudiado presentó el comportamiento típico de un tanque de compensación con ciclos de llenado-vaciado y recirculación de agua. El régimen de mezcla en el tanque es ascensional y está dominado por una estratificación térmica puntual; la mezcla completa en el interior se alcanza luego de aproximadamente 29,5 horas y presenta un tiempo máximo de retención de 5,5 días.
- El almacenamiento del agua potable en el tanque ocasiona su calentamiento debido a la transferencia de calor desde la cubierta y paredes hacia la masa de agua. Se identificó estratificación térmica puntual donde el agua que entra al tanque permanece en el fondo mientras que la de mayor edad se ubica encima.
- El almacenamiento de agua en el tanque ocasiona pérdida del cloro residual libre, incluso hasta valores menores a lo establecido por la normatividad colombiana (0,3 mg/L). Dicha pérdida se identificó principalmente en la salida hacia la estación de bombeo y no al interior del tanque, evidenciando que los puntos internos de muestreo no incluyeron alguna zona muerta en la que se estuviera perdiendo considerablemente el cloro, dado que los accesos al interior de esta estructura se limitan a la ventanilla perimetral y la ventilación central.
- La operación actual del tanque está afectando negativamente la calidad del agua almacenada, sugiriendo que es necesario cambiar su esquema de operación para incrementar el intercambio de agua, reducir los tiempos de retención y zonas muertas y así mantener la calidad del agua almacenada en términos de cloro residual libre.
- La metodología de la evaluación experimental es un aporte importante para la estructuración y ejecución de estudios de campo en tanques de compensación. Su desarrollo mostró que el diseño físico de estas estructuras no contempló la posibilidad de hacer muestreos internos, pues los accesos al interior de los tanques de almacenamiento de la ciudad de Cali se limitan a la ventilación central y al acceso perimetral. Así, la modelación es una herramienta que puede aplicarse para el tanque estudiado, precisando así el posible deterioro de la calidad del agua potable almacenada y estudiando la influencia de modificaciones operativas y físicas de éste sobre la calidad del agua.

La simulación numérica del tanque Ciudad Jardín 2 permitió determinar:

- La configuración de la entrada de agua al tanque, el flujo de momento y el nivel de agua son factores importantes que influyen sobre las condiciones hidrodinámicas de un tanque de compensación.

- En todos los escenarios evaluados se identificaron zonas muertas, ubicadas principalmente en la región opuesta a la entrada de agua, también se obtuvieron altos tiempos de permanencia del trazador y se determinó la presencia de cortos circuitos debido a la cercanía de la salida de agua con relación a la entrada.
- Las condiciones más críticas con relación a la mezcla, presencia de zonas muertas (cantidad y dimensión) y tiempo de permanencia de trazador estuvieron directamente relacionadas con la magnitud del caudal y volumen de agua almacenada.
- La inclusión de la flotabilidad con el diferencial máximo de temperatura entre el agua que entra y la almacenada (1,9 °C) no fue suficiente para generar corrientes de densidad significativas que afectaran notoriamente el patrón de flujo y mezcla de trazador en el tanque, bajo las condiciones del escenario 2.

El análisis de una nueva configuración de entrada de agua al tanque Ciudad Jardín permitió definir:

- La distribución proporcional de cuatro boquillas de diámetro igual a 6" resultó en incremento de zonas de mezcla alrededor de los chorros, mayor mezcla del trazador en la masa de agua, disminución de cantidad y dimensión de zonas muertas y reducción de las diferencias en el decaimiento del cloro en la masa de agua (mayor homogeneidad), constituyéndose así en una medida viable para mejorar la conservación de la calidad del agua al interior de tanques de compensación.

9 RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos en este estudio se proponen las siguientes medidas de corto, mediano y largo plazo para ser aplicadas principalmente en el tanque Ciudad Jardín 2 y en los demás del SDA de la ciudad de Cali:

Corto plazo

- Para evitar el riesgo microbiológico en el agua almacenada en el tanque, debe reclararse el agua almacenada en esta estructura para asegurar la calidad del agua a los consumidores que se abastecen de éste y del metálico que se surte del mismo, así como cambiar el esquema de operación del mismo, de tal manera que puedan mantenerse niveles mínimos más bajos de los actuales.
- En caso de que la medida anterior tarde en ser puesta en práctica, se recomienda vaciar este tanque completamente una vez por semana, preferiblemente el día sábado en la noche para que el día domingo se llene nuevamente, dada la disminución del consumo de agua en el sector abastecido por dicho tanque durante este día. Esta medida permitirá renovar el agua cada semana y eliminar zonas muertas dentro del tanque.
- Procesar los datos de niveles en los tanques para calcular el intercambio de agua y así mantener una vigilancia permanente sobre la renovación del agua al interior de estas estructuras.
- Procesar y analizar los resultados del monitoreo en línea del cloro residual libre de los tanques que cuentan con esta tecnología, de tal manera que pueda detectarse a tiempo posibles problemas asociados a la pérdida significativa de esta sustancia.

Mediano plazo

- Cambiar la configuración de entrada de agua a los tanques por boquillas de diámetro reducido para aumentar el flujo de momento. Este estudio analizó la configuración de cuatro boquillas de 6" cada una, resultando en el mejoramiento de la mezcla al interior de los tanques, la cual podría implementarse una vez se hayan realizado los cálculos hidráulicos requeridos para verificar que el tanque opere adecuadamente con los caudales de llenado y vaciado necesarios.
- Dadas las condiciones hidrodinámicas y las concentraciones de cloro residual libre al interior del tanque, es necesario desarrollar una campaña de monitoreo de la concentración de THM y su potencial de formación para verificar si el almacenamiento del agua en dicho tanque provoca que estos subproductos de la desinfección se estén generando en concentraciones mayores a las esperadas y reglamentadas en la normatividad nacional e internacional.
- Evaluar la calidad biológica del agua almacenada en los tanques del SDA de la ciudad de Cali a través del monitoreo de biopelícula en paredes, fondo y sedimentos acumulados, así como del fitoplancton, zooplancton y macroinvertebrados de la columna de agua y sedimentos.
- Desarrollar estudios específicos para simular la variación de niveles de un fluido al interior de un reactor determinado como el caso de los tanques de compensación, así como la mezcla de un trazador y decaimiento del cloro residual libre bajo dichas condiciones.

Largo plazo

- El diseño de otros tanques de almacenamiento y/o compensación debe considerar todos los criterios de calidad de agua para que ésta se conserve dentro de los límites seguros para el abastecimiento de los usuarios.
- Futuros diseños de tanques también deben incluir ventanas para tomar muestras en diversos puntos al interior y así mejorar el monitoreo de la calidad del agua almacenada.
- En la modelación de la red de distribución influenciada por el tanque Ciudad Jardín se puede incluir el modelo de sistemas LIFO para indicar el efecto del almacenamiento en este tanque sobre dicha red.

10 TEMAS FUTUROS DE INVESTIGACIÓN

La investigación en tanques de compensación debe orientarse a la evaluación de la calidad biológica del agua almacenada asociada a la biopelícula adherida en las paredes y piso de estas estructuras, así como en los sedimentos acumulados y a la presencia de fitoplancton, zooplancton y macroinvertebrados en la columna de agua y sedimentos.

También se debe profundizar en los esquemas numéricos que permitan simular la variación de niveles de agua en un tanque de compensación, así como el decaimiento del cloro residual libre y generación de SPD bajo dichas condiciones. De esta manera se podrá determinar con mayor precisión la variación de la calidad del agua en este

tipo de estructuras presentes en los SDA, incluyendo la influencia de modificaciones físicas y operativas sobre la misma.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Jasser A. O., 2007. **Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: pipe service age effect**. Journal Water Research, Vol. 41, No. 2, pp. 387-396.
- Arboleda V. J., 2000. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. 3ª edición. Ed. Mc Graw Hill. Bogotá, Colombia.
- Boulos F. P., Grayman M. W., Bowcock W. R., Clapp W. J., Rossman A. L., Clark M. R., Deininger A. R., Dhingra K. A., 1996. **Hydraulic mixing and free chlorine residual in reservoirs**. Journal AWWA, Vol. 88, No. 7, pp. 48-59.
- Chuo Y. P., 2003. **An investigation of a modelling system for assessing the impact of stratification on mixing in drinking water service reservoirs**. Ph. D. Thesis Abstract, University of NSW, School of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering. Disponible en: www.wqra.com.au/crc.../PhD_thesis_abstracts/Chuo_thesis_summary.pdf, visitada en agosto de 2010.
- Clark M. R., Abdesaken F., Boulos F. P., Mau E. R., 1996. **Mixing in distribution system storage tanks: its effect on water quality**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 122, No. 9, pp. 814-821.
- Duer J. M., 2003. **Use of CFD to analyze the effects of buoyant inlet jets on mixing standpipes**. In: AWWA annual conference and exposition, Anaheim - California, USA.
- Ecuru J., Okot-Okumu J., Okurut O. T., 2010. **Monitoring residual chlorine decay and coliform contamination in water distribution network of Kampala, Uganda**. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, Vol. 15, No. 1, pp. 167-173.
- EMCALI EICE ESP, Departamento de Producción de Agua Potable, Gerencia de Unidad Estratégica de Negocio de Acueducto y Alcantarillado, 2006. **Sistema de acueducto de la ciudad de Cali. Presentación institucional**. Colombia.
- EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle, 2007. **Investigación y desarrollo de estrategias para reducción del riesgo sanitario en la red de distribución abastecida con agua tratada del río Cauca. Informe final**. Proyecto de Investigación, Universidad del Valle. Colombia.
- EPA, 2002a. **Effects of water age on distribution system water quality**. Disponible en: http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_waterdistribution.pdf, visitada en diciembre de 2006.

- EPA, 2002b. **Finished water storage facilities**. Washington DC, UnitedStates. Disponible en: http://www.epa.gov/ogwdw000/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_storage.pdf, visitada en diciembre 16 de 2006.
- EPA, 2002c. **Health risks from microbial growth and biofilms in drinking water distribution systems**. Washington DC, UnitedStates. Disponible en: http://www.epa.gov/OGWDW/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_biofilms.pdf, visitada en diciembre 16 de 2006.
- EPA, 2005. **Water distribution system analysis: field studies, modeling and management**. Disponible en: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r06028/600r06028prelithruchap4.pdf>, visitada en julio de 2007.
- EPA, 2006. **The Effectiveness of Disinfectant Residuals in the Distribution System**. Disponible en: http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/tcr/pdfs/issuepaper_effectiveness.pdf, visitada en diciembre 3 de 2010.
- Fluent Inc., 2006. **Fluent 6.3. User's Guide**. New Hampshire, United States.
- Gauthier V., Bernadette G., Portal. J.M., Block J. C., Gatel D., 1998. **Organic matter as loose deposits in a drinking water distribution system**. Journal Water Research, Vol. 33, No. 4, pp. 1014-1026.
- Gauthier V., Besner M-C, Barbeau B., Millette R., Prévost M., 2000. **Storage tank management to improve drinking water quality: case study**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 126, No. 4, pp. 221-228.
- Grayman M. W., Deininger A. R., Green A., Boulos F. P., Bowcock W. R., Godwin C. C., 1996. **Water quality and mixing models for tanks and reservoirs**. Journal AWWA, Vol. 88, No. 77, pp. 60-73.
- Grayman M. W., Rossman A. L., Arnold C., Deininger A. R., 1999. **Water quality modeling for distribution system storage facilities**. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, United States.
- Grayman M. W., Rossman A. L., Deininger, Smith D. C., Arnold N. C., Smith F. J., 2004. **Mixing and aging of water in distribution system storage facilities**. Journal AWWA, Vol. 96, No. 9, pp. 70-80.
- Greene J. D., Farouk B., Haas N. C., 2004. **CFD design approach for chlorine disinfection processes**. Journal AWWA, Vol. 96, No. 8, pp. 138-150.
- Hannoun A. I., Boulos F. P., List J. E., 1998. **Using hydraulic modeling to optimize contact time**. Journal AWWA, Vol. 90, No. 8, pp. 77-87.
- Jayanti S., 2001. **Hydrodynamics of jet mixing in vessel**. Chemical Engineering Science, Vol. 56, No. 1, pp. 193-210.
- Kennedy M. S., Moeling S., Sarikelle S., Suravallop K., 1993. **Assessing the effects of storage tank design on water quality**. Journal AWWA, Vol. 85, No. 7, pp. 78-88.

- Kirmeyer J. G., Kirby L., Murphy M. B., Noran F. P., Martel D. K., Lund W. T., Anderson L. J., Medhurst R., 1999. **Maintaining water quality in finished water storage facilities**. Ed. AWWA Research Foundation and AWWA. Denver, United States.
- Lansey K. E., Boulos F. P., 2005. **Comprehensive handbook on water quality analysis for distributions systems**. First edition. Ed. MWH Soft, California, United States.
- Mahmood F., Pimblett G. J., Grace O. G., Grayman M. G., 2005. **Evaluation of water mixing characteristics in distribution system storage tanks**. Journal AWWA, Vol. 97, No. 3, pp. 74-88.
- Martel K. D., Kirmeyer G.J., Murphy B. M., Noran P. F., Kirby L., Lund. T.W., Anderson. J. L., Medhurst R., Caprara M., 2002. **Preventing water quality deterioration in finished water storage facilities**. Journal AWWA, Vol. 94, No. 4; pp. 139-148.
- Ministerio de Desarrollo Económico, 2000. **Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000**. Colombia.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, **Resolución 2115 de 2007**, Colombia.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, **Resolución 0811 de 2008**, Colombia.
- Muriel D. 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**. Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería y Ciencias de la Producción, Pontificia Universidad Javeriana Cali. Colombia.
- Muriel D. D. F, Garzón F., Mosquera C., 2009. **La influencia de los patrones de flujo en las estructuras de almacenamiento en sistemas urbanos de abastecimiento de agua**. Revista ACODAL, Vol. 51, No. 224, pp.27-36.
- MWH -Montgomery Watson Harza-, 2005. **Water treatment. Principles and design**. Second edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, United States.
- National Research Council, 2006. **Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks. Free Executive Summary**. Committee on Public Water Supply Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/4937.html>, visitada en mayo de 2006.
- Nordblom O., 2003. **Simulation of mixing in axisymmetric service reservoirs with denser inflow**. In: Advances in water supply management. International Conference on Computing and Control for the Water Industry. September 15-17. London, England.

- Nordblom O., 2004. **Mixing and stagnation in drinking water storage tanks**. Doctoral Thesis. Department of Water Environment Transport, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- Nordblom O., Bergdahl L., 2004. **Initiation of stagnation in drinking water storage tanks**. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 1, pp. 49-57.
- Peplinski D. K., Ducoste J. J., 2006. **Modeling of disinfection contactor hydraulics under uncertainty**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 128, No. 11, pp. 1056-1067.
- Rauen B. W., Lin B., Falconer A. R., Teixeira C. E., 2008. **CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows**. Chemical Engineering Journal, Vol. 137, No. 3, pp. 550-560.
- Roache P. J. **Verification and validation in computational science and engineering**. Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998, pp. 8-9.
- Rossman A. L., Uber G. J., Grayman M. W., 1995. **Modeling disinfectant residuals in drinking-water storage tanks**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 121, No. 10, pp. 752-755.
- Rossman A. L., Grayman M. W., 1999. **Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 125, No. 8, pp. 755-761.
- Ruiz T. A., Rojas R. J., 2008. **Determinación y evaluación de las constantes de decaimiento de cloro libre y formación de trihalometanos en la red del sistema Nápoles - Ciudad Jardín**. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Colombia.
- Stamoul. A., 2008. **Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models**. Journal Chemical Engineering and Processing, Vol. 47, No. 8, pp. 1179–1189.
- Templeton M. R., Hofmann R., Andrews R. C., 2006. **Case study comparisons of computational fluid dynamics (CFD) modelling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment**. Journal Environmental Engineering Science, Vol. 5, No. 6, pp. 529-536.
- Teefy S., 1996. **Tracer studies in water treatment facilities: a protocol and case studies**. Ed. AWWA Research Foundation and AWWA. Denver, United States.
- Tian X., Roberts P. J. W., 2008. **Mixing in water storage tanks. I: no buoyancy effects**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 134, No. 12, pp. 974-985.
- Tu J., Heng Y. G., Liu C., 2008. **Computational Fluid Dynamics. A practical approach**. Ed. Elsevier. Oxford, United Kingdom.
- van der Walt J. J., Haarhoff J., 2000. **Is a reservoir really that simple?**. In: WISA 2000 Biennial Conference, Sun City, South Africa, 28 May – 1 June 2000.

- van der Walt J. J., 2002. **The modelling of water treatment process tank**. Doctoral Thesis in Engineering - Civil Engineering. Rand Afrikaans University, Johannesburg.
- van der Walt J. J., 2008. **A decade of CFD applications in the South African water industry**. In: WISA Biennial Conferences, Suncity, South Africa.
- Versteeg H. K., Malalasekera W., 1995. **An introduction to Computational Fluids Dynamics. The finite volume method**. Ed. Longman Scientific & Technical. London, United Kingdom.
- Wang H., Shao X., Falconer A. R., 2003. **Flow and transport simulation models for prediction of chlorine contact tank flow-through curves**. Journal Water Environment Research, Vol. 75, No. 5, pp.455-471.
- WHO, 2004. **Guidelines for Drinking-water Quality. Third Edition. Volume 1. Recommendations**. Geneva, Switzerland, pp. 515.
- Yu X., Mazurek K. A., Putz G., Albers C., 2008. **Influence of flow development time on the residence time distribution and flow pattern in a scale model of a water treatment plant clearwell**. In: World Environmental and Water Resources Congress, May 12-16, Environmental and Water Resource Institute. Ahupua'A, Hawaii.

12 ANEXOS

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo A: Video de simulación 2D de variación de niveles de agua a través de modelo VOF (versión digital).
- Anexo B: Resultados comparativos sin y con flotabilidad en escenario 2.
- Anexo C: Validación de supuestos estadísticos.
- Anexo D: Resultados de análisis estadístico de variables temperatura y cloro.
- Anexo E: Resultados de simulaciones numéricas: patrón de flujo.
- Anexo F: Resultados de simulaciones numéricas: mezcla de trazador.
- Anexo G: Resultados de simulaciones numéricas: decaimiento del cloro residual libre.

Anexo B: Resultados comparativos sin y con flotabilidad en escenario 2

Ecuaciones del modelo

Adicional a las ecuaciones de conservación de la masa, momento, modelo estándar de turbulencia $k-\varepsilon$ y transporte de escalar, se incluyó la ecuación de conservación de la energía para las simulaciones de flotabilidad por diferencias de temperatura (Ecuación 1). Al lado izquierdo, el primer término representa la tasa de incremento de la energía total y el segundo representa la pérdida total de energía. Al lado derecho, el primer término representa la tasa total de trabajo realizado por unidad de volumen sobre la partícula fluida debido a las fuerza superficiales, el segundo es el flux de energía por conducción, el tercero representa la conversión de energía mecánica aprovechable en calor y el último término representa los términos fuente (energía potencial, producción de calor por reacciones químicas, etc.)¹.

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Condiciones de frontera e iniciales

Para simular la flotabilidad por diferencias de temperatura en el patrón de flujo y mezcla de trazador del escenario 2 se empleó la aproximación de Boussinesq con una temperatura de operación de 23,9 °C, un coeficiente de expansión térmica igual a $2,4725 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ y se incluyeron la gravedad y los efectos de flotabilidad en el modelo de viscosidad. En la Tabla 1 se presenta la temperatura en cada una de las fronteras. La temperatura en las paredes se determinó a partir de unas mediciones en campo que se realizaron en una jornada de 12 horas (6:00 – 18:00), utilizando un termómetro sin contacto marca Oakton Infra Pro 1 standard model 35629-00.

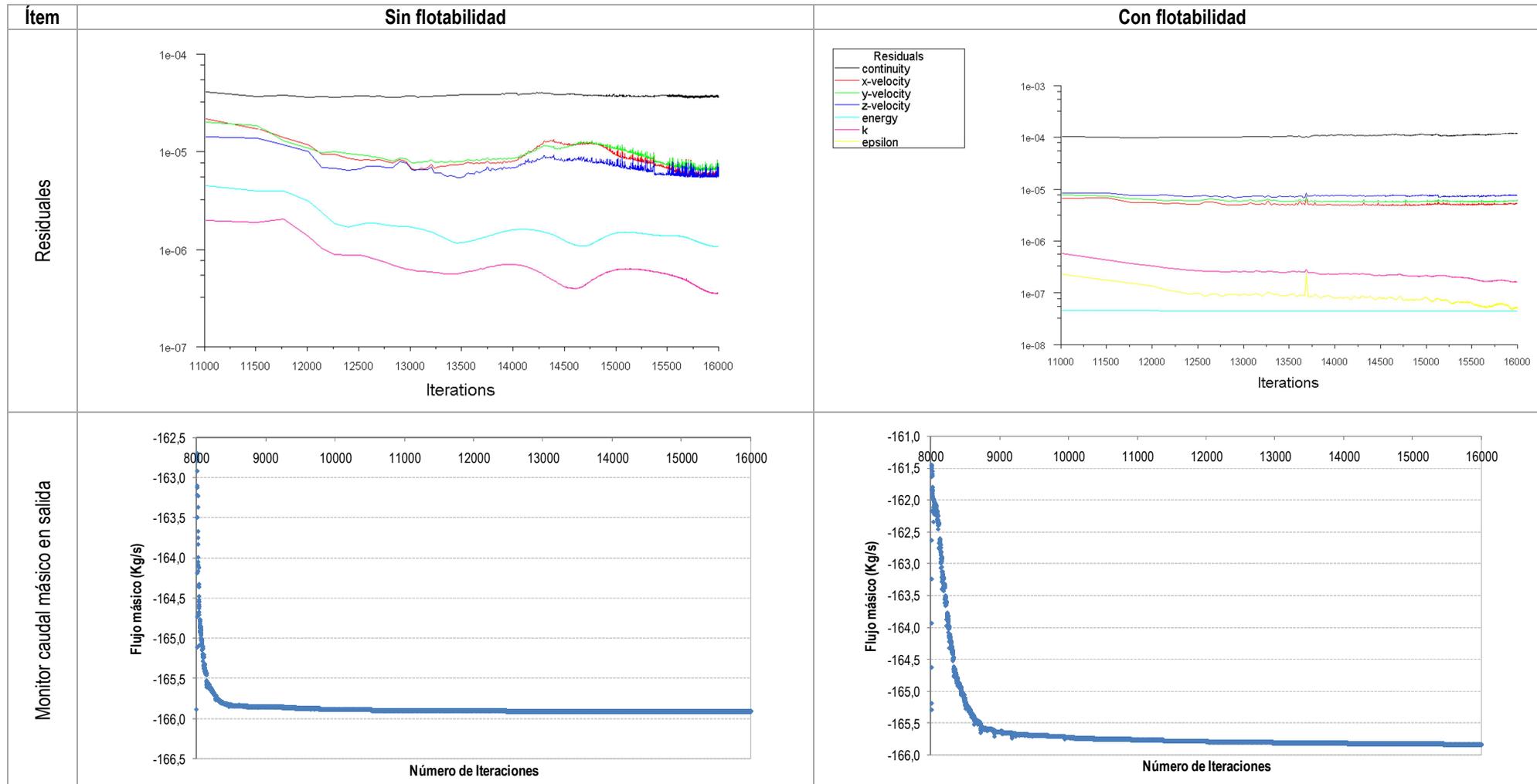
Tabla 1. Condiciones de frontera en simulación numérica de TCJ2

Frontera	Temperatura
Entrada	22,2 °C
Interior	24,1 °C
Salida	24,1 °C
Superficie de agua	24,1 °C
Paredes	26,6 °C

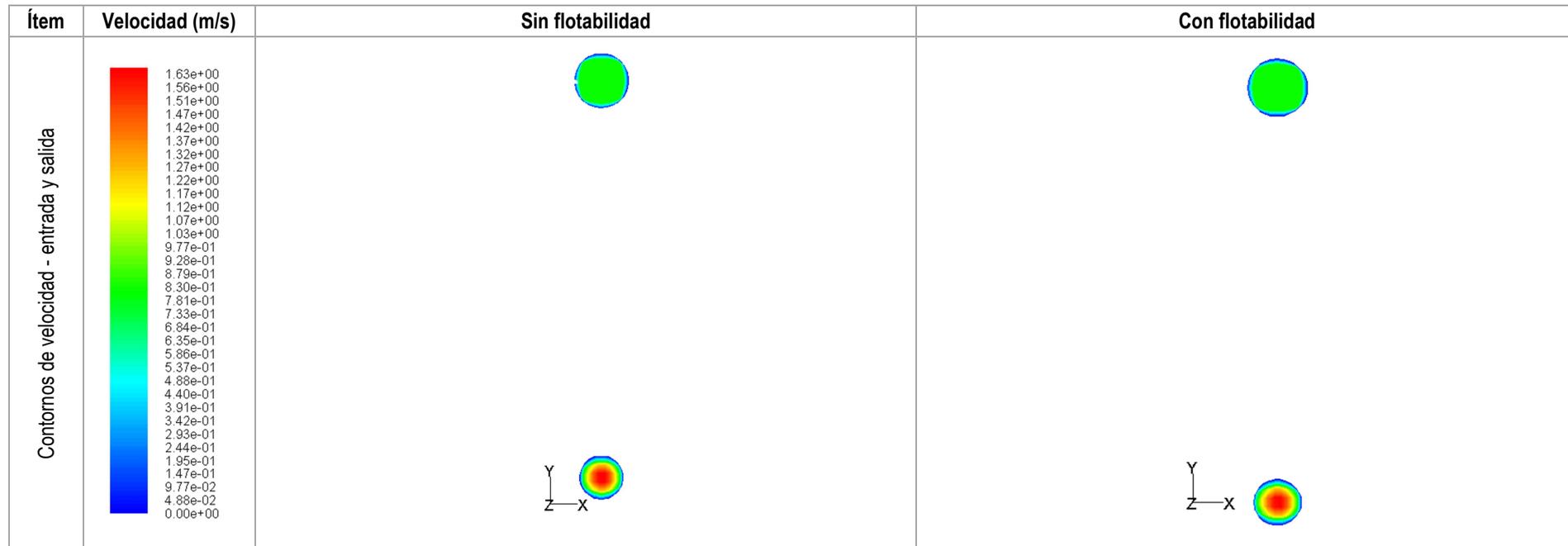
¹ Versteeg H. K., Malalasekera W., 1995. **An introduction to Computational Fluids Dynamics. The finite volume method.** Ed. Longman Scientific & Technical. London, United Kingdom

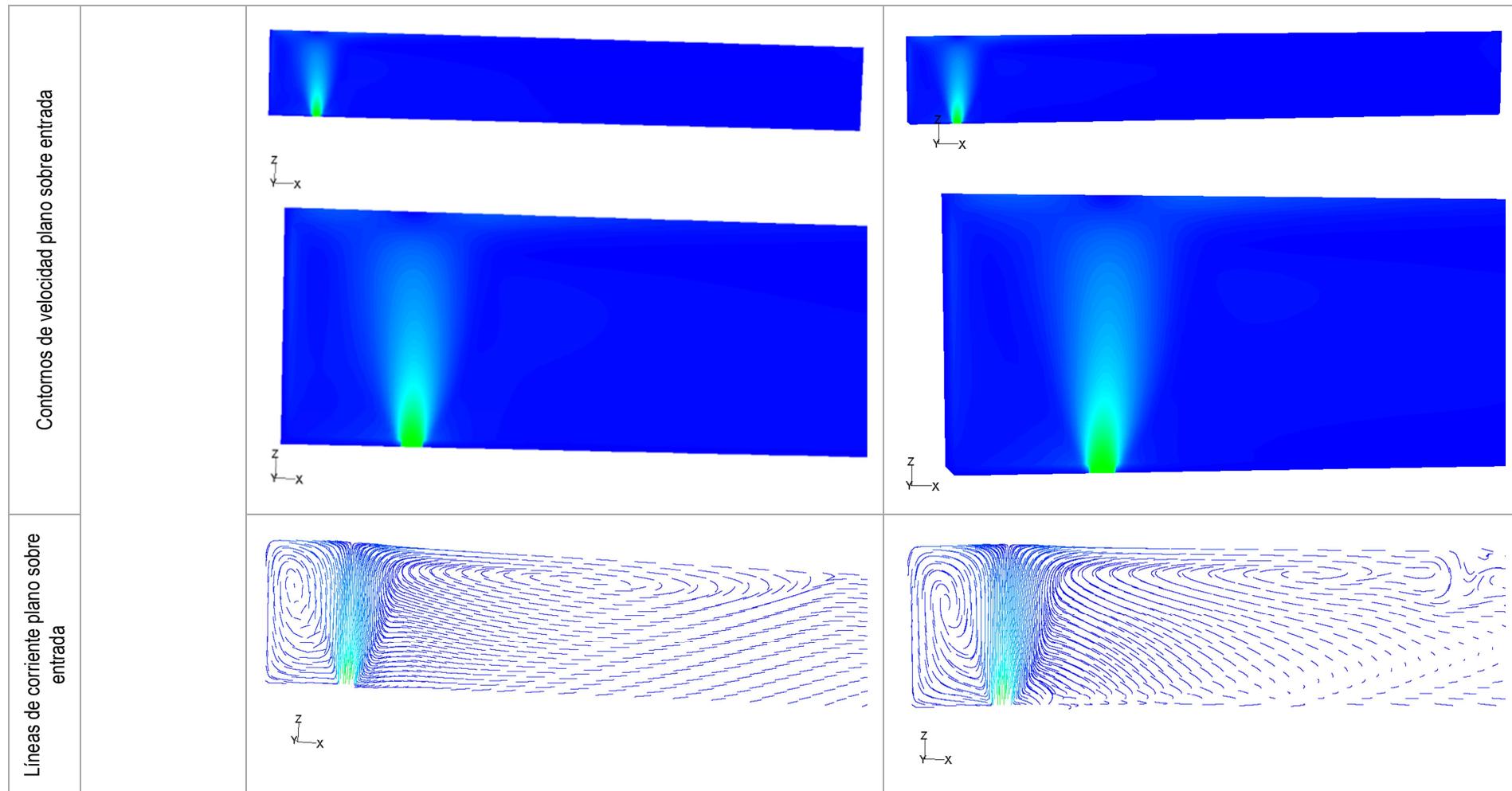
Resultados comparativos del escenario 2 con y sin flotabilidad

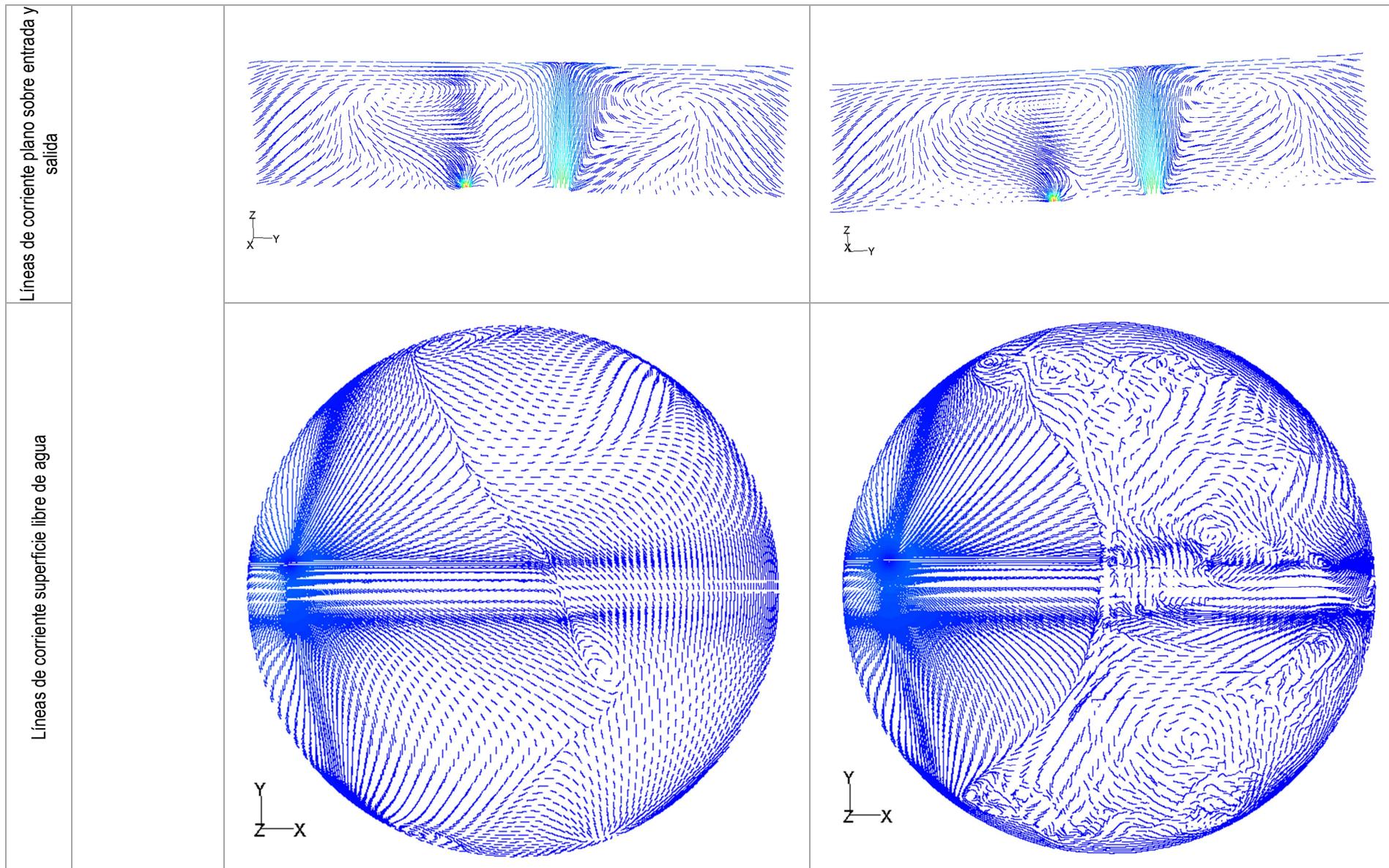
- Patrón de flujo: controles de la solución

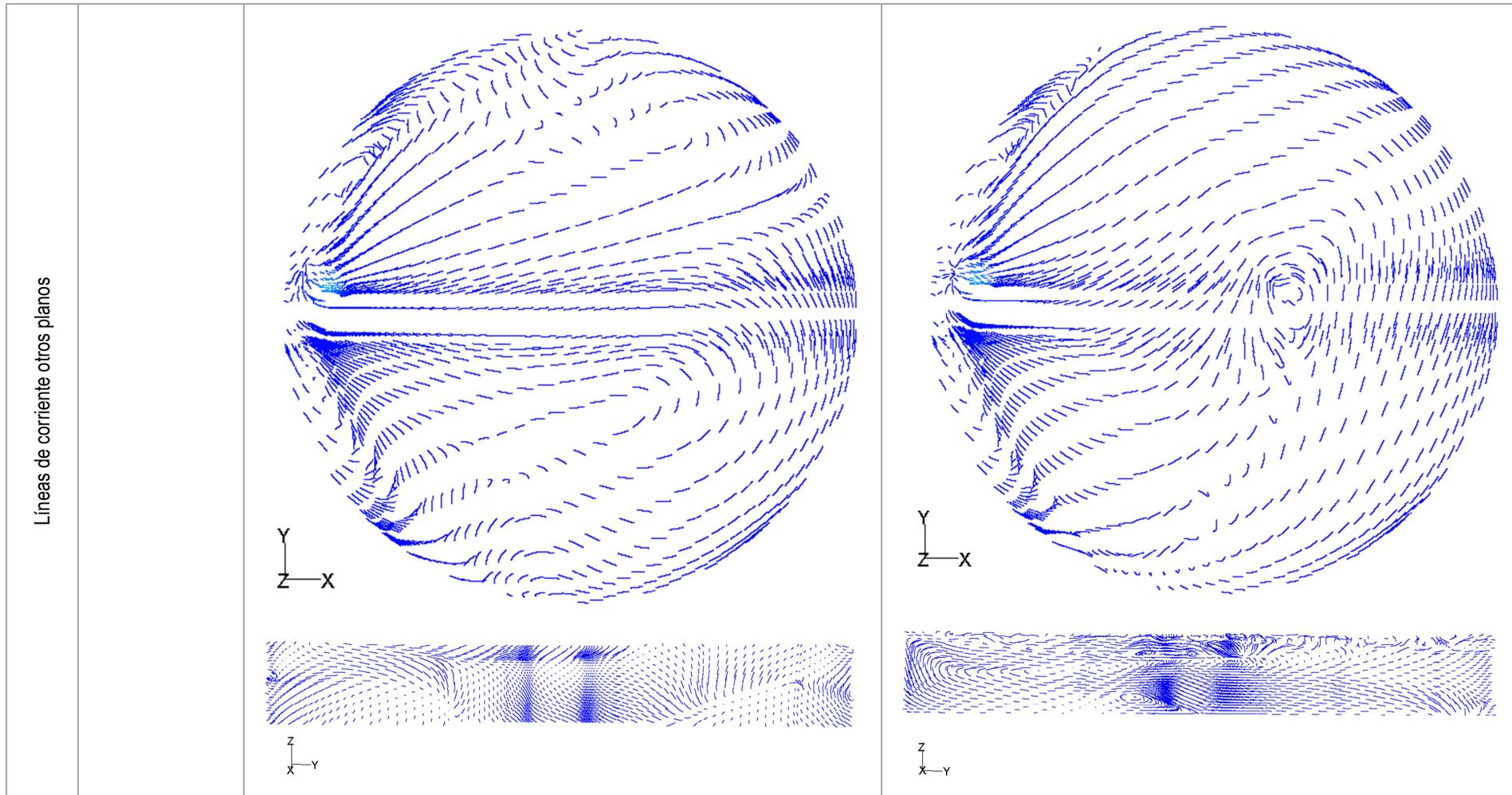


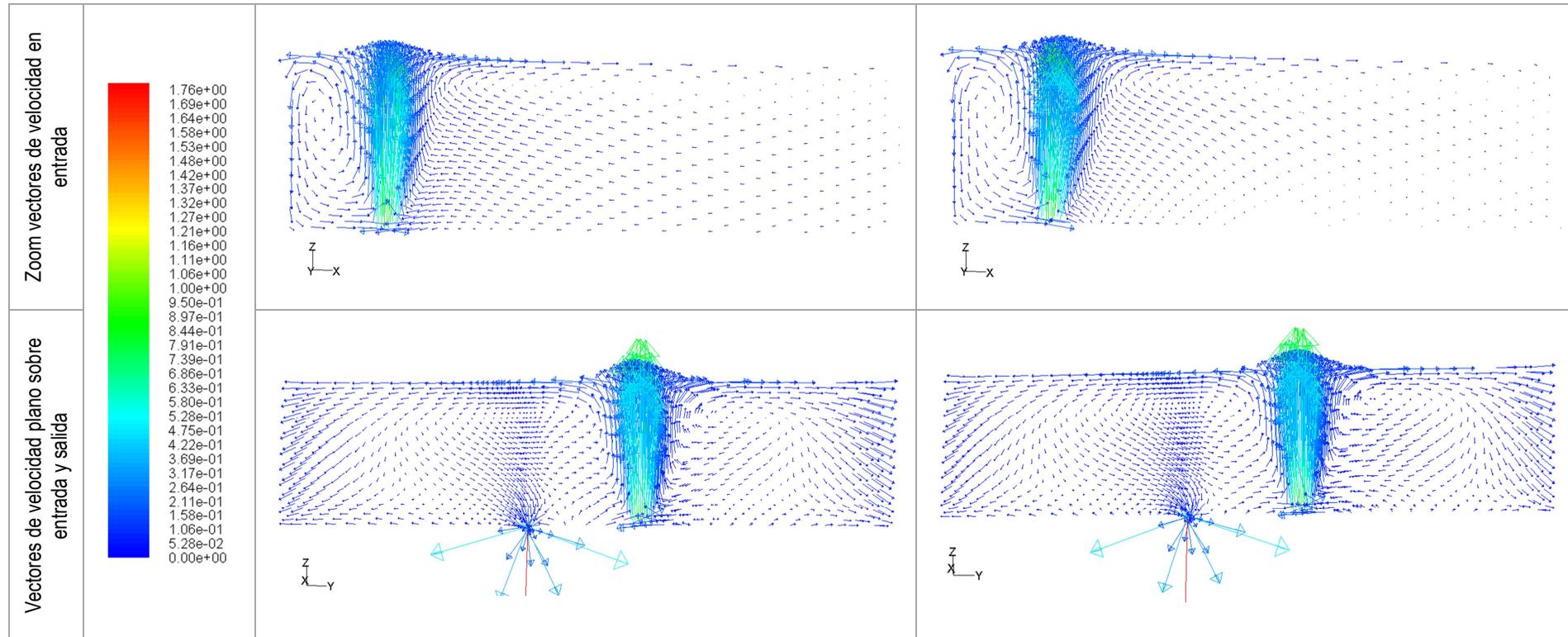
▪ Patrón de flujo: contornos, vectores y líneas de corriente

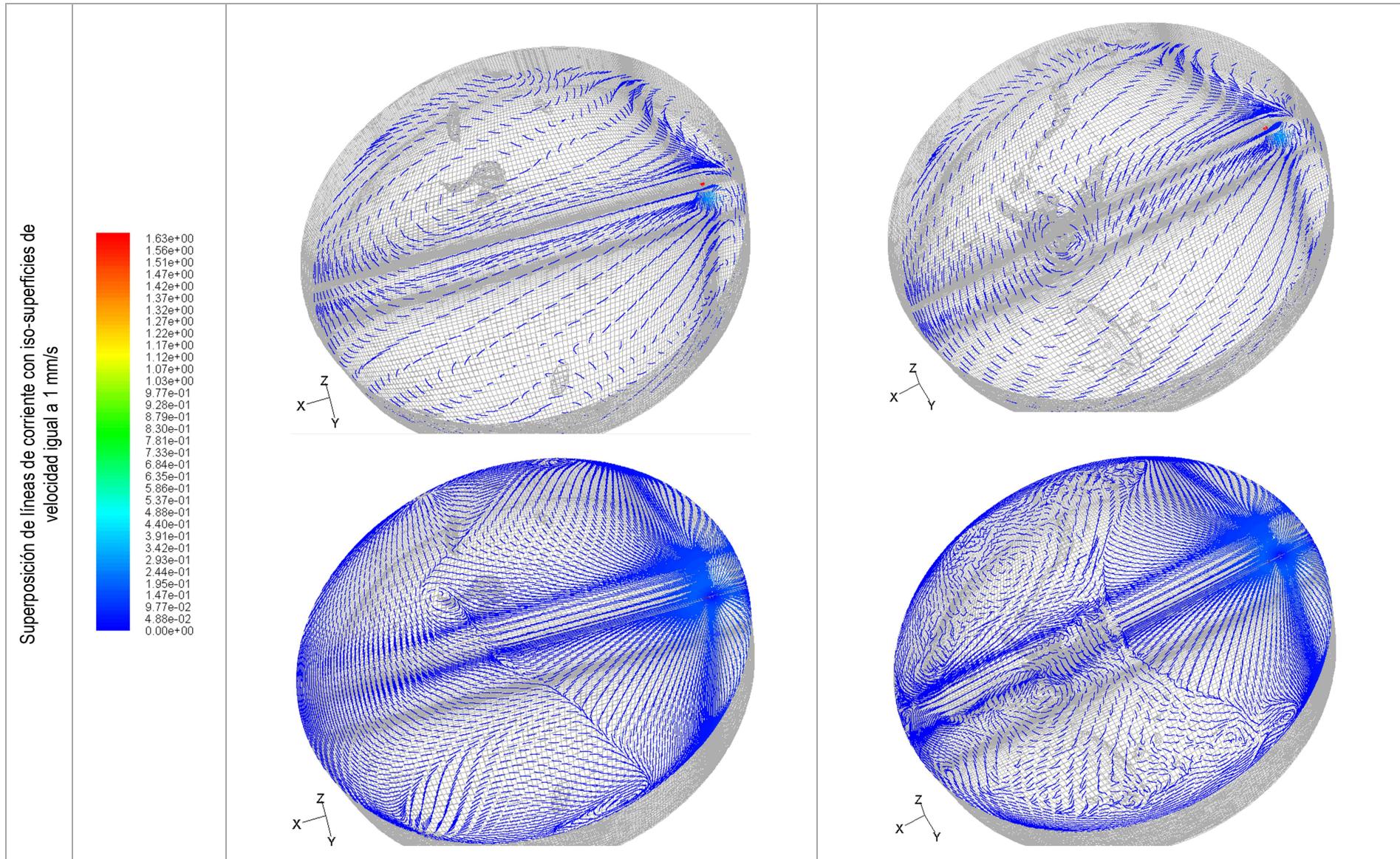


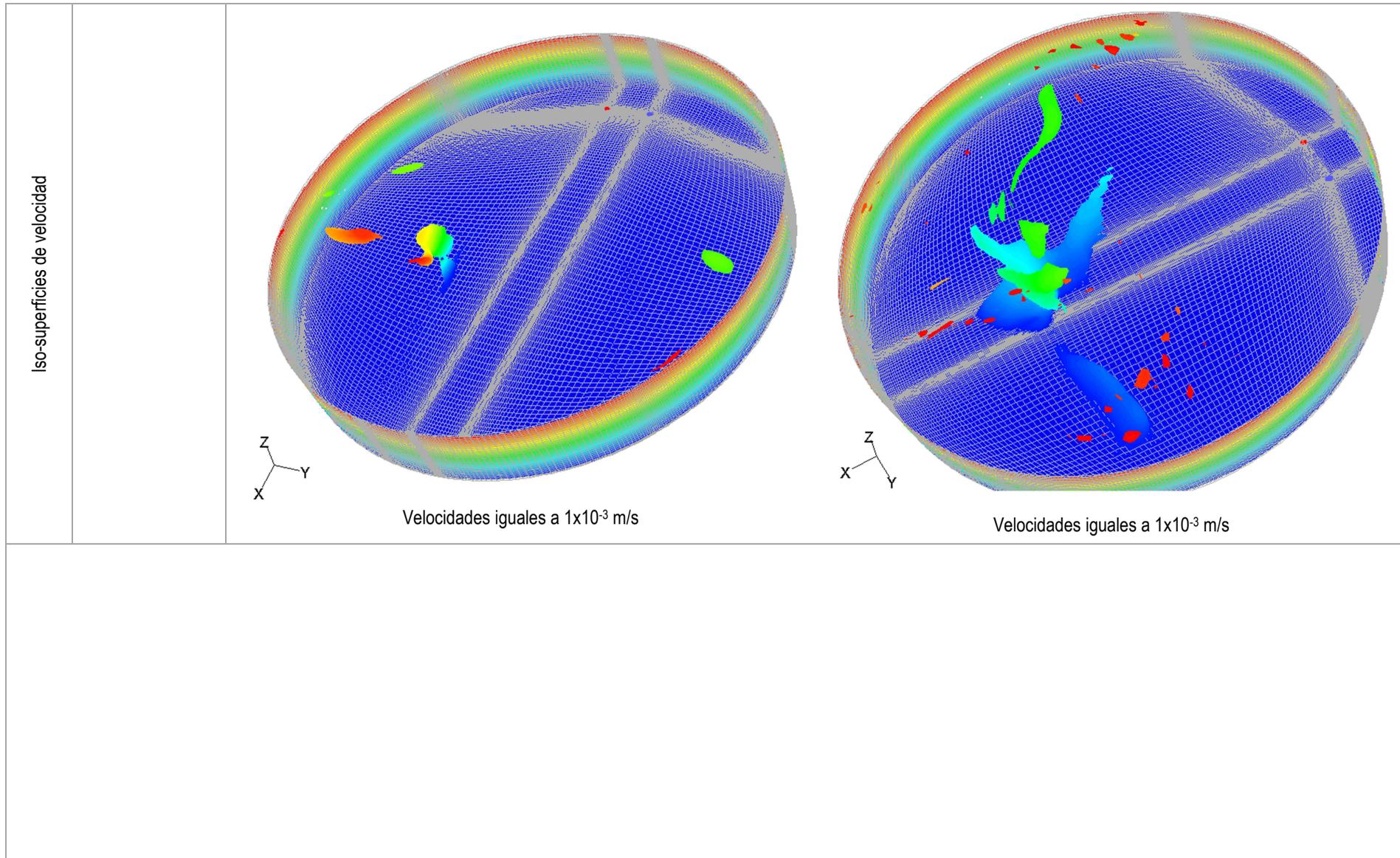




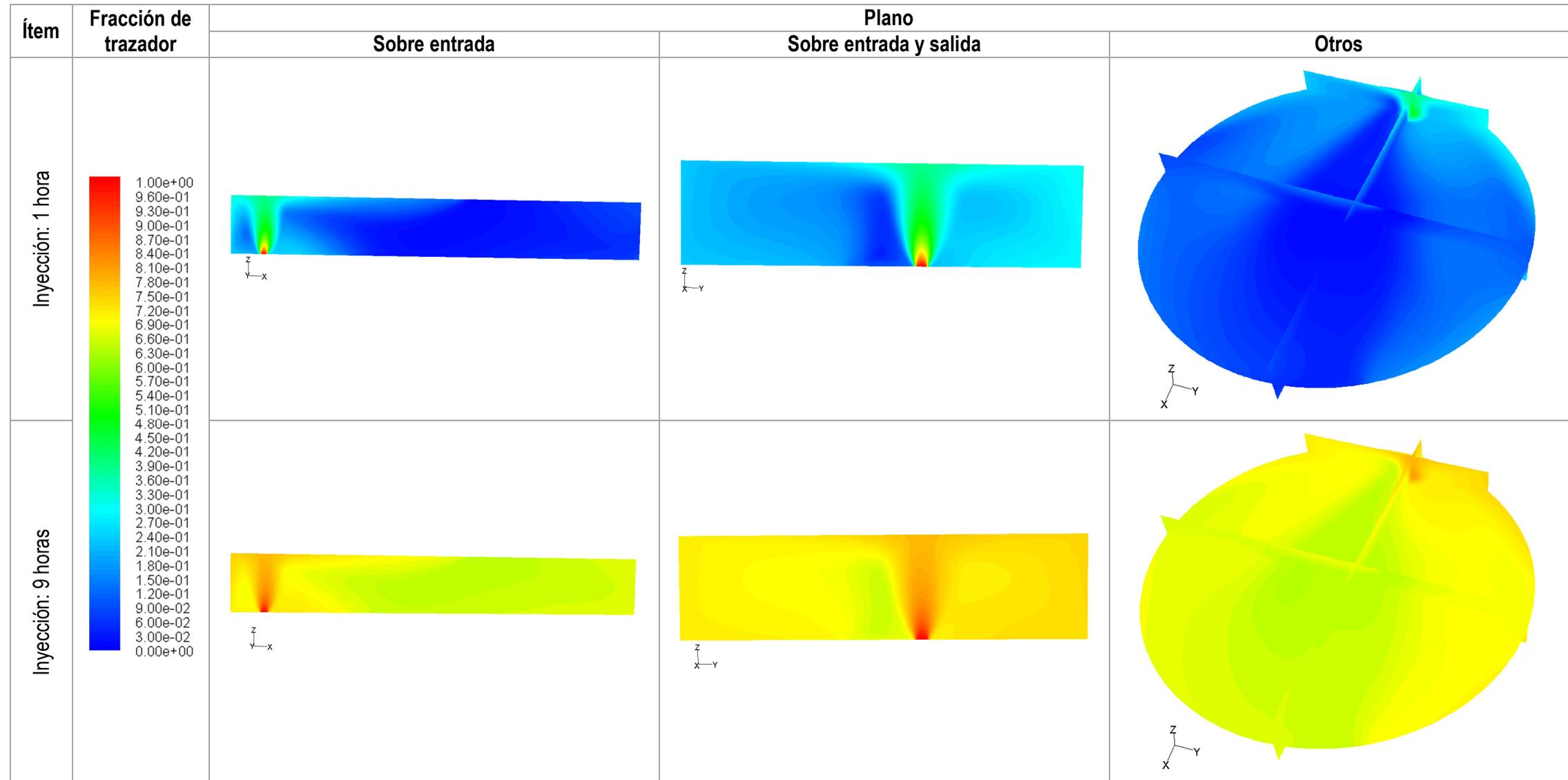


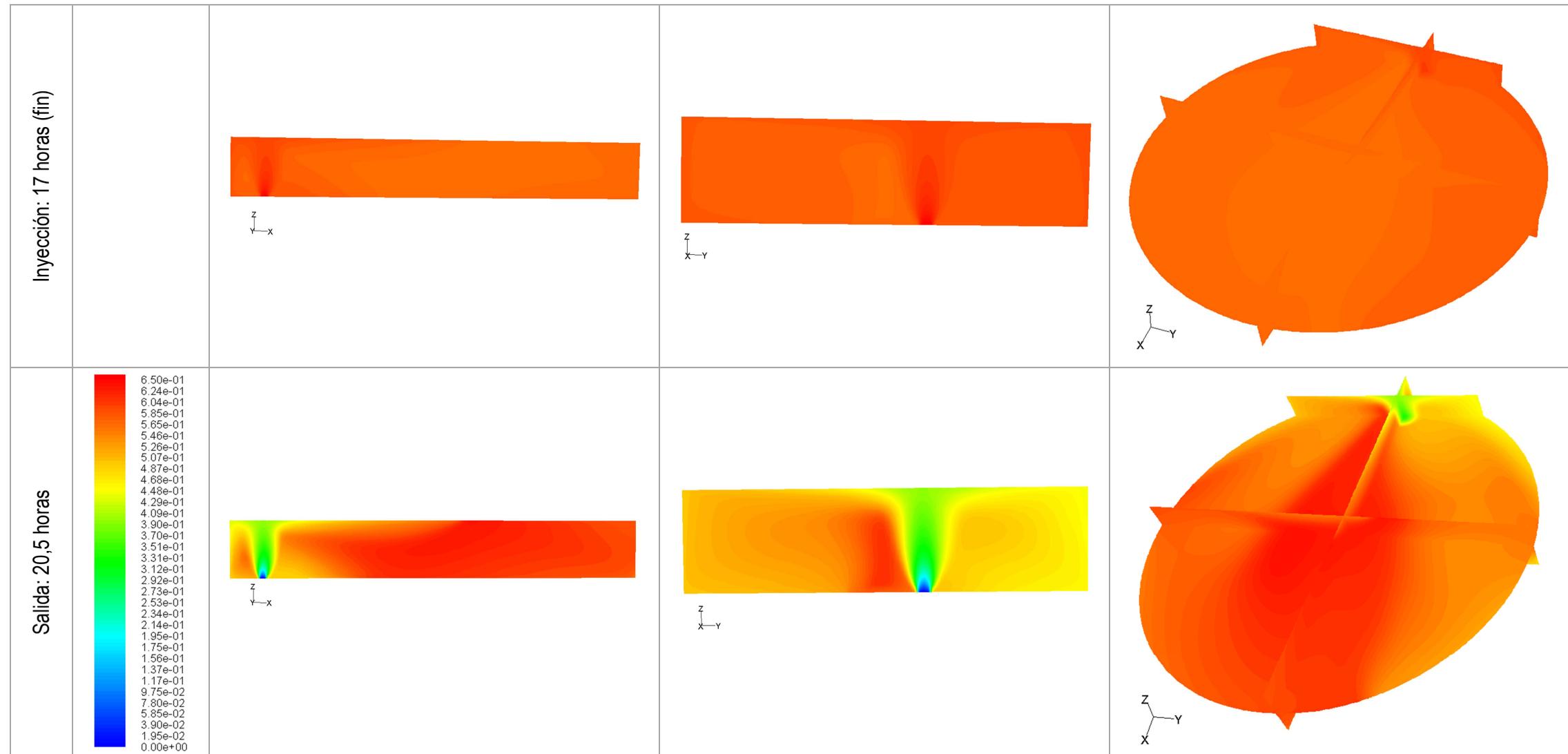




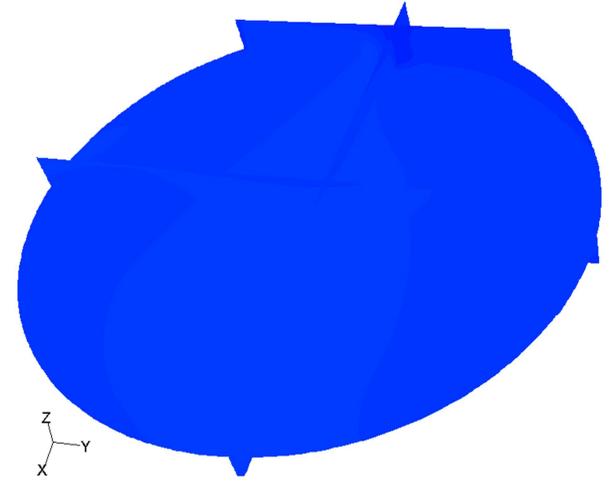
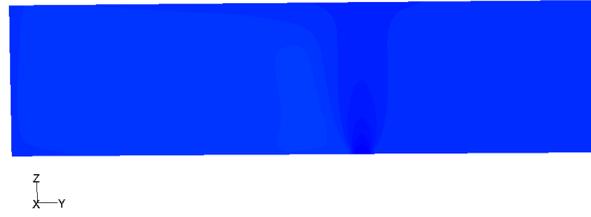


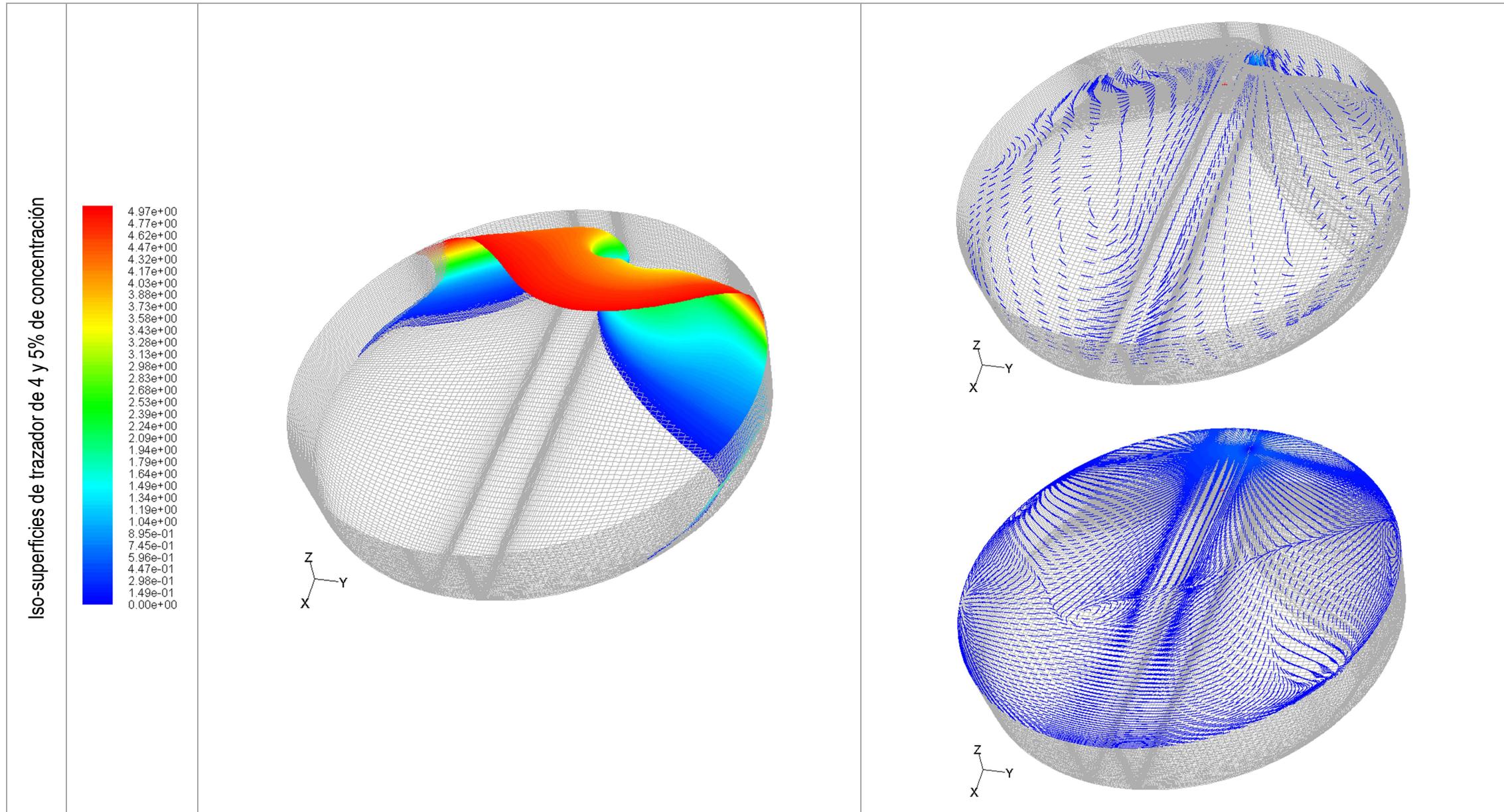
Mezcla de trazador: sin flotabilidad



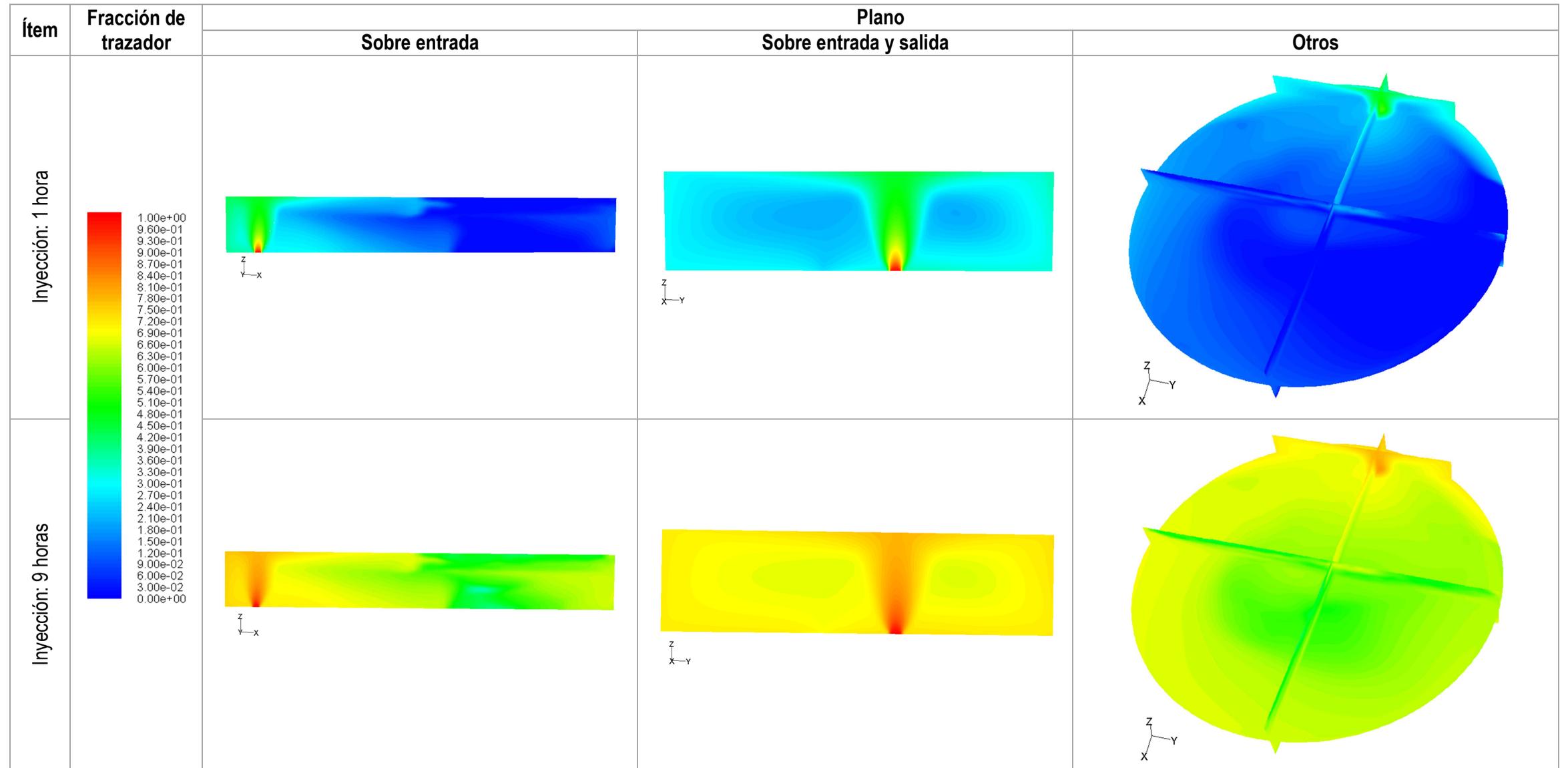


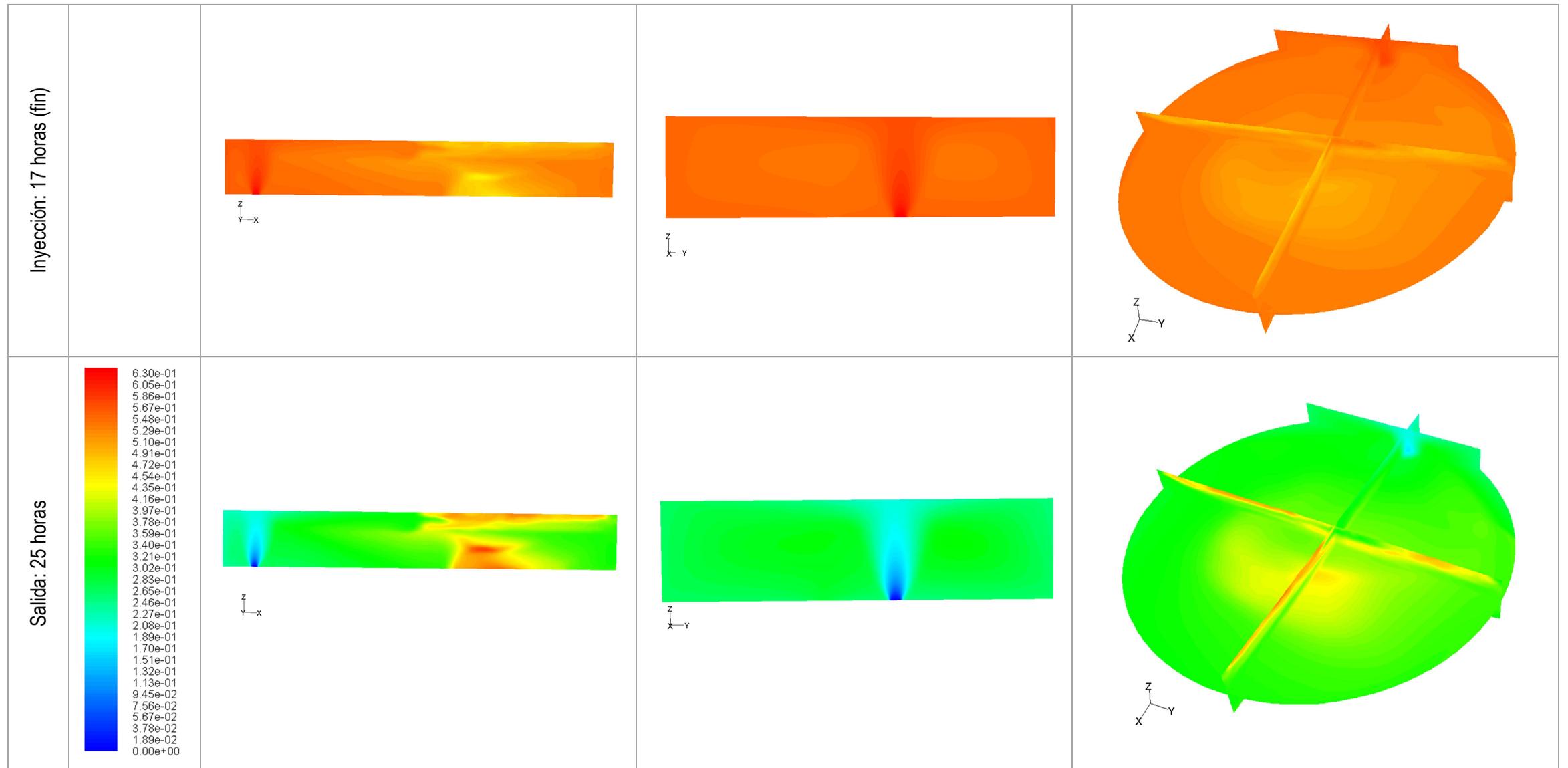
Salida: 40,5 horas (remanente del 5% del trazador)

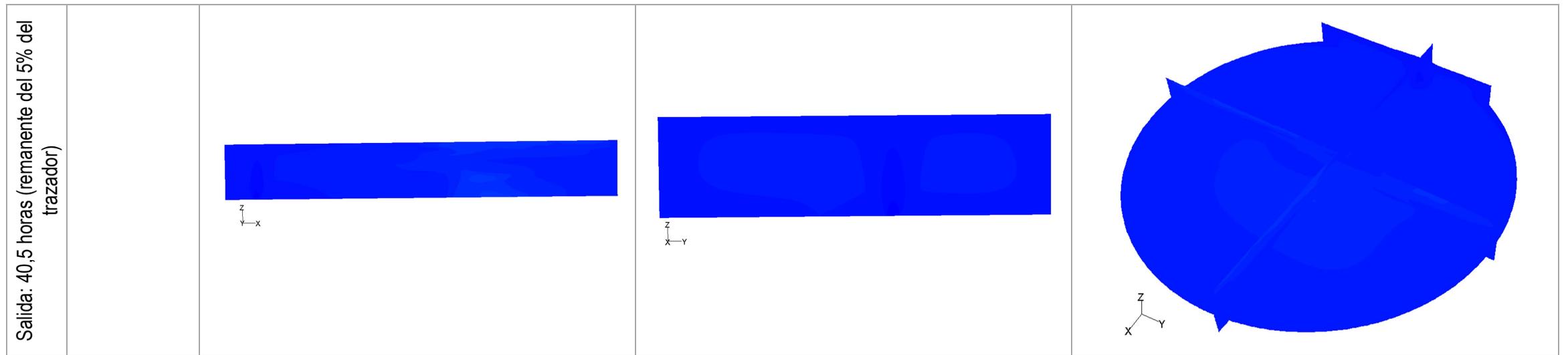


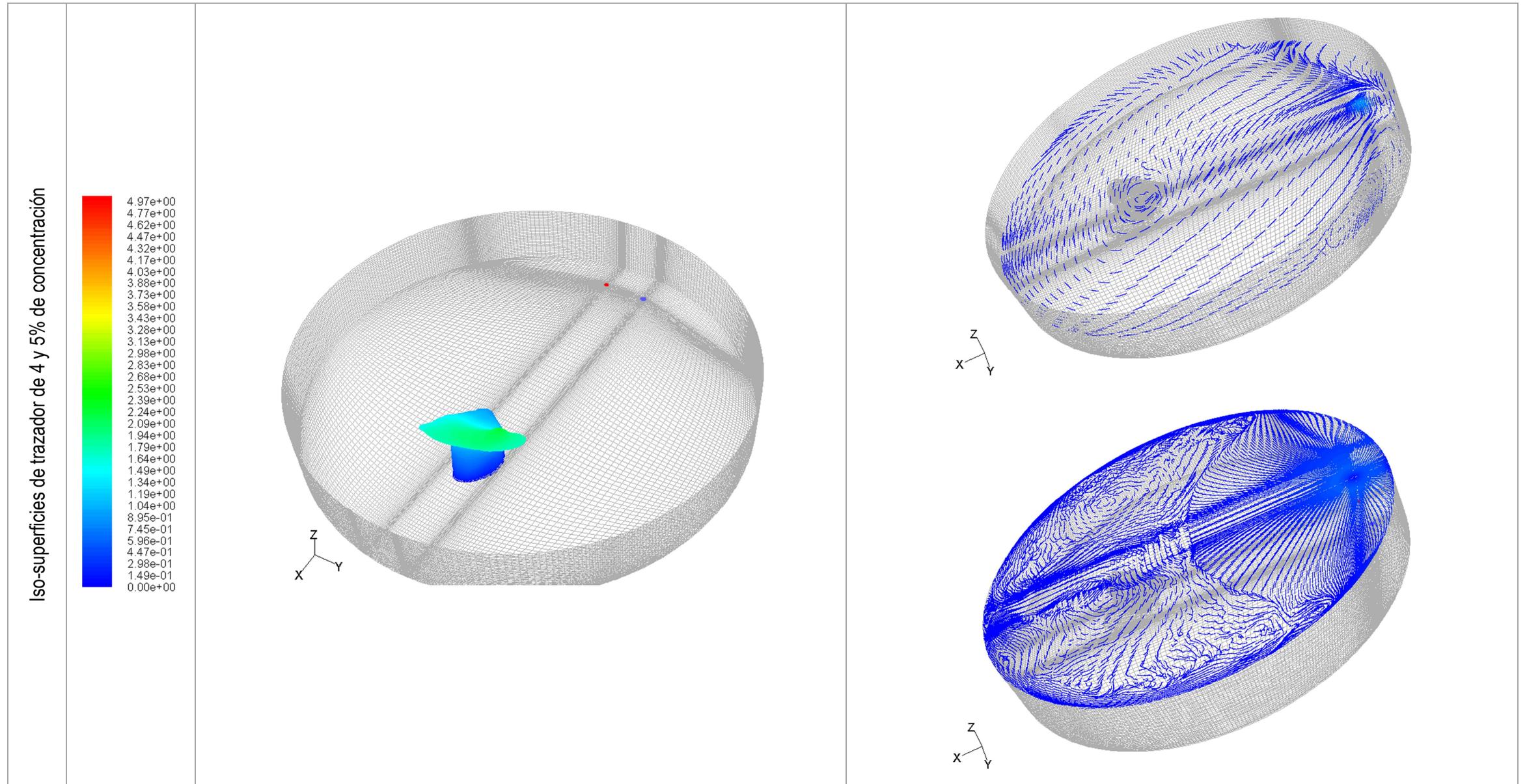


Mezcla de trazador: con flotabilidad

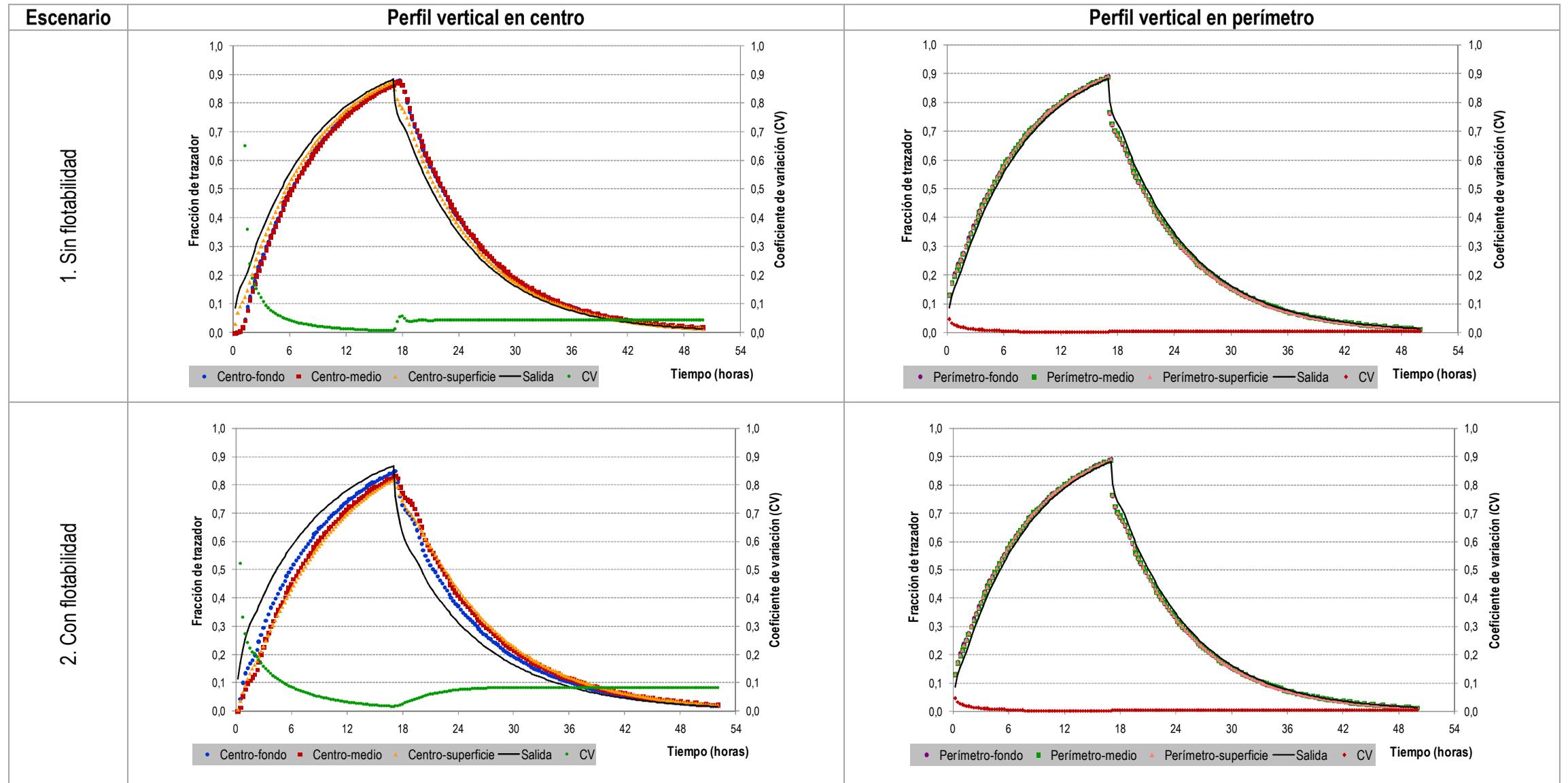




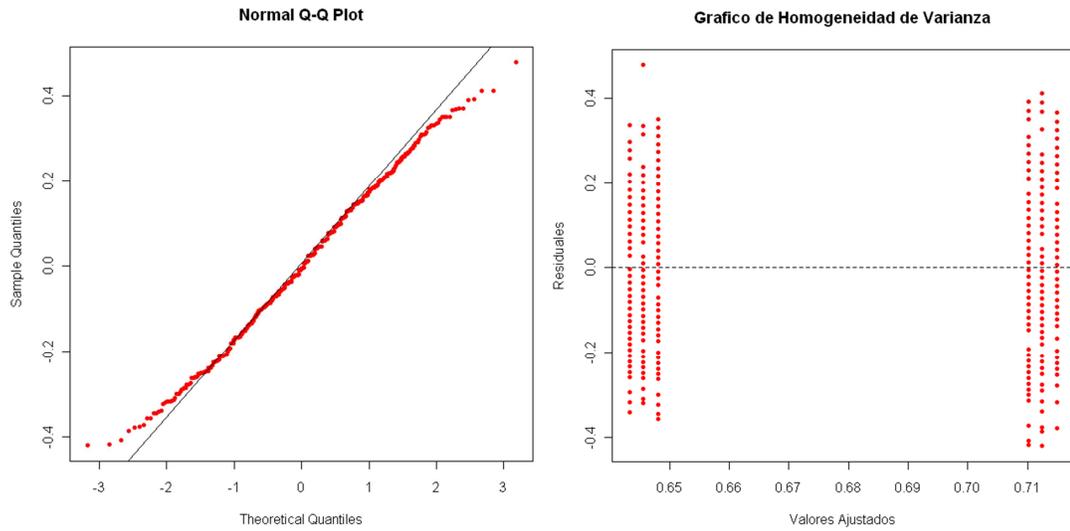




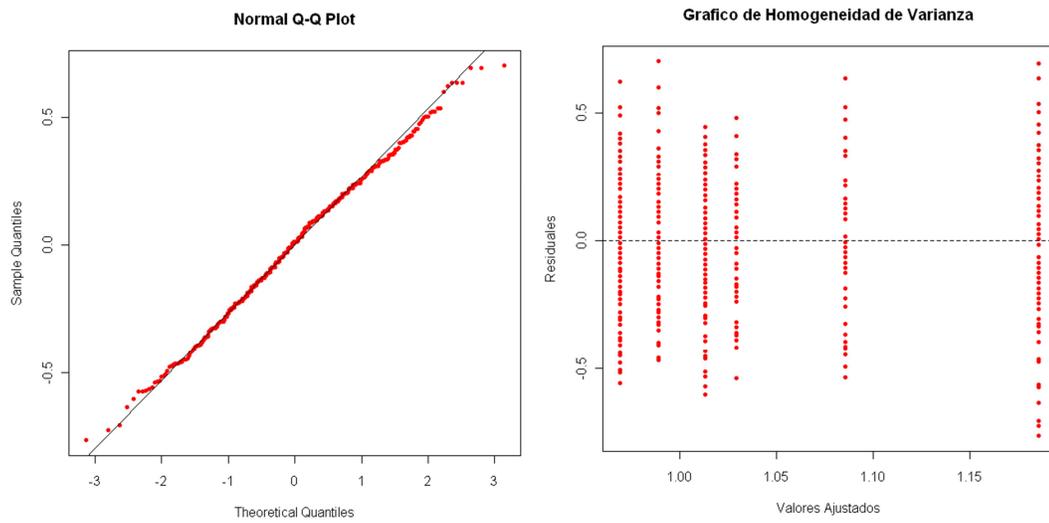
■ *Perfiles verticales de trazador*



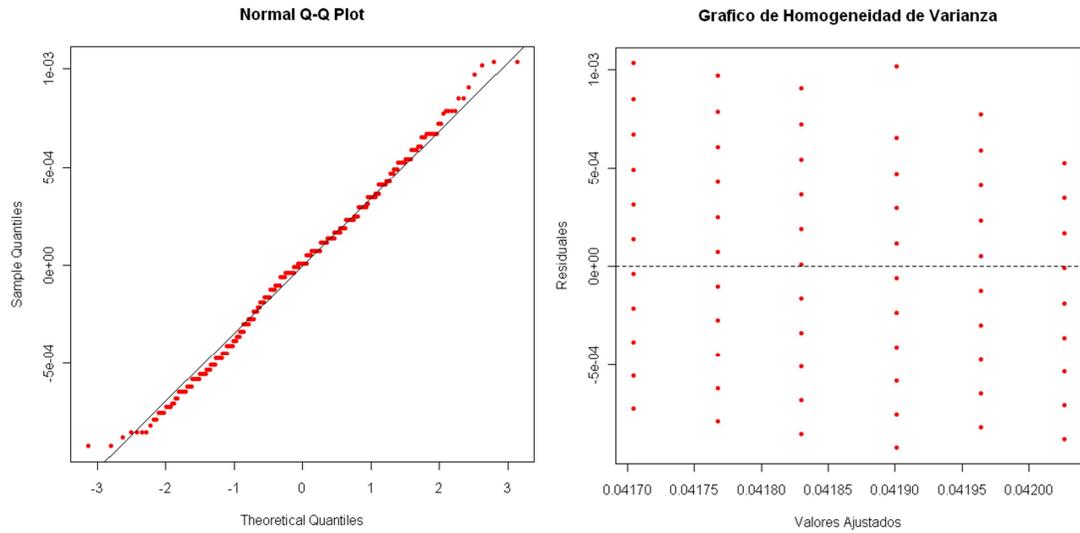
Anexo C: Validación de supuestos estadísticos



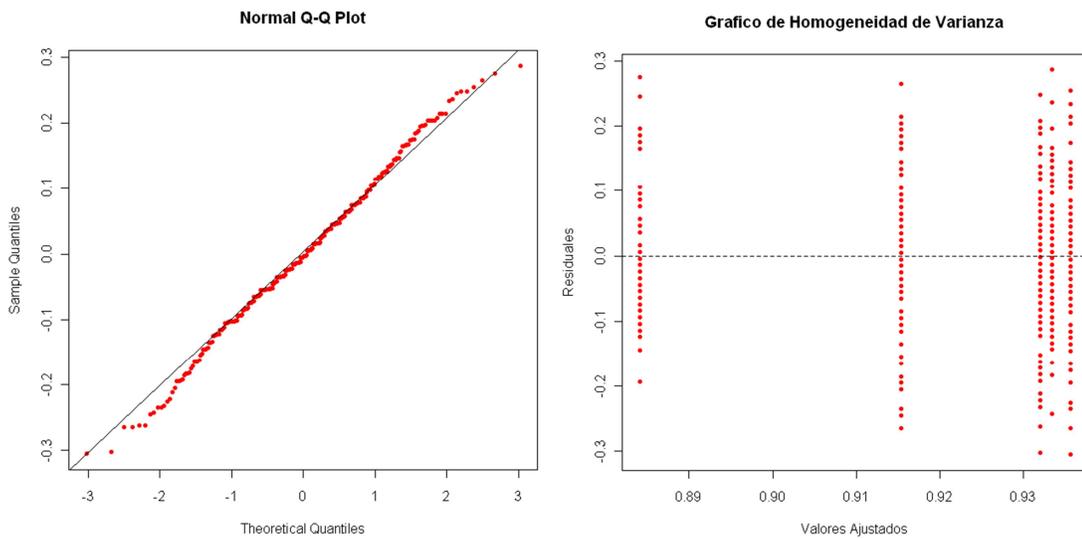
Gráficos de normalidad y de homogeneidad de varianzas para la variable Cloro llenado TN2



Gráficos de normalidad y de homogeneidad de varianzas para la variable Cloro vaciado TN2



Gráficos de normalidad y de homogeneidad de varianzas para la variable Cloro vaciado TCJ2



Gráficos de normalidad y de homogeneidad de varianzas para la variable Temperatura llenado TCJ2

Anexo D: Resultados de análisis estadístico de variables temperatura y cloro

1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DE TEMPERATURA Y CLORO EN TANQUE CIUDAD JARDÍN 2

1.1 ANÁLISIS PARÁMETRICO

1.1.1 Temperatura - periodo de llenado

Para esta variable se evidenció la necesidad de aplicar la transformación inversa para validar correctamente los supuestos. En la siguiente tabla se muestra el análisis de varianza para la variable cloro en el ciclo de llenado:

Temperatura Llenado – Tanque Ciudad Jardín			
Valor-P	ANOVA	Posición	2.61E-10*
		Profundidad	0.00338*
		Posición*Profundidad	0.26666

*Factor significativo a un nivel de 5%

La hipótesis nula de que no hay diferencias entre los efectos de la interacción de los factores no se rechaza a un nivel de significancia de 5% ($\text{Valor-p}=0.26663>0,05$), por consiguiente la interacción entre los factores no es significativa y debe de formularse de nuevo el modelo sin incluirla.

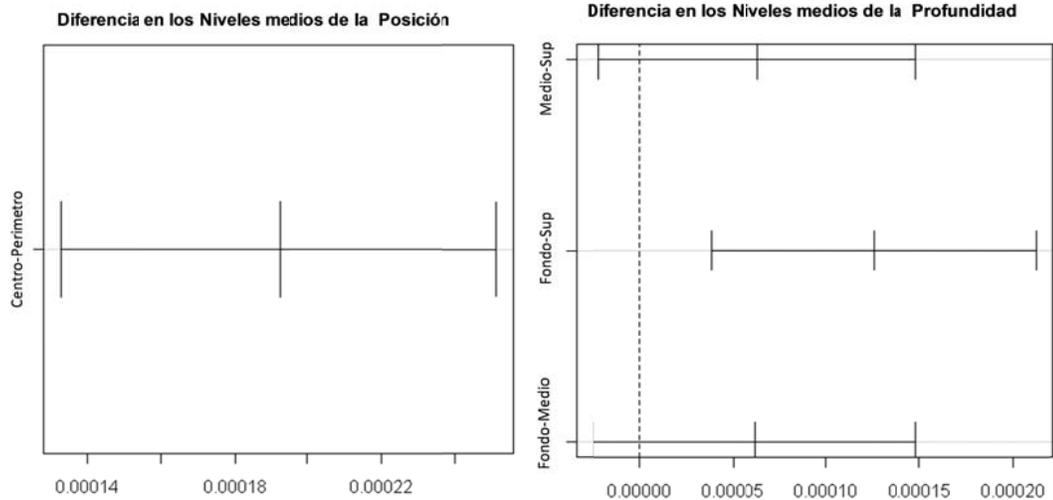
Temperatura Llenado – Tanque Ciudad Jardín			
Valor-P	ANOVA	Posición	2.66E-10*
		Profundidad	0.003408*
	Supuestos	Normalidad	0.05264
		Homogeneidad de Varianzas	0.723

*Factor significativo a un nivel de 5%

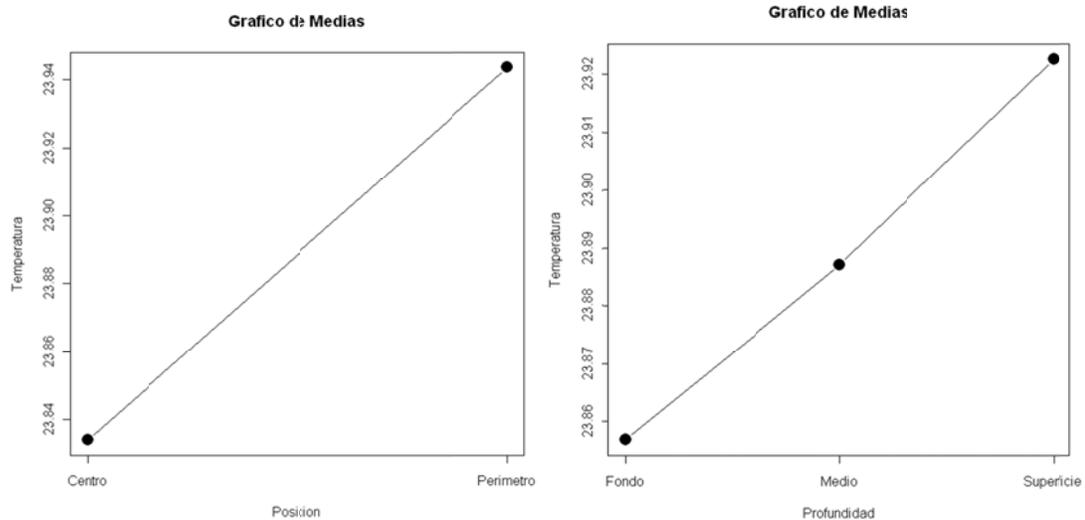
Como se verifico, los supuestos en los cuales se basa el ANOVA se validaron satisfactoriamente y por consiguiente se deben verificar las hipótesis sobre los factores. La hipótesis nula de que no hay diferencias entre los niveles del factor Posición Radial se rechaza a un nivel de significancia del 5% ($\text{Valor-p}=0<0,05$), lo mismo sucede para el factor Profundidad, donde se encuentran diferencias significativas entre sus niveles ($\text{Valor-p}=0,003408<0,05$). A continuación se mostraran las pruebas de comparación múltiple para determinar entre cuales tratamientos existen diferencias.

Prueba de Comparación Múltiple de Tukey						
Factor	Niveles a comparar	Medias Originales	Medias Transformadas	Diferencia	Valor-P	
Posición	Perímetro-Centro	24.001-23.876	0.04171-0.04192	1.92E-04	0.000*	
	Profundidad	Medio-Superficie	23.914-23.970	0.04186-0.04176	6.32E-05	0.187
		Fondo-Superficie	23.885-23.970	0.04191-0.04176	1.25E-04	0.002*
		Fondo-Medio	23.885-23.914	0.04191-0.04186	6.20E-05	0.210

*Diferencia significativa a un nivel del 5%



Los resultados anteriores indican que existen diferencias a un nivel de significancia del 5% entre los dos niveles del factor Posición Radial, así como también existen diferencias los niveles Fondo y Superficie del factor Profundidad.



En los anteriores gráficos se observa que los valores más bajos de Temperatura se encontraron en los puntos de muestreo del Centro y del Fondo, mientras los valores más altos se encontraron en los puntos de muestreo del Perímetro y de la Superficie del tanque de almacenamiento.

1.1.2 Cloro - periodo de vaciado

Para esta variable se evidencio la necesidad de aplicar la transformación cuadrática para validar correctamente los supuestos. En la siguiente tabla se muestra el análisis de varianza para la variable cloro en el ciclo de vaciado:

Cloro Vaciado – Tanque Ciudad Jardín			
		Posición	3.663E-7*
Valor-P	ANOVA	Profundidad	0.9566
		Posición*Profundidad	0.8004

*Factor significativo a un nivel de 5%

La hipótesis nula de que no hay diferencias entre los efectos de la interacción de los factores no se rechaza a un nivel de significancia de 5% (Valor-p=0.8004>0,05), por consiguiente la interacción entre los factores no es significativa y debe de formularse de nuevo el modelo sin incluirla.

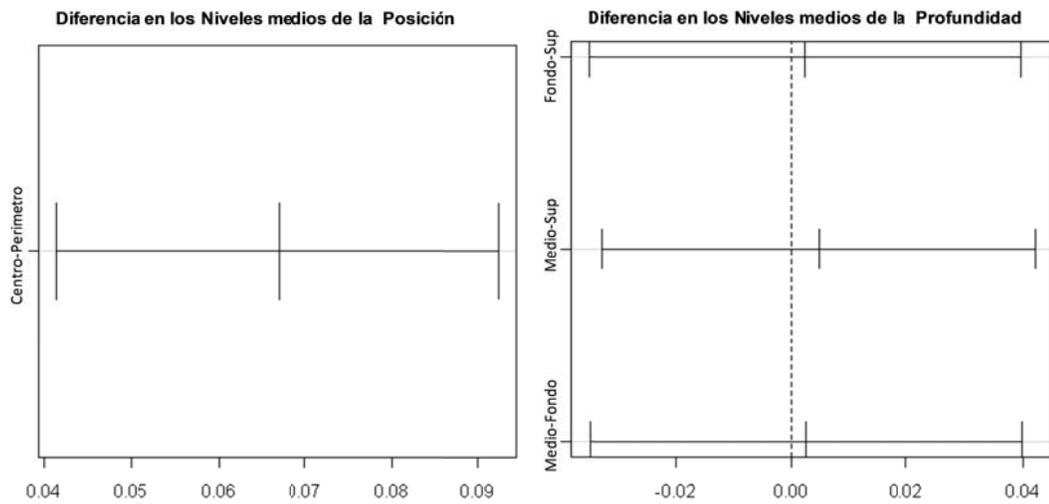
Cloro Vaciado – Tanque Ciudad Jardín			
		Posición	3.549E-9*
	ANOVA	Profundidad	0.9565
Valor-P		Normalidad	0.06838
	Supuestos	Homogeneidad de Varianzas	0.324

*Factor significativo a un nivel de 5%

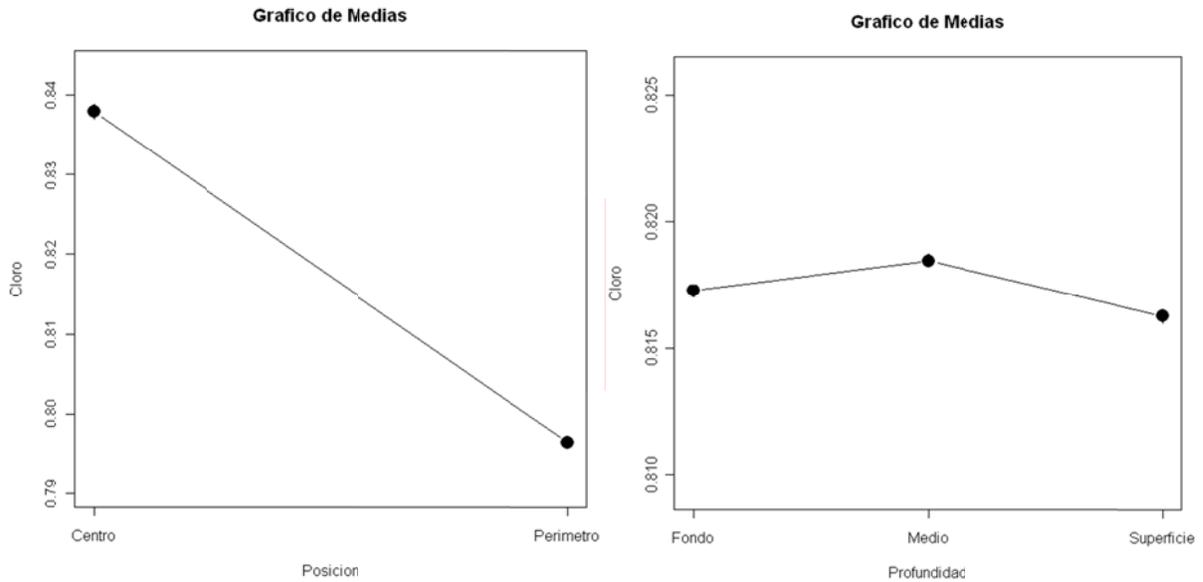
Como se verificó, los supuestos en los cuales se basa el ANOVA se validaron satisfactoriamente y por consiguiente se deben verificar las hipótesis sobre los factores. La hipótesis nula de que no hay diferencias entre los niveles del factor Posición Radial se rechaza a un nivel de significancia del 5% (Valor-P=0<0,05), mientras que para el factor Profundidad se evidencia que no existen diferencias significativas entre sus niveles (Valor-p=0,9565>0,05). A continuación se mostrarán las pruebas de comparación múltiple para determinar entre cuales tratamientos existen diferencias significativas.

Prueba de Comparación Múltiple de Tukey					
Factor	Niveles a comparar	Medias Originales	Medias Transformadas	Diferencia	Valor-P
Posición	Centro-Perímetro	0.838-0.796	0.712-0.646	0.067	4E-07*
	Profundidad				
Profundidad	Fondo-Superficie	0.817-0.816	0.679-0.677	0.002	0.989
	Medio-Superficie	0.818-0.816	0.682-0.677	0.005	0.952
	Medio-Fondo	0.818-0.817	0.682-0.679	0.002	0.987

*Diferencia significativa a un nivel del 5%



Los resultados anteriores indican que existen diferencias a un nivel de significancia del 5% entre los dos niveles del factor Posición Radial, mientras que para los niveles del factor Profundidad no se encontraron diferencias.



En los anteriores gráficos se observa que los valores más bajos de Cloro se encontraron en los puntos de muestreo de Perímetro, mientras que los valores más altos se encontraron en los puntos de muestreo del Centro del tanque de almacenamiento.

1.2 ANÁLISIS NO PARAMÉTRICO

En las siguientes tablas se presenta el consolidado de las pruebas de aleatorización para la variable temperatura y cloro y las medianas para cada modelo.

Variable	Ciclo	Distribución de referencia		
		Factor posición radial	Factor profundidad	Interacción de los factores
Temperatura	Vaciado	<p>Valor F percentil 95 = 3,90 * Valor F observado = 16,5239</p>	<p>Valor F percentil 95 = 3,02 Valor F observado = 1,7135</p>	<p>Valor F percentil 95 = 3,08 Valor F observado = 0,0032</p>
		Cloro	Llenado	<p>Valor F percentil 95 = 3,90 Valor F observado = 1,3024</p>

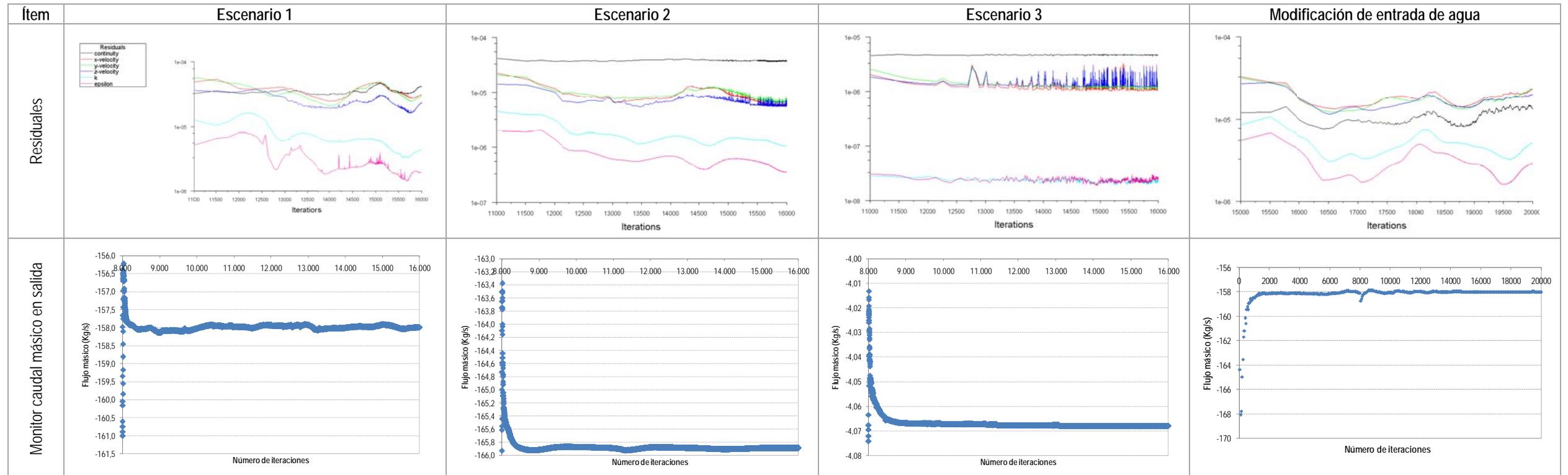
* Factor o interacción significativa a un nivel de significancia del 5%

Medianas de modelos analizados con prueba de aleatorización – Tanque Ciudad Jardín 2

Modelo	Media				
	Posición radial		Profundidad		
	Centro	Perímetro	Fondo	Medio	Superficie
Temperatura – vaciado (°C)	24,0	24,2	24,0	24,1	24,1
Cloro – llenado (mg/L)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93

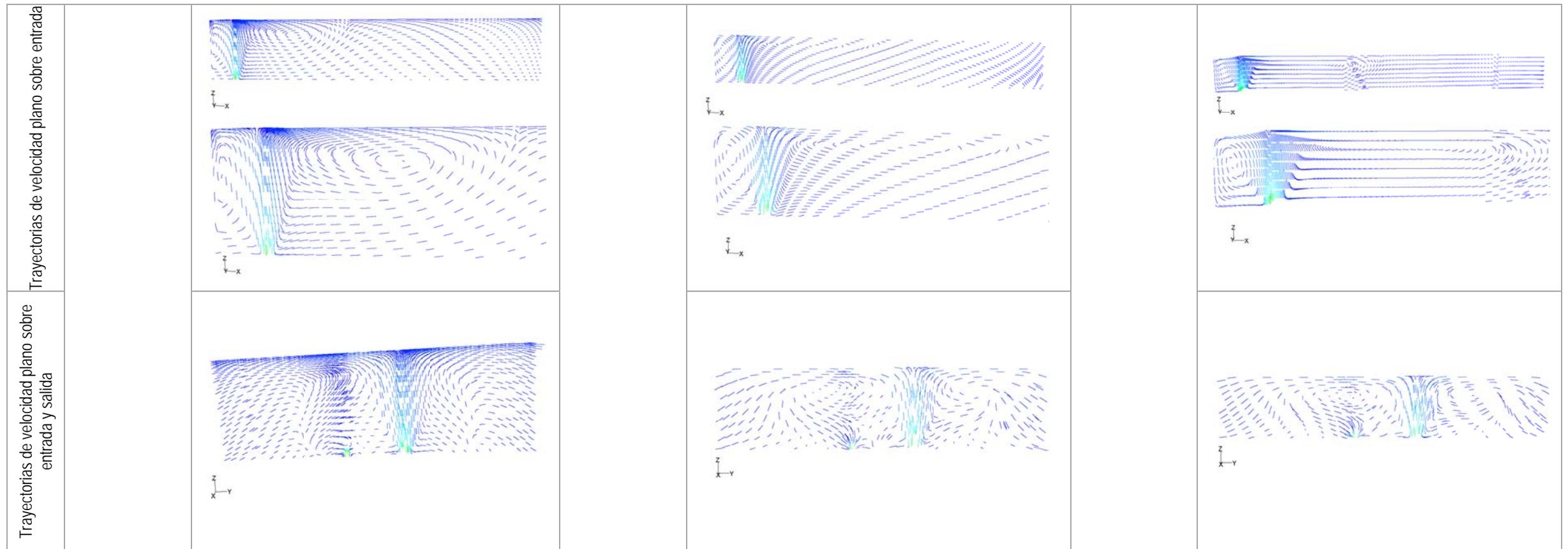
Anexo E: Resultados de simulaciones numéricas: patrón de flujo

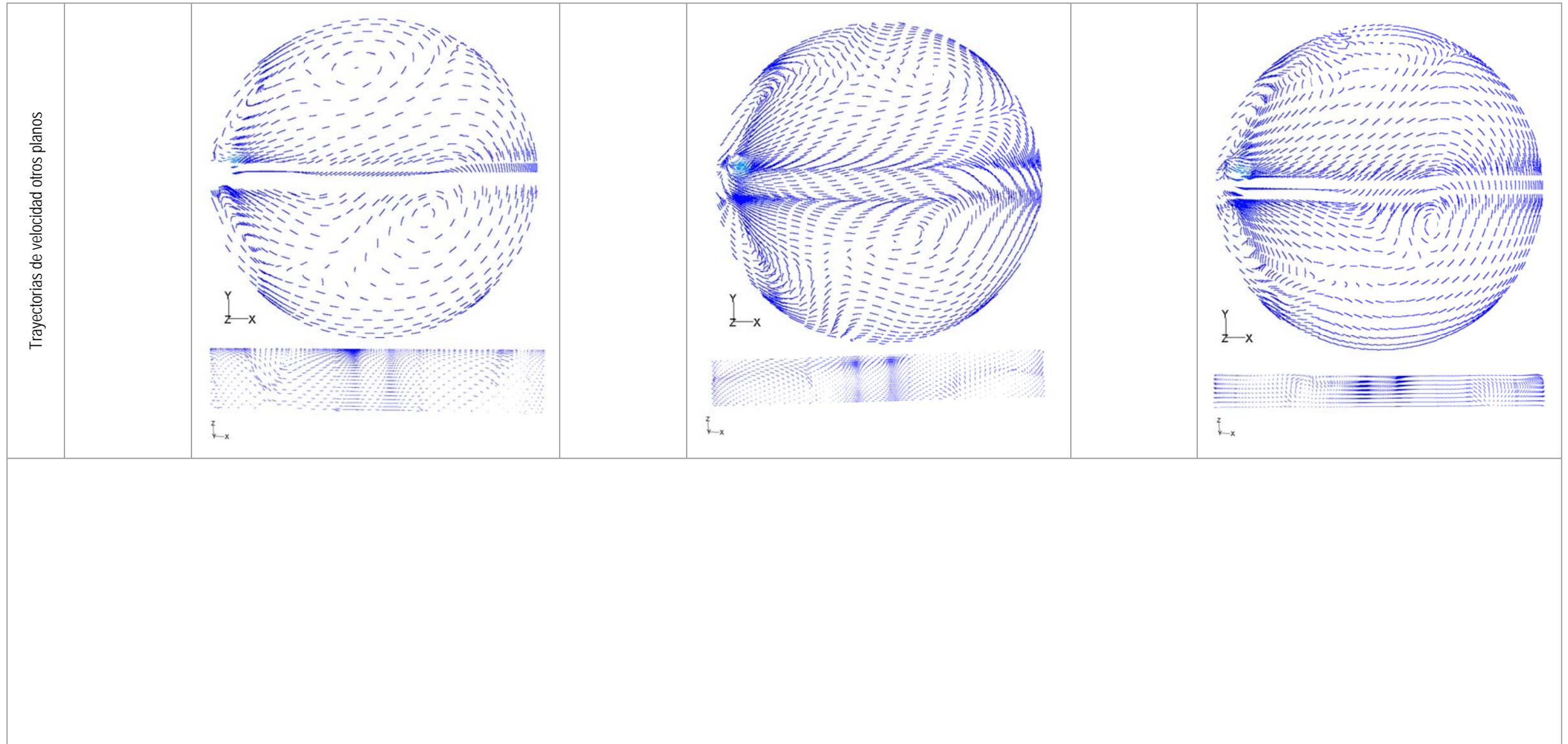
Controles de la solución

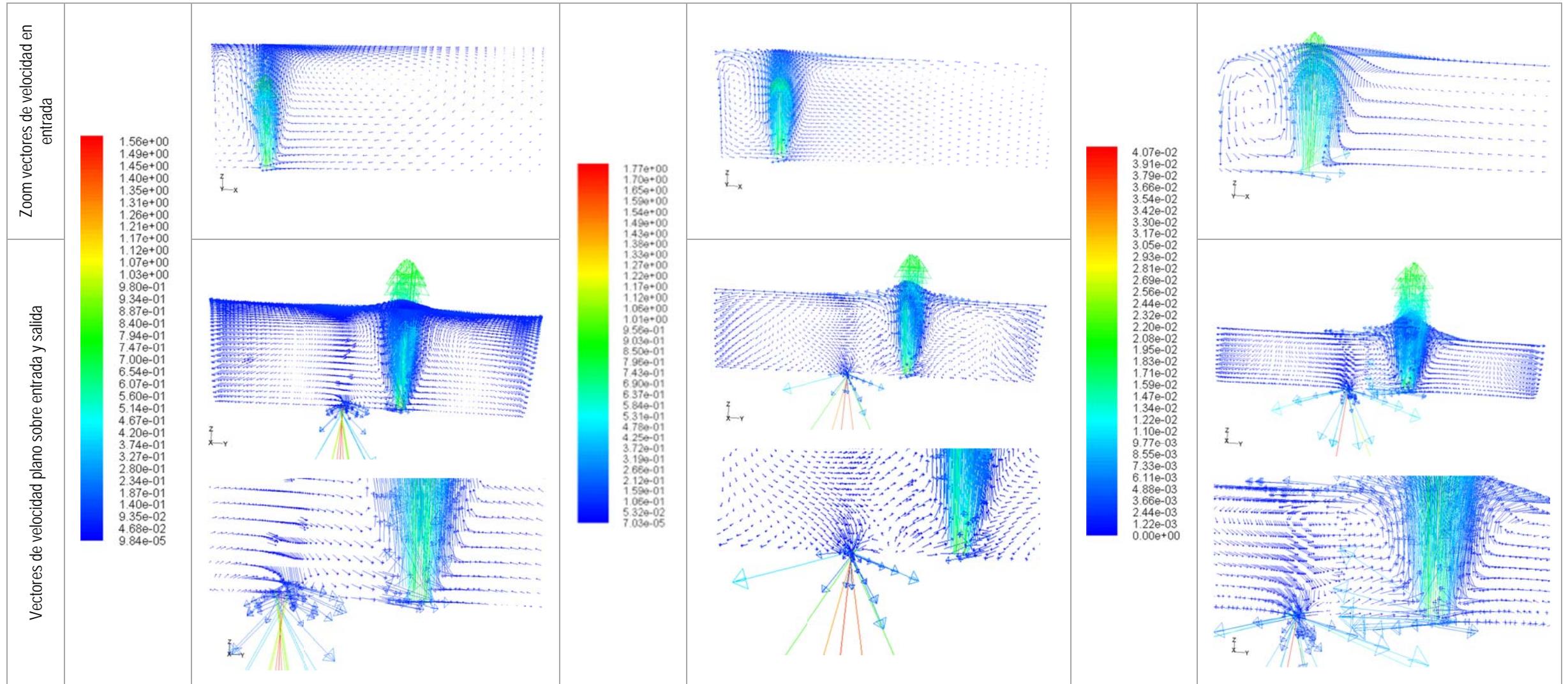


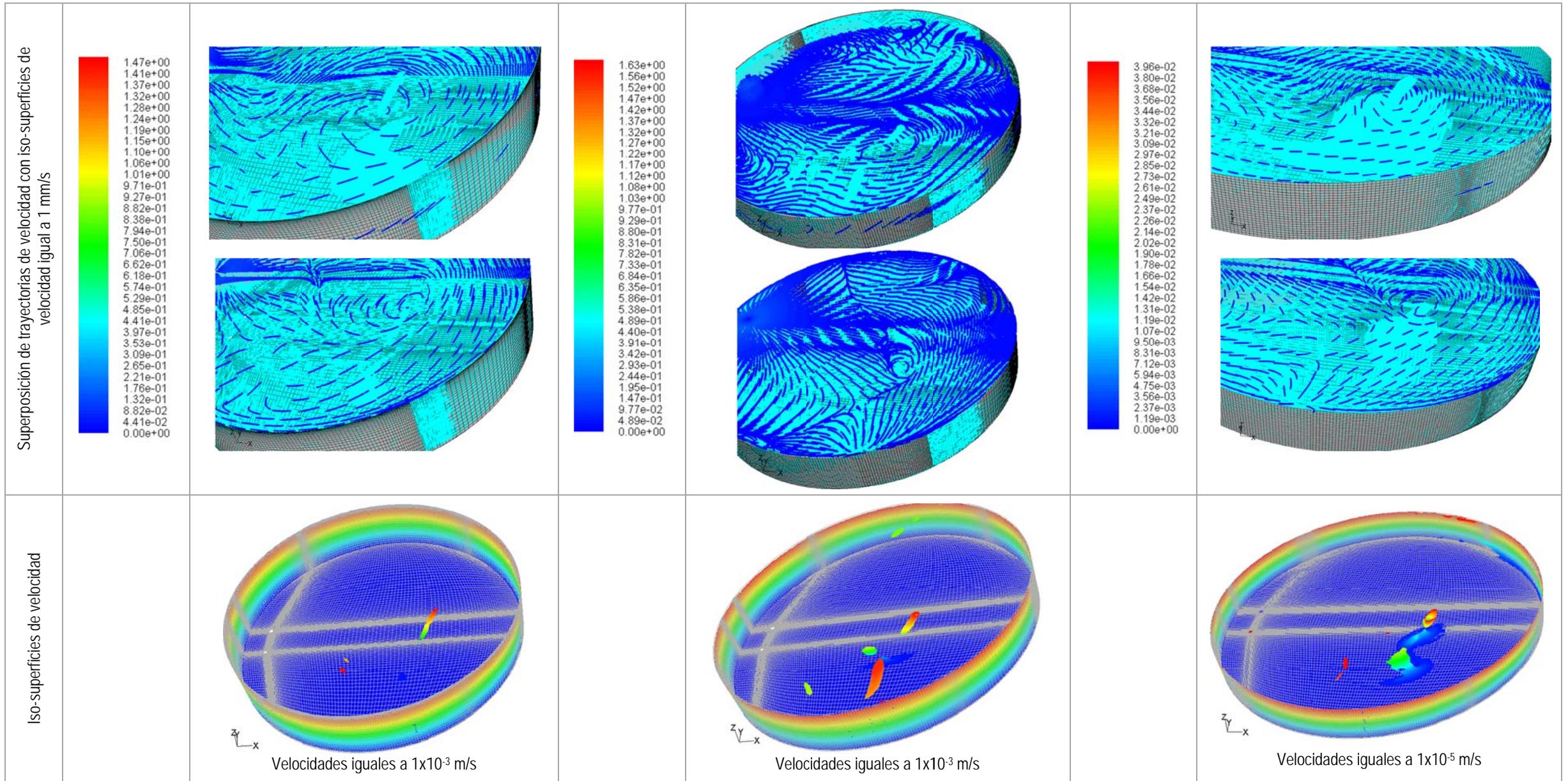
Contornos, vectores y trayectorias de velocidad

Ítem	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Velocidad (m/s)	Contornos	Velocidad (m/s)	Contornos	Velocidad (m/s)	Contornos
Contornos de velocidad - entrada y salida						
Contornos de velocidad plano sobre entrada						



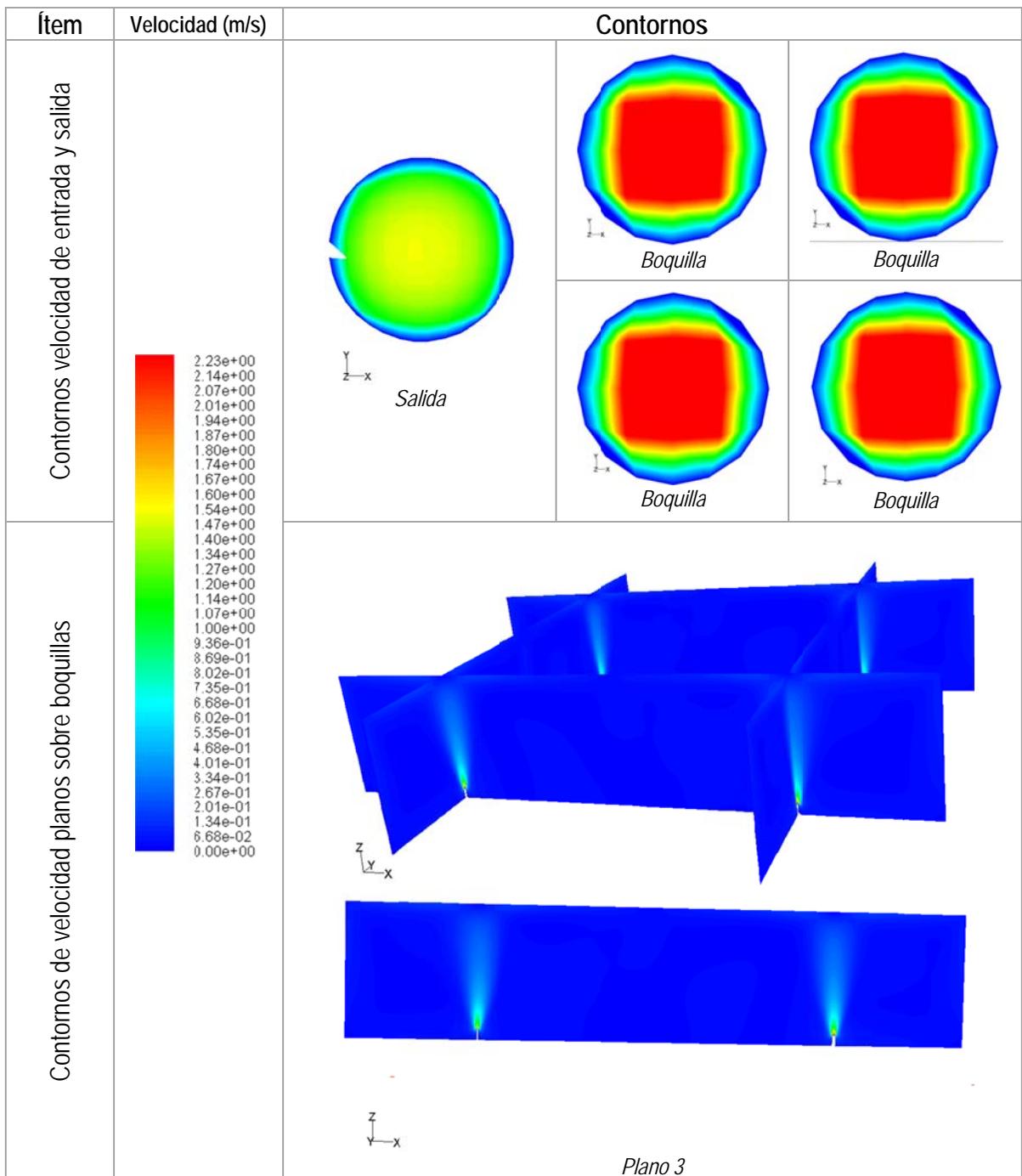


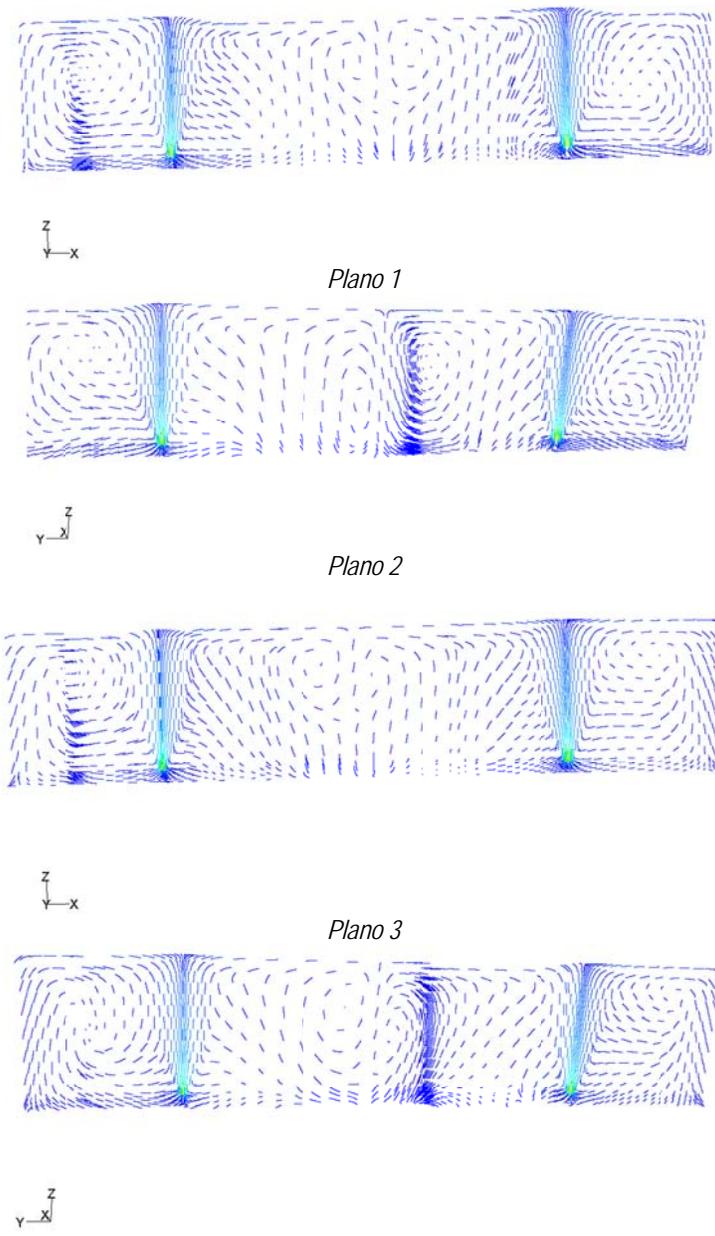
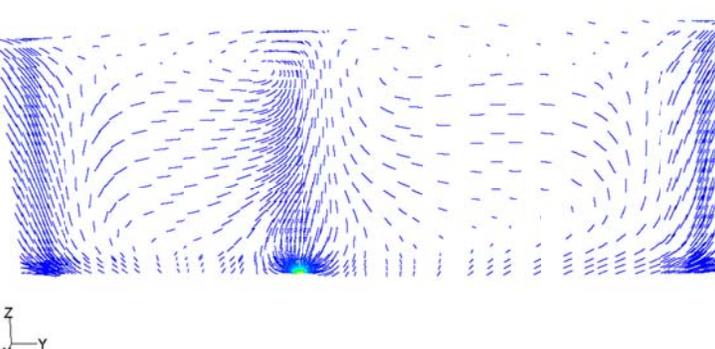
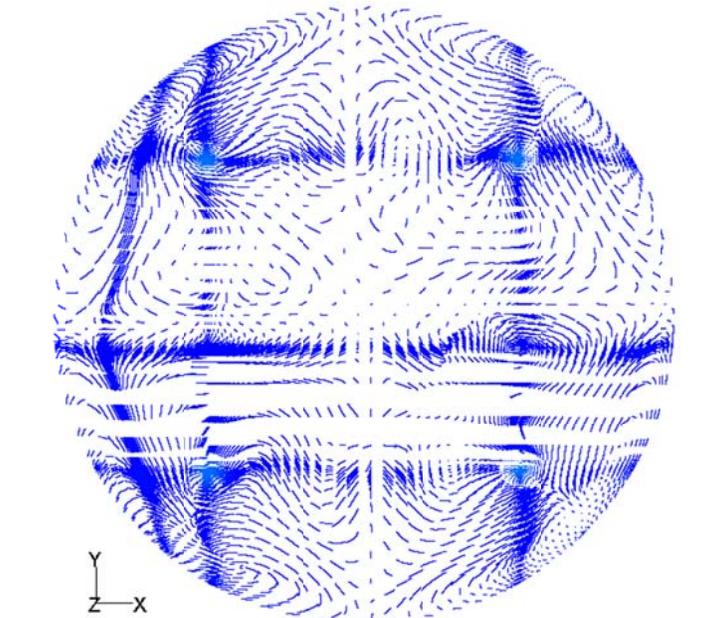


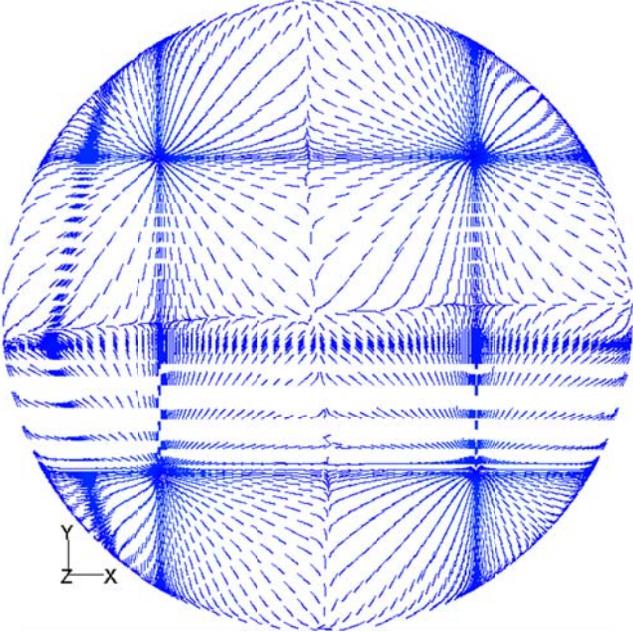
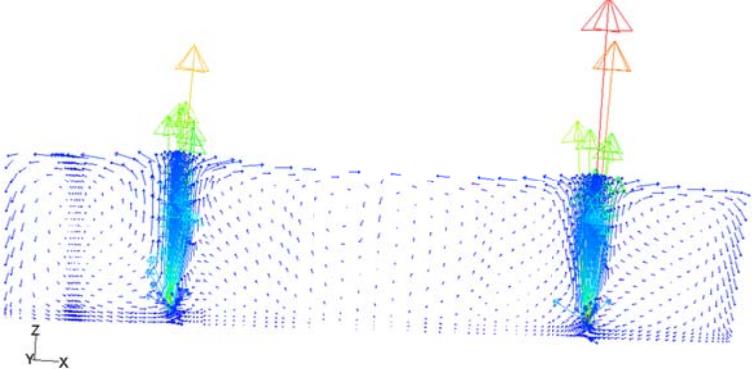
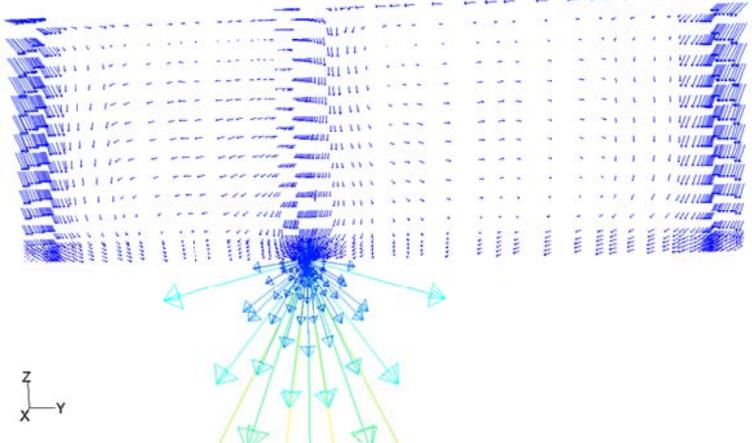
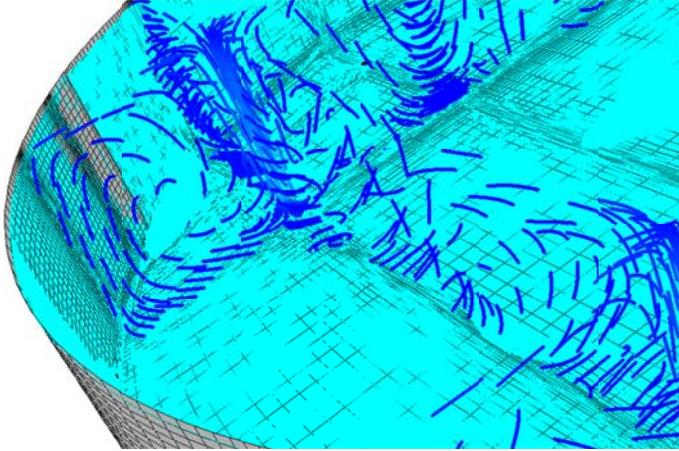


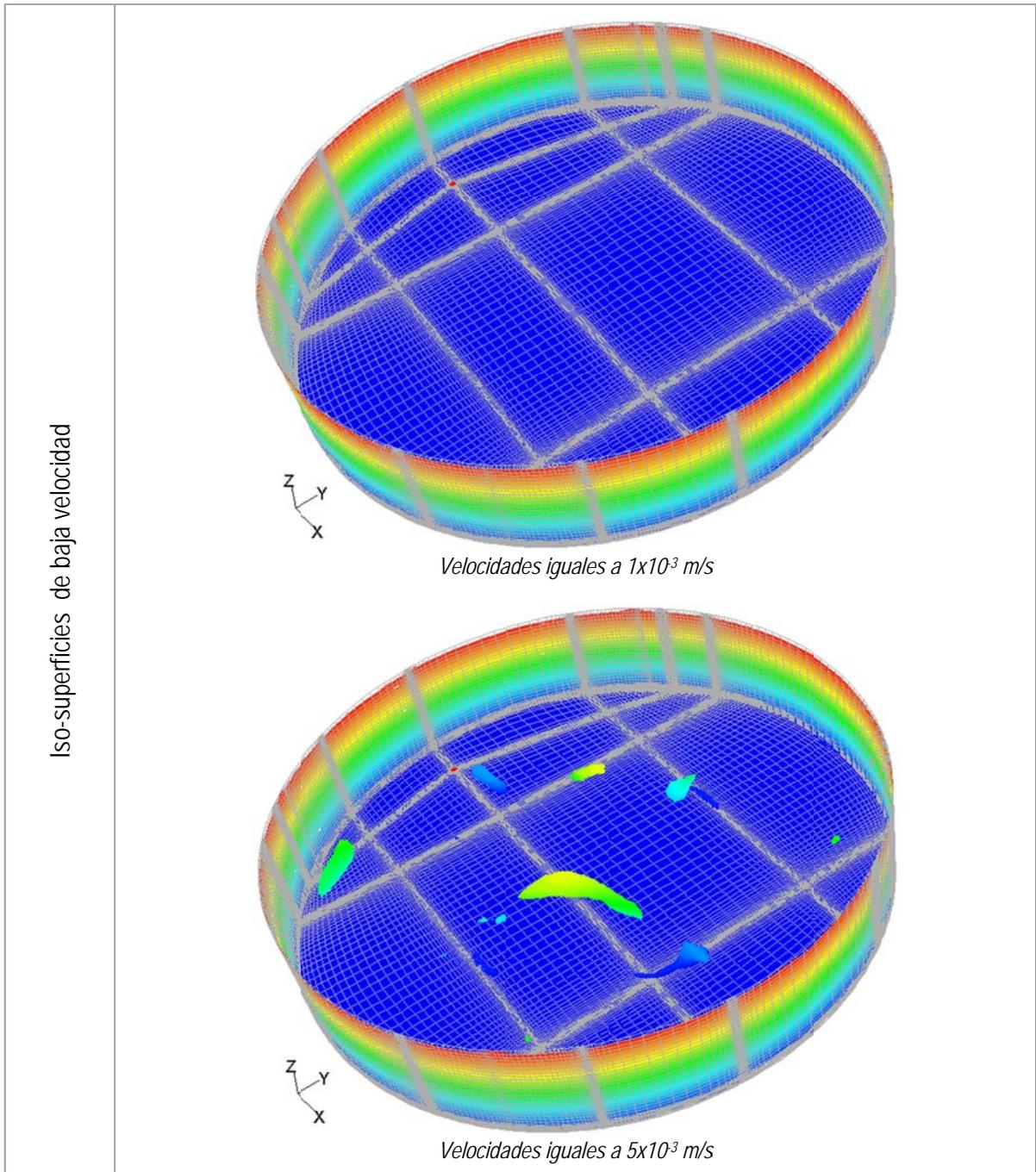
Modificación de entrada de agua

Contornos



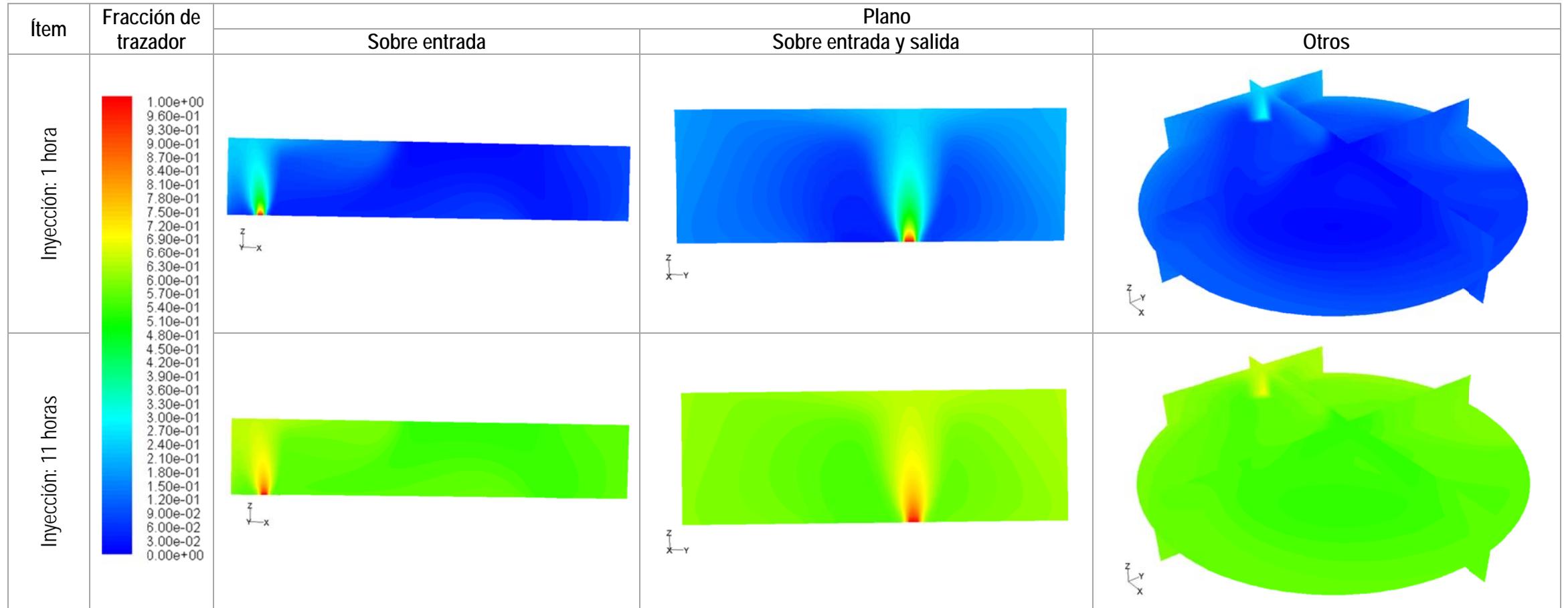
<p>Trayectorias de velocidad plano sobre entrada a tanque</p>		 <p>Plano 1</p> <p>Plano 2</p> <p>Plano 3</p> <p>Plano 4</p>
<p>Trayectorias de velocidad plano sobre entrada y salida</p>		
<p>Trayectorias de velocidad planos mitad nivel de agua</p>		

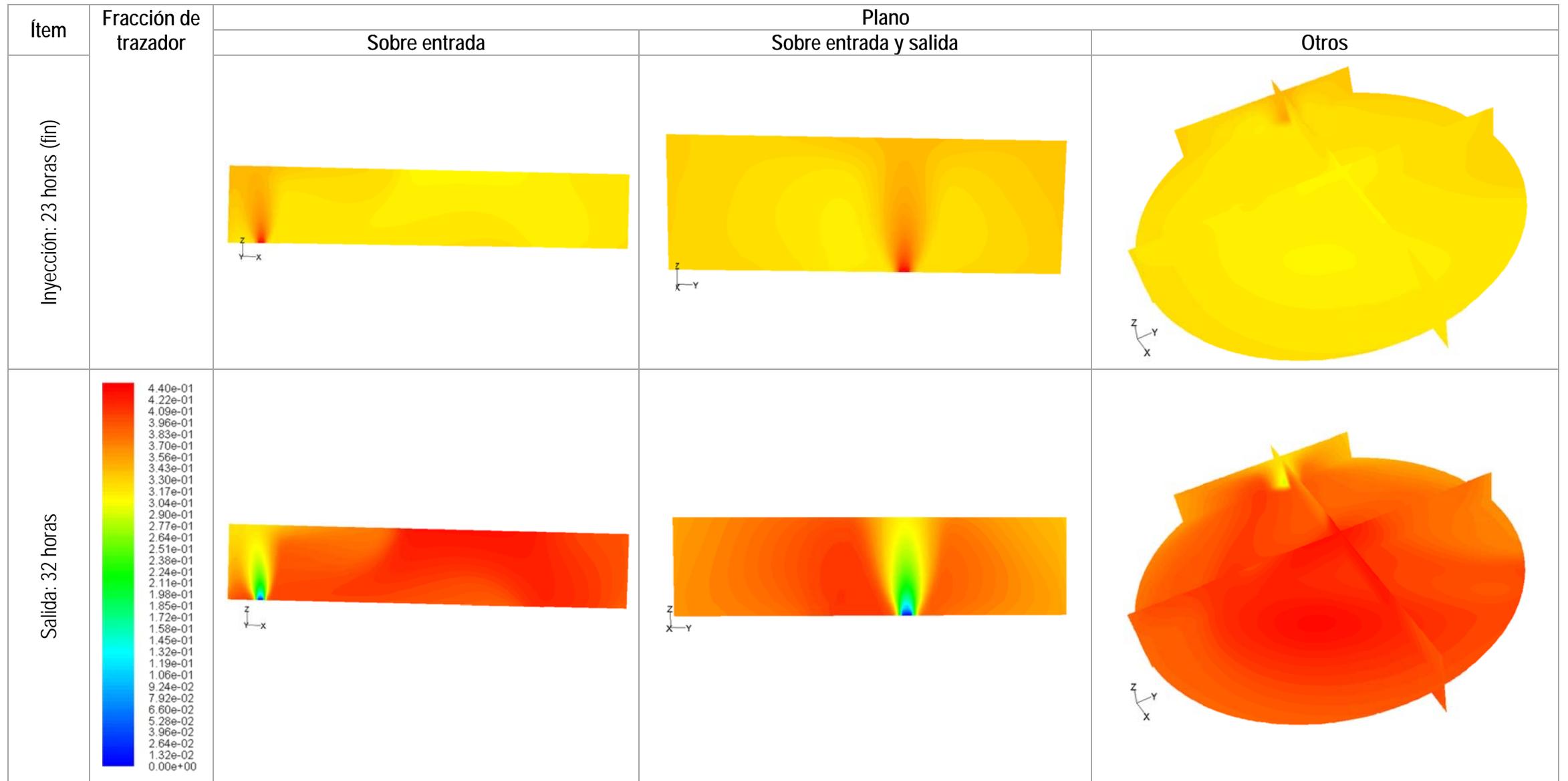
<p>Trayectorias de velocidad en superficie el de agua</p>		
<p>Zoom vectores de velocidad en entrada a tanque</p>	<p>2.18e+00 2.10e+00 2.03e+00 1.97e+00 1.90e+00 1.83e+00 1.77e+00 1.70e+00 1.64e+00 1.57e+00 1.51e+00 1.44e+00 1.38e+00 1.31e+00 1.24e+00 1.18e+00 1.11e+00 1.05e+00 9.83e-01 9.17e-01 8.52e-01 7.86e-01 7.21e-01 6.55e-01 5.90e-01 5.24e-01 4.59e-01 3.93e-01 3.28e-01 2.62e-01 1.97e-01 1.31e-01 6.55e-02 0.00e+00</p>	 <p>Plano 3</p>
<p>Vectores de velocidad plano sobre entrada y salida</p>	<p>2.23e+00 2.14e+00 2.07e+00 2.01e+00 1.94e+00 1.87e+00 1.80e+00 1.74e+00 1.67e+00 1.60e+00 1.54e+00 1.47e+00 1.40e+00 1.34e+00 1.27e+00 1.20e+00 1.14e+00 1.07e+00 1.00e+00 9.36e-01 8.69e-01 8.02e-01 7.35e-01 6.68e-01 6.02e-01 5.35e-01 4.68e-01 4.01e-01 3.34e-01 2.67e-01 2.01e-01 1.34e-01 6.68e-02 0.00e+00</p>	 <p>Salida</p>
<p>Superposición de trayectorias de velocidad con iso-superficies de velocidad igual a 1 mm/s</p>	<p>2.23e+00 2.14e+00 2.07e+00 2.01e+00 1.94e+00 1.87e+00 1.80e+00 1.74e+00 1.67e+00 1.60e+00 1.54e+00 1.47e+00 1.40e+00 1.34e+00 1.27e+00 1.20e+00 1.14e+00 1.07e+00 1.00e+00 9.36e-01 8.69e-01 8.02e-01 7.35e-01 6.68e-01 6.02e-01 5.35e-01 4.68e-01 4.01e-01 3.34e-01 2.67e-01 2.01e-01 1.34e-01 6.68e-02 0.00e+00</p>	

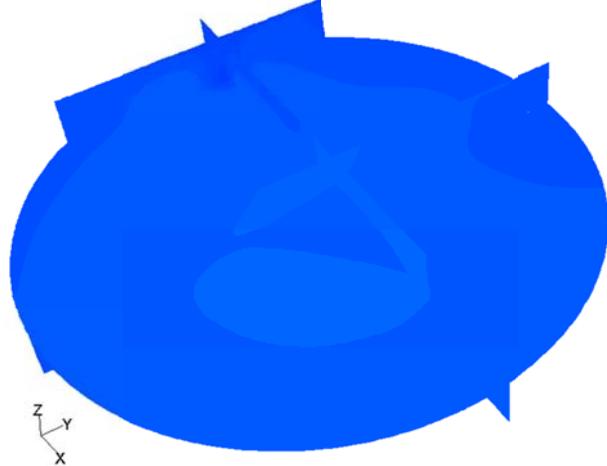
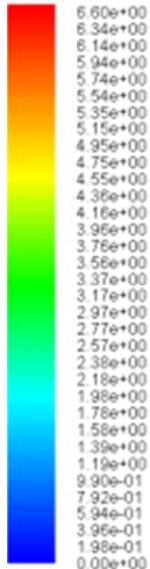
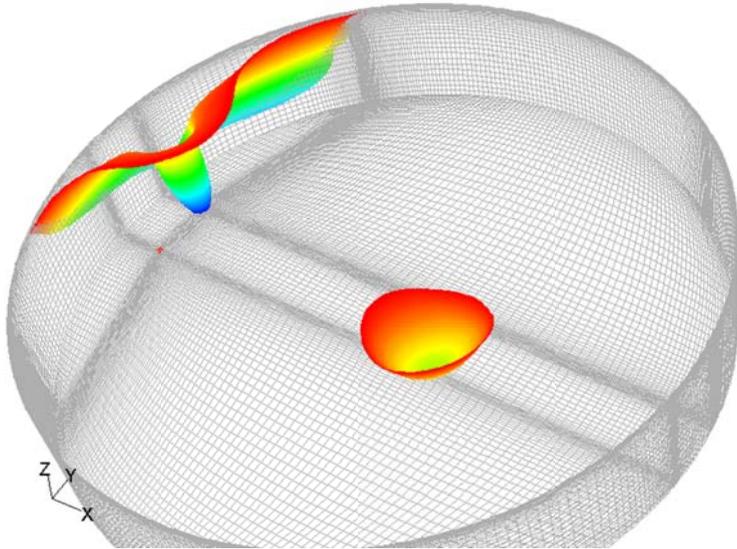
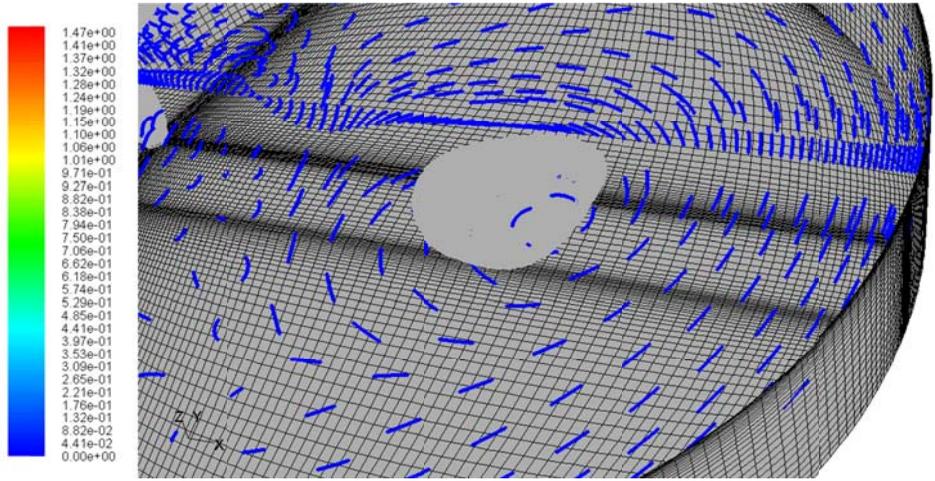


Anexo F: Resultados de simulaciones numéricas: mezcla de trazador

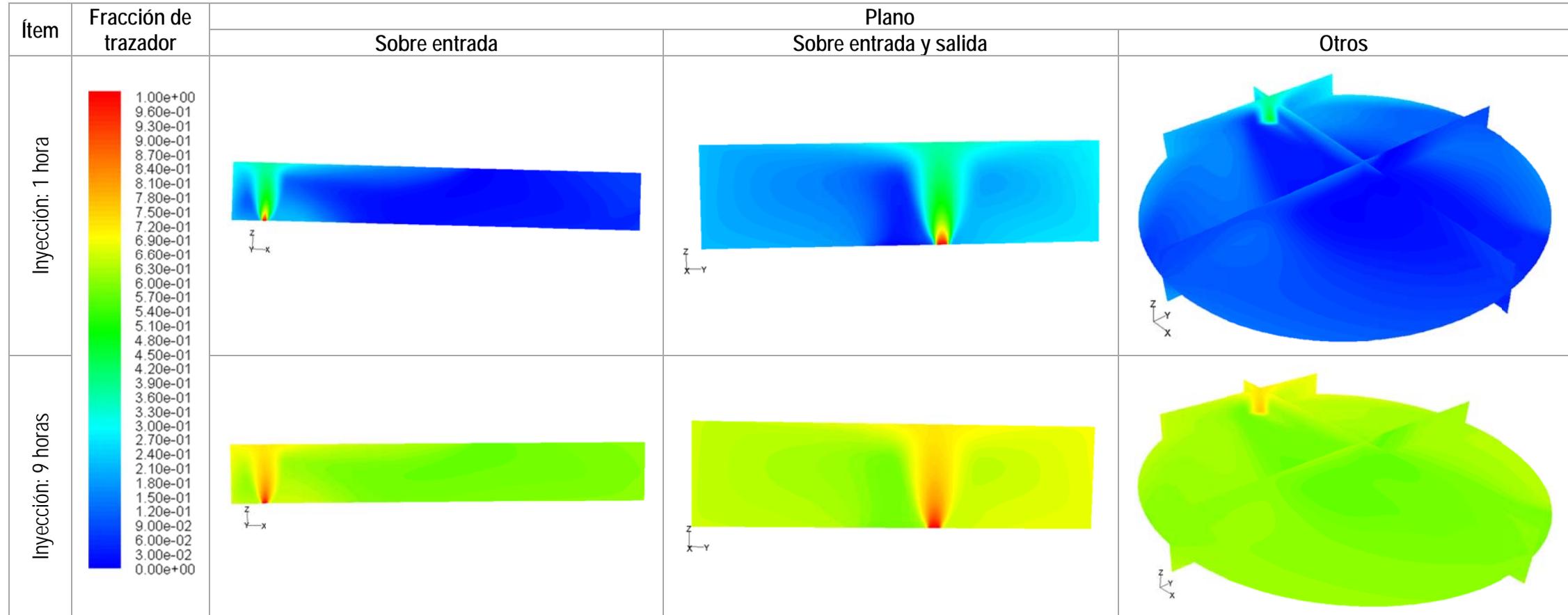
Escenario 1: nivel máximo

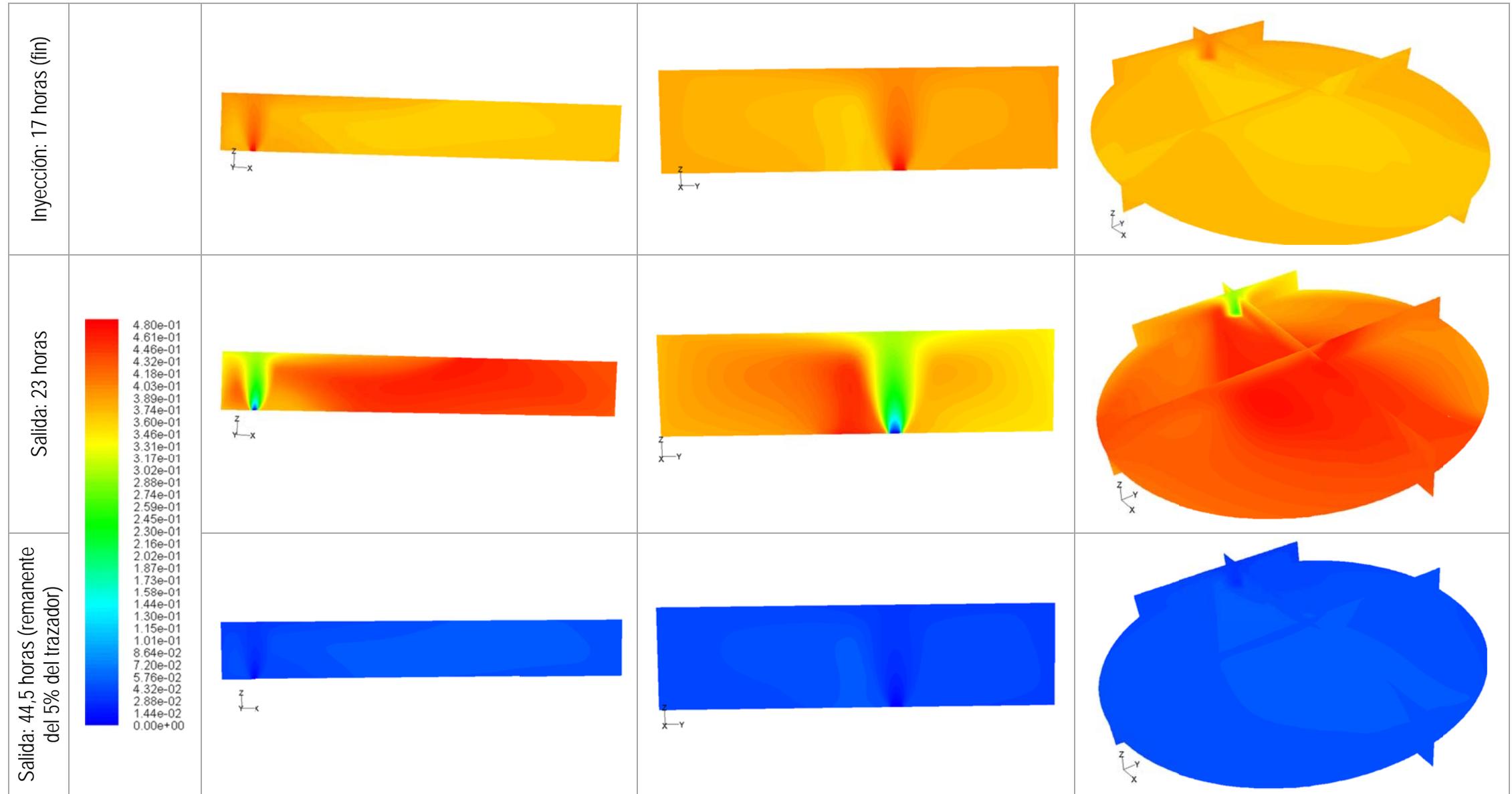


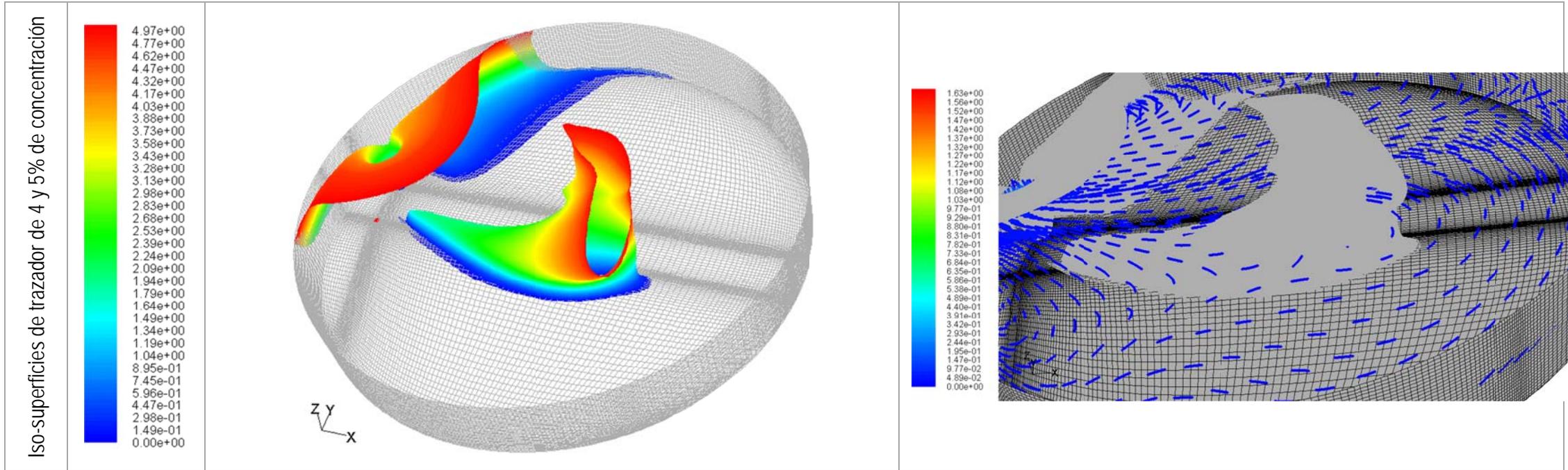


Ítem	Fracción de trazador	Plano		
		Sobre entrada	Sobre entrada y salida	Otros
Salida: 63,25 horas (remanente del 5% del trazador)				
Iso-superficies de trazador de 4 y 5% de concentración				

Escenario 2: nivel medio

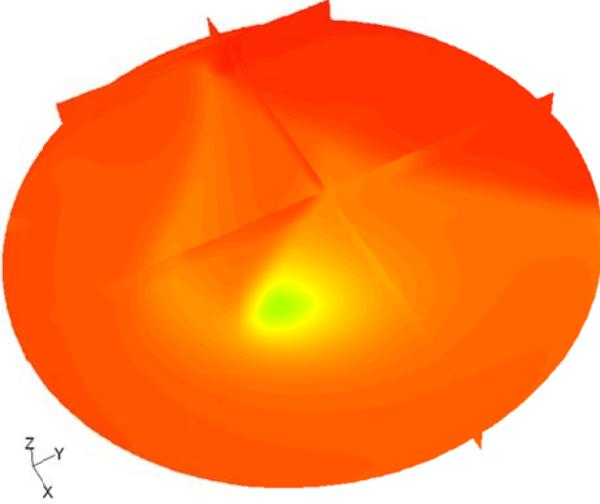


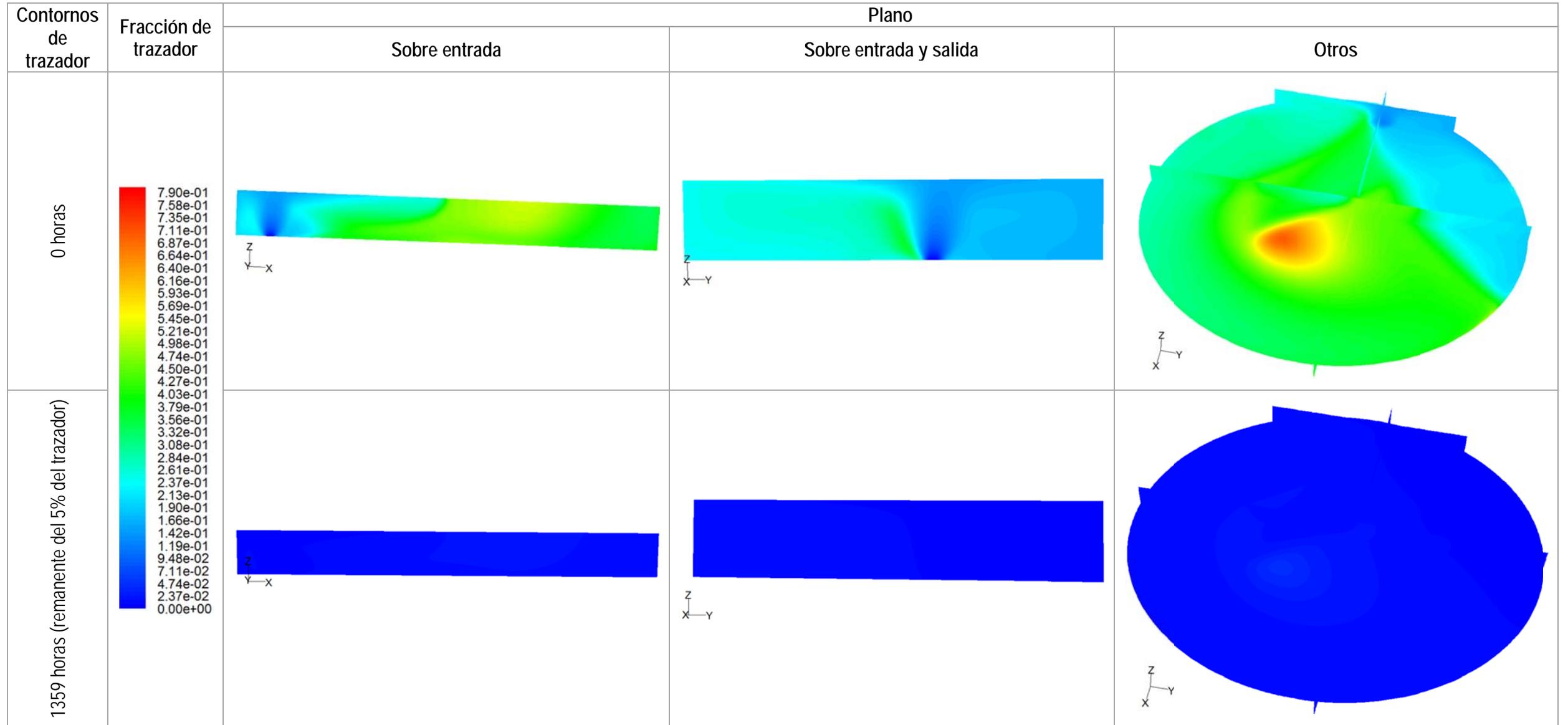


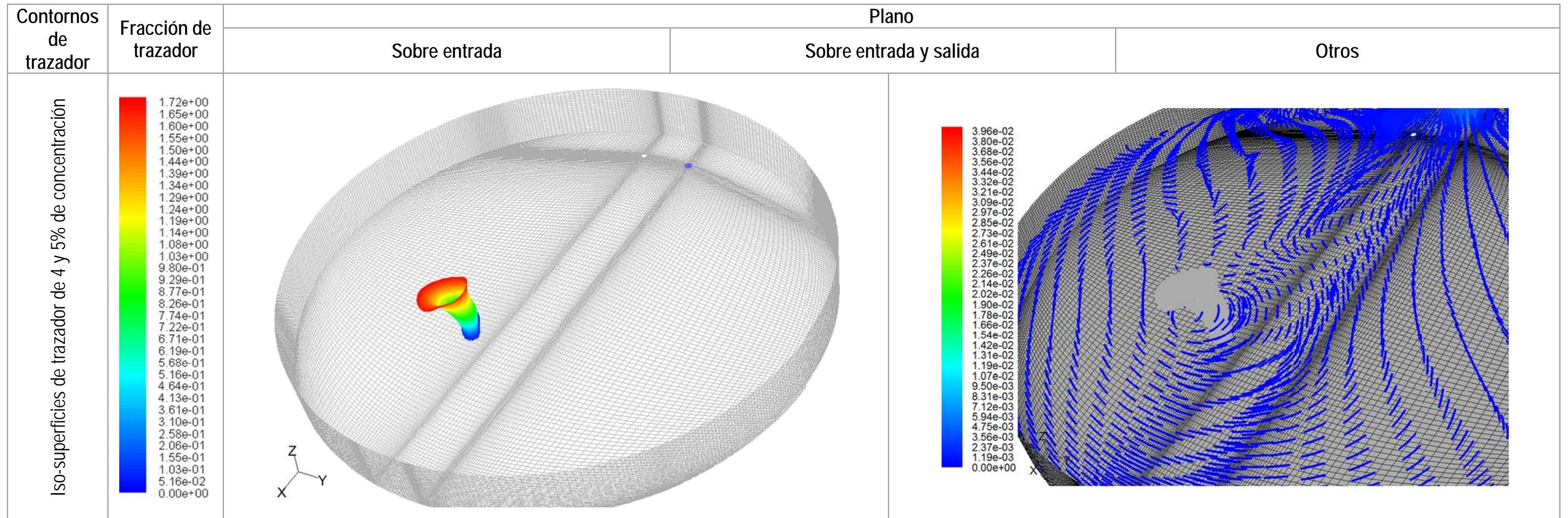


Escenario 3: nivel mínimo

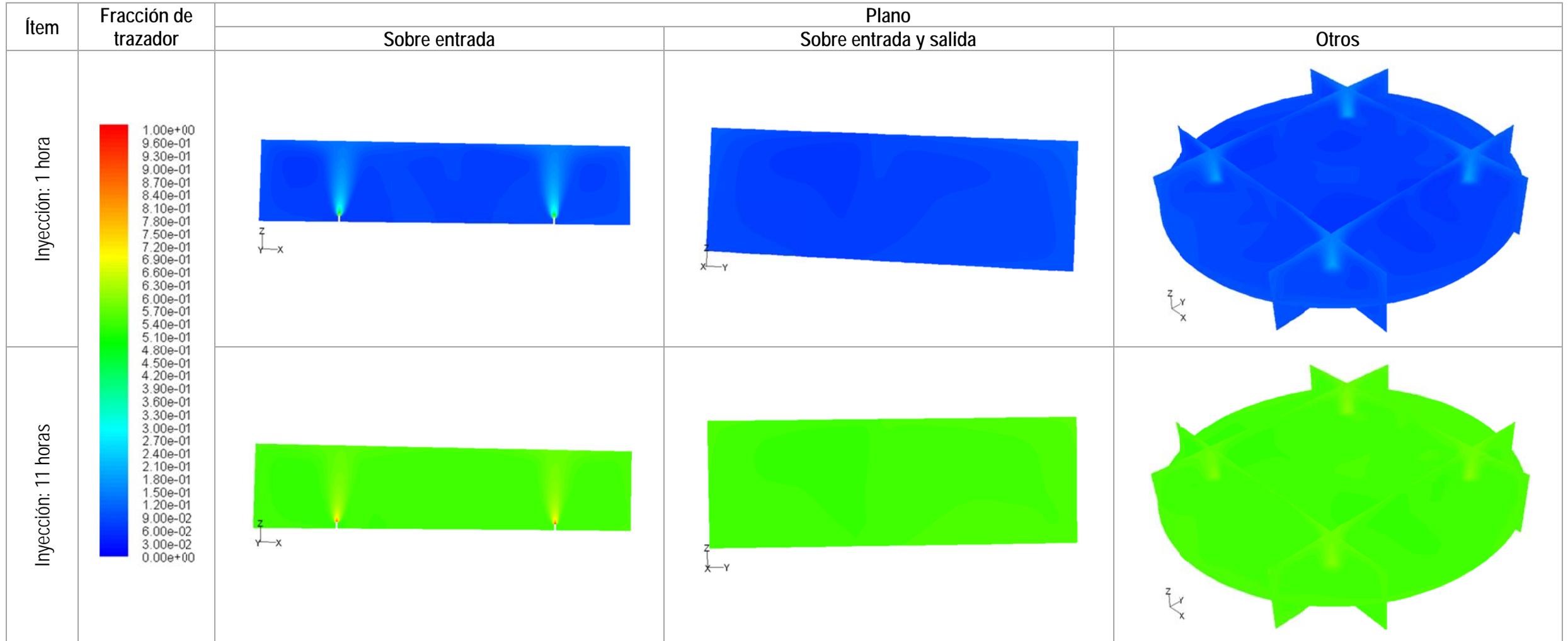
Contornos de trazador	Fracción de trazador	Plano		
		Sobre entrada	Sobre entrada y salida	Otros
Inyección: 1 hora	<p>1.00e+00 9.60e-01 9.30e-01 9.00e-01 8.70e-01 8.40e-01 8.10e-01 7.80e-01 7.50e-01 7.20e-01 6.90e-01 6.60e-01 6.30e-01 6.00e-01 5.70e-01 5.40e-01 5.10e-01 4.80e-01 4.50e-01 4.20e-01 3.90e-01 3.60e-01 3.30e-01 3.00e-01 2.70e-01 2.40e-01 2.10e-01 1.80e-01 1.50e-01 1.20e-01 9.00e-02 6.00e-02 3.00e-02 0.00e+00</p>			
Inyección: 245 horas	<p>1.00e+00 9.60e-01 9.30e-01 9.00e-01 8.70e-01 8.40e-01 8.10e-01 7.80e-01 7.50e-01 7.20e-01 6.90e-01 6.60e-01 6.30e-01 6.00e-01 5.70e-01 5.40e-01 5.10e-01 4.80e-01 4.50e-01 4.20e-01 3.90e-01 3.60e-01 3.30e-01 3.00e-01 2.70e-01 2.40e-01 2.10e-01 1.80e-01 1.50e-01 1.20e-01 9.00e-02 6.00e-02 3.00e-02 0.00e+00</p>			

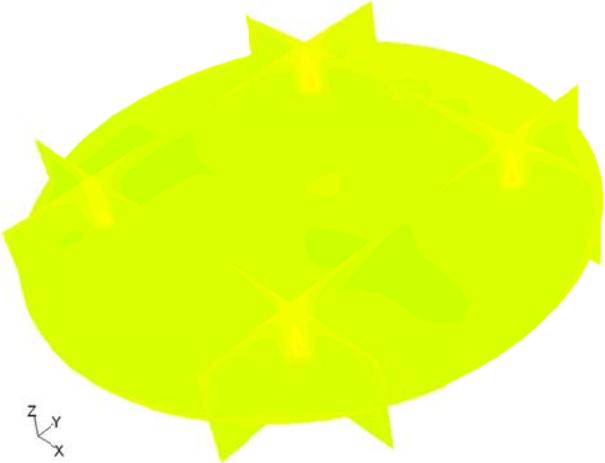
Contornos de trazador	Fracción de trazador	Plano		
		Sobre entrada	Sobre entrada y salida	Otros
490 horas (fin de inyección)				

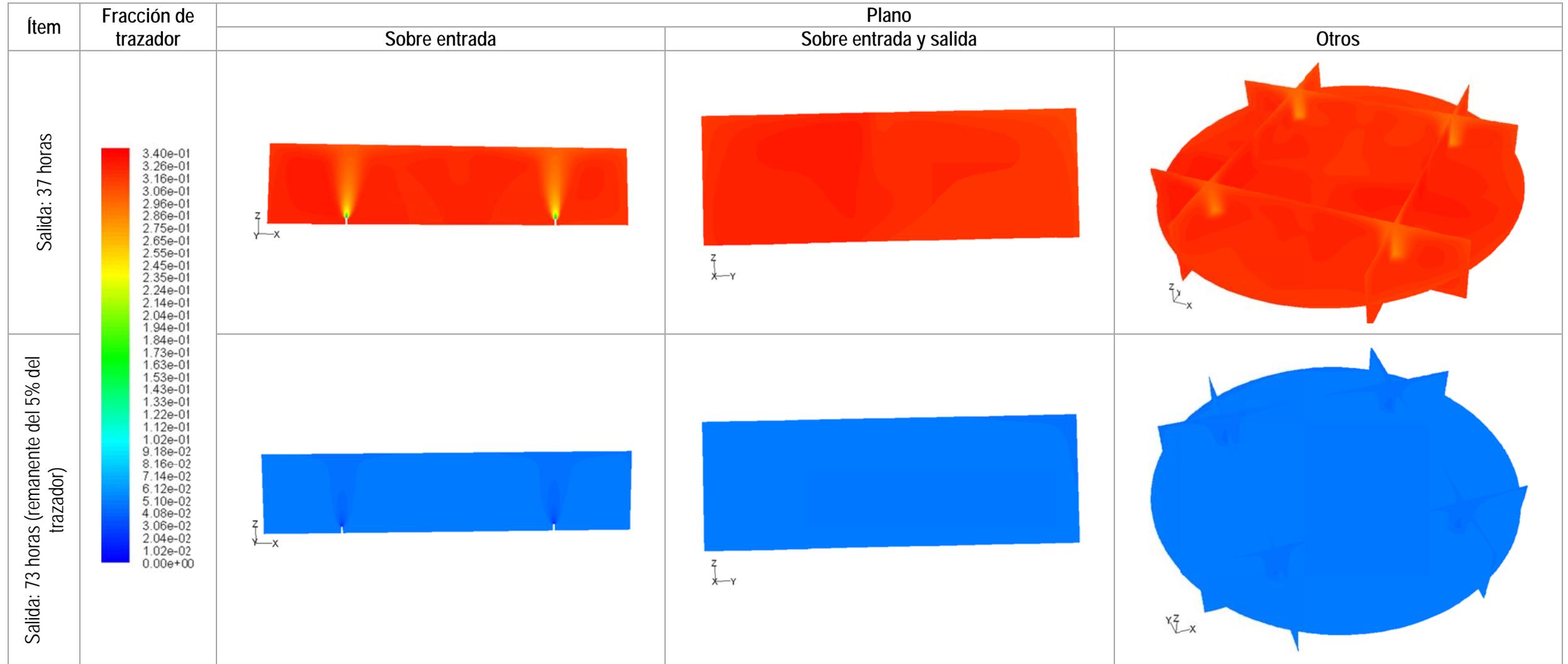




Modificación de entrada de agua

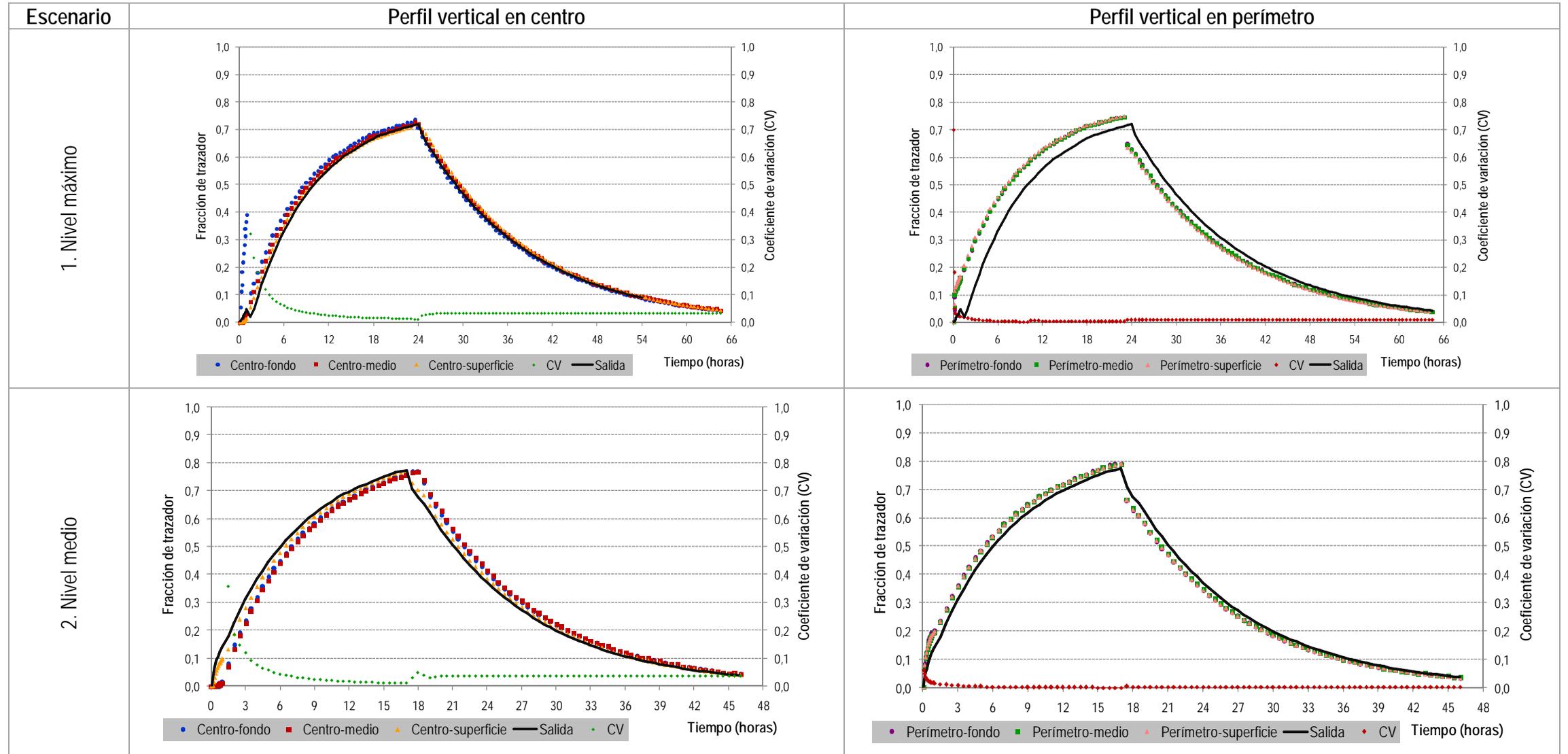


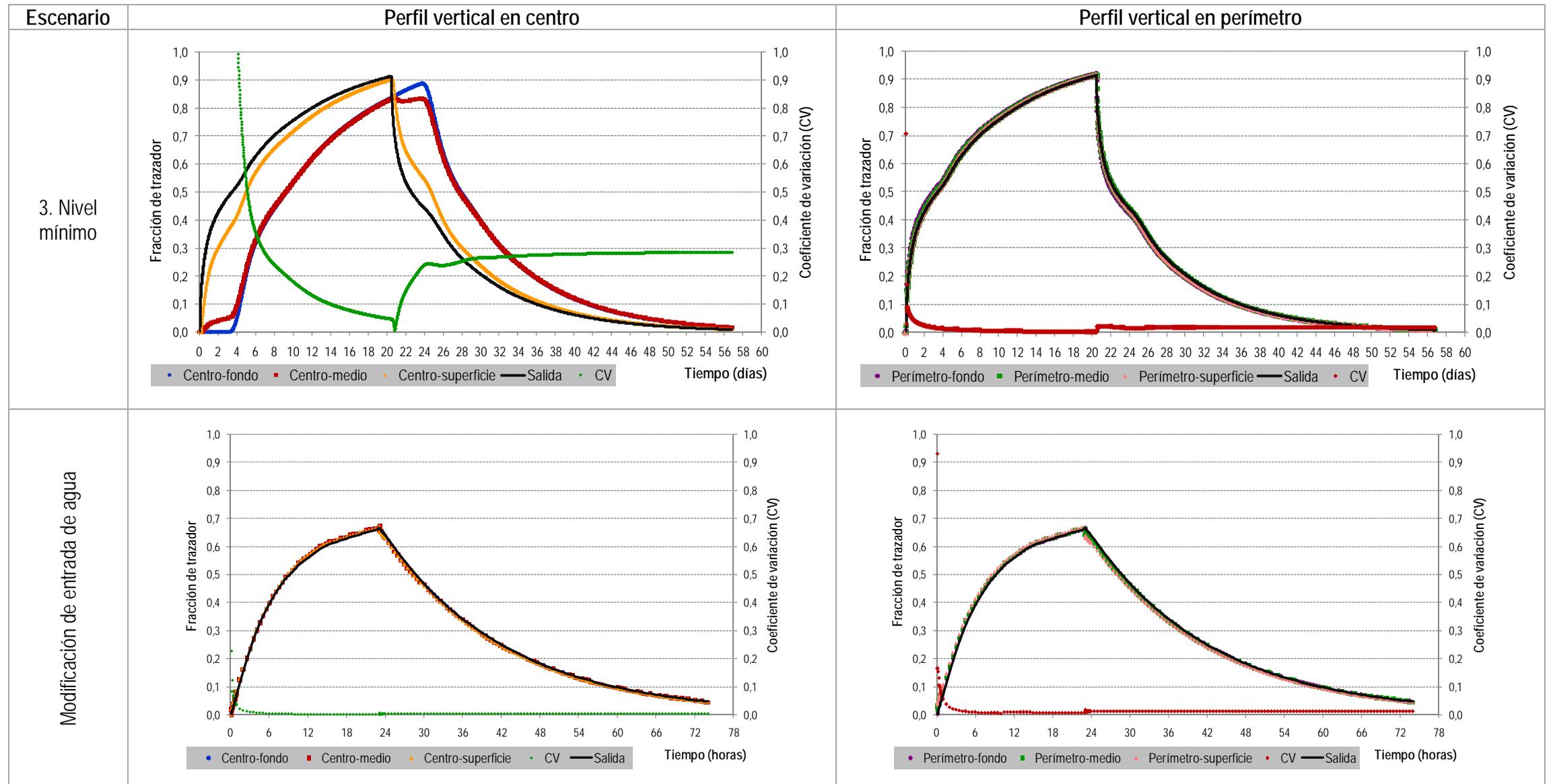
Ítem	Fracción de trazador	Plano		
		Sobre entrada	Sobre entrada y salida	Otros
Inyección: 23 horas (fin)				



Ítem	Fracción de trazador	Plano		
		Sobre entrada	Sobre entrada y salida	Otros
Iso-superficies de trazador de 4 y 5% de concentración	 6.60e+00 6.34e+00 6.14e+00 5.94e+00 5.74e+00 5.54e+00 5.35e+00 5.15e+00 4.95e+00 4.75e+00 4.55e+00 4.36e+00 4.16e+00 3.96e+00 3.76e+00 3.56e+00 3.37e+00 3.17e+00 2.97e+00 2.77e+00 2.57e+00 2.38e+00 2.18e+00 1.98e+00 1.78e+00 1.58e+00 1.39e+00 1.19e+00 9.90e-01 7.92e-01 5.94e-01 3.96e-01 1.98e-01 0.00e+00			

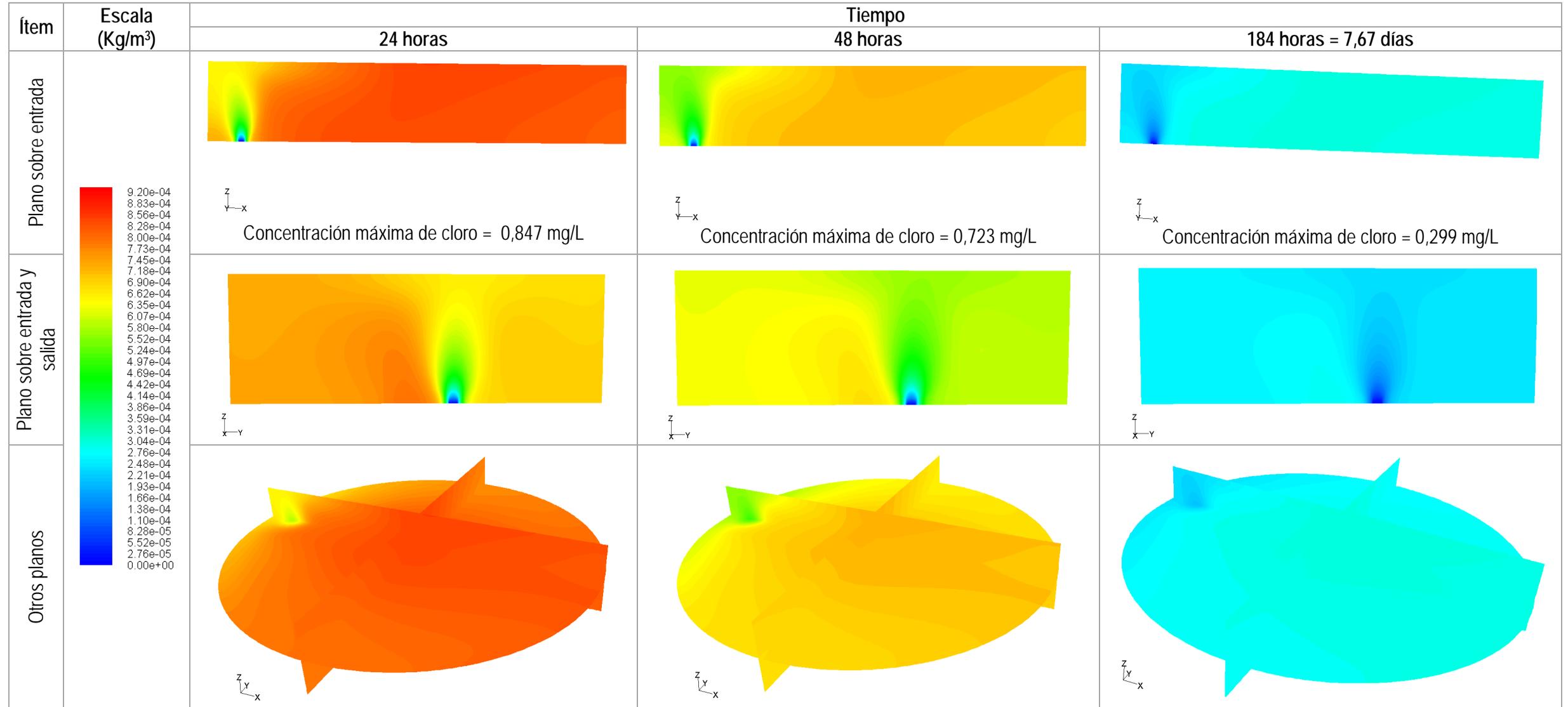
Perfiles verticales de trazador



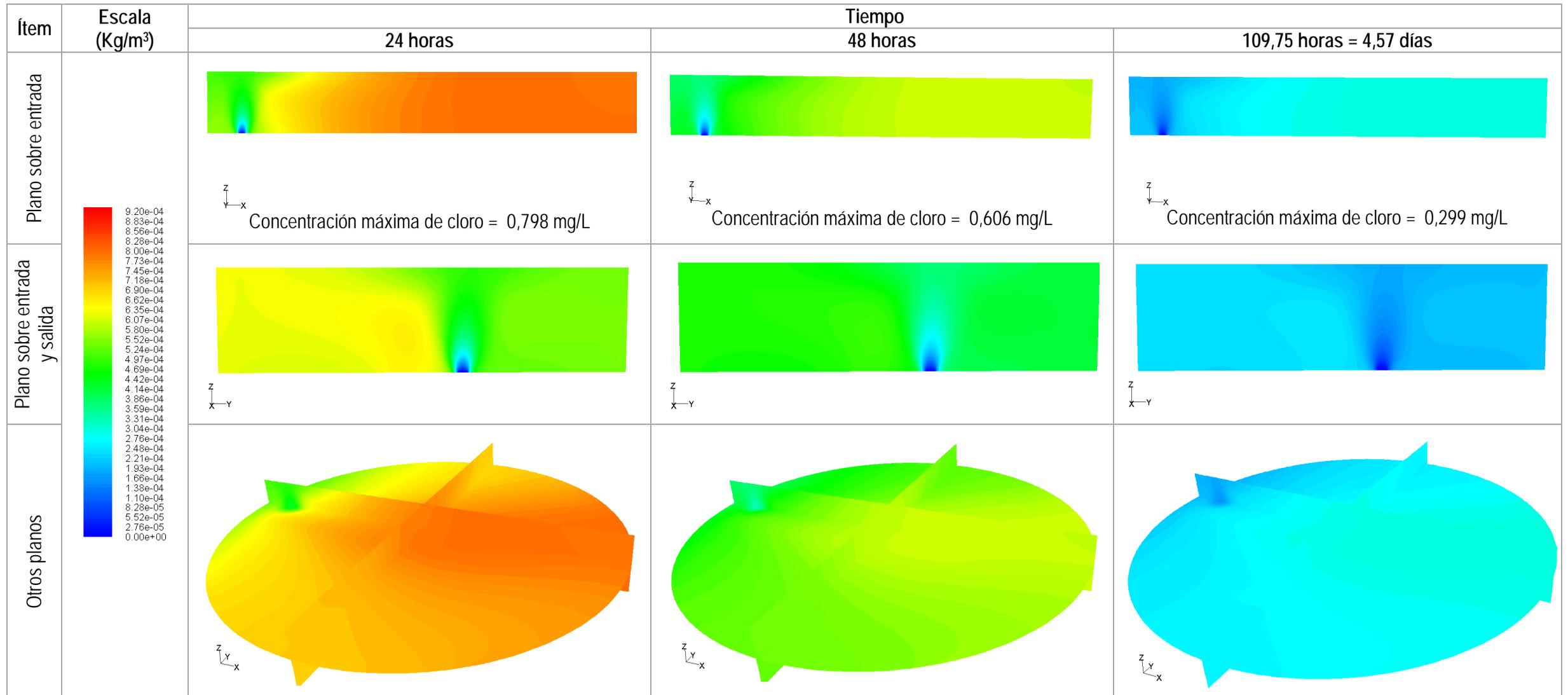


Anexo G: Resultados de simulaciones numéricas: decaimiento del cloro residual libre

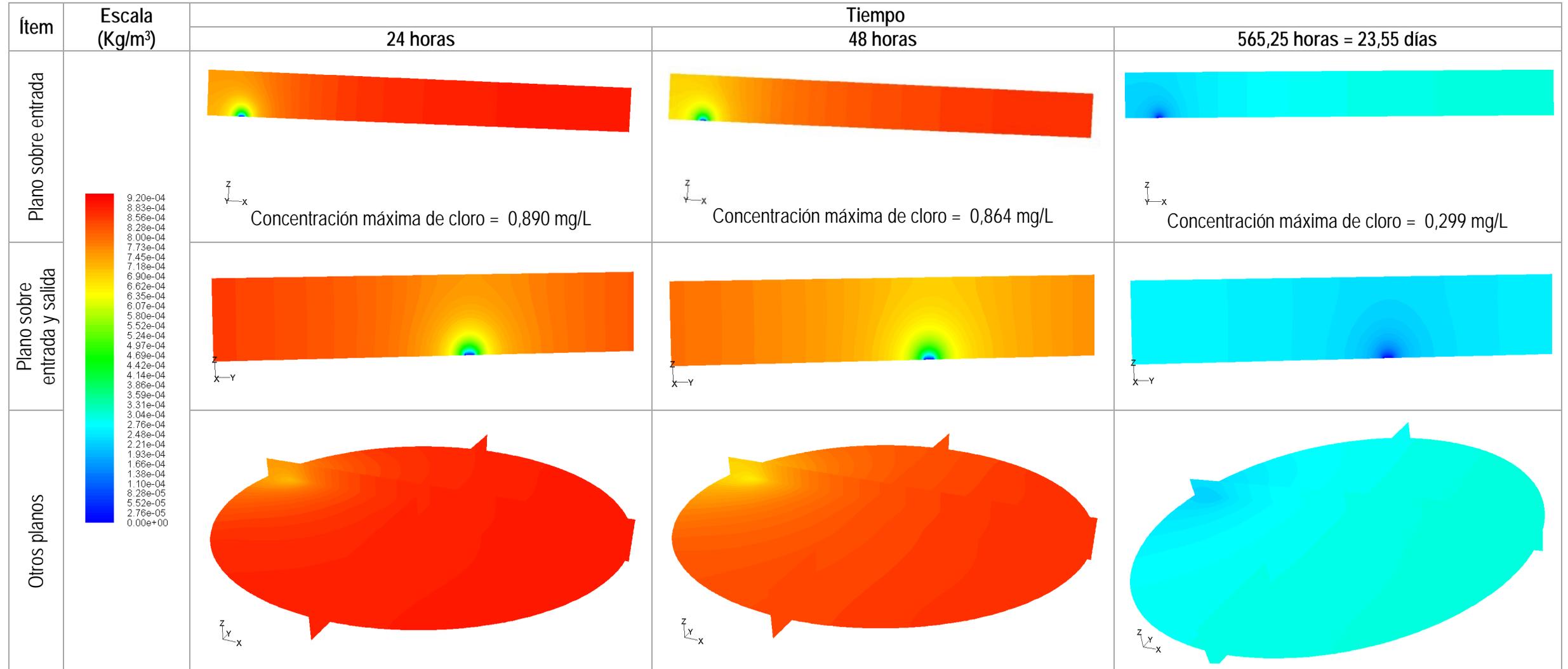
Contornos cloro residual libre. Escenario 1: nivel máximo



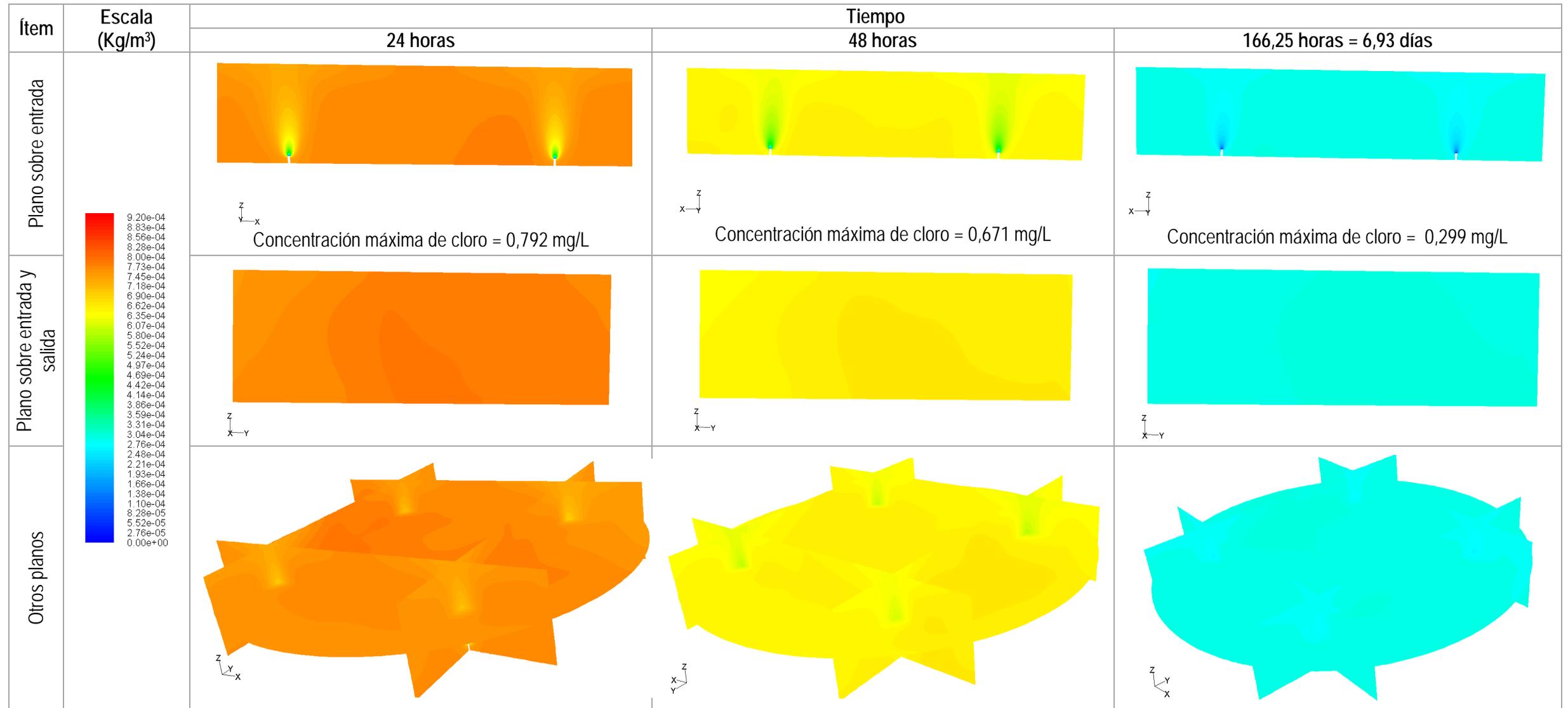
Contornos cloro residual libre. Escenario 2: nivel medio



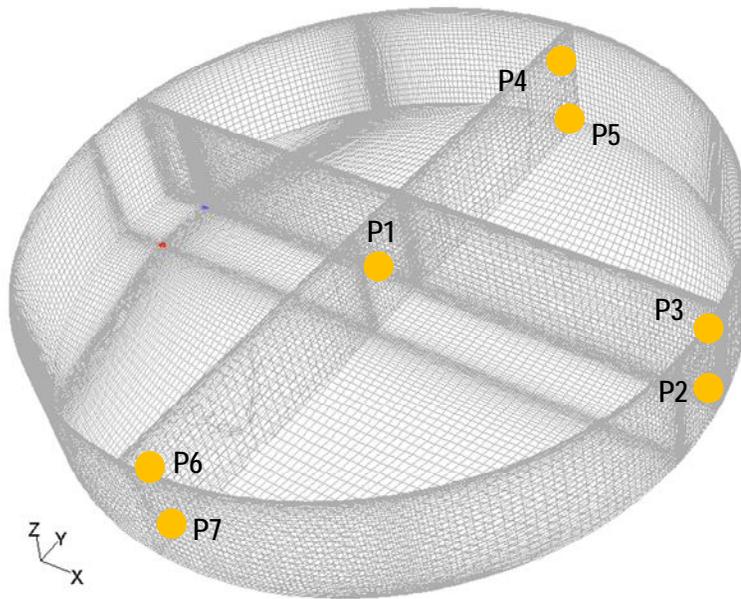
Contornos cloro residual libre. Escenario 3: nivel mínimo



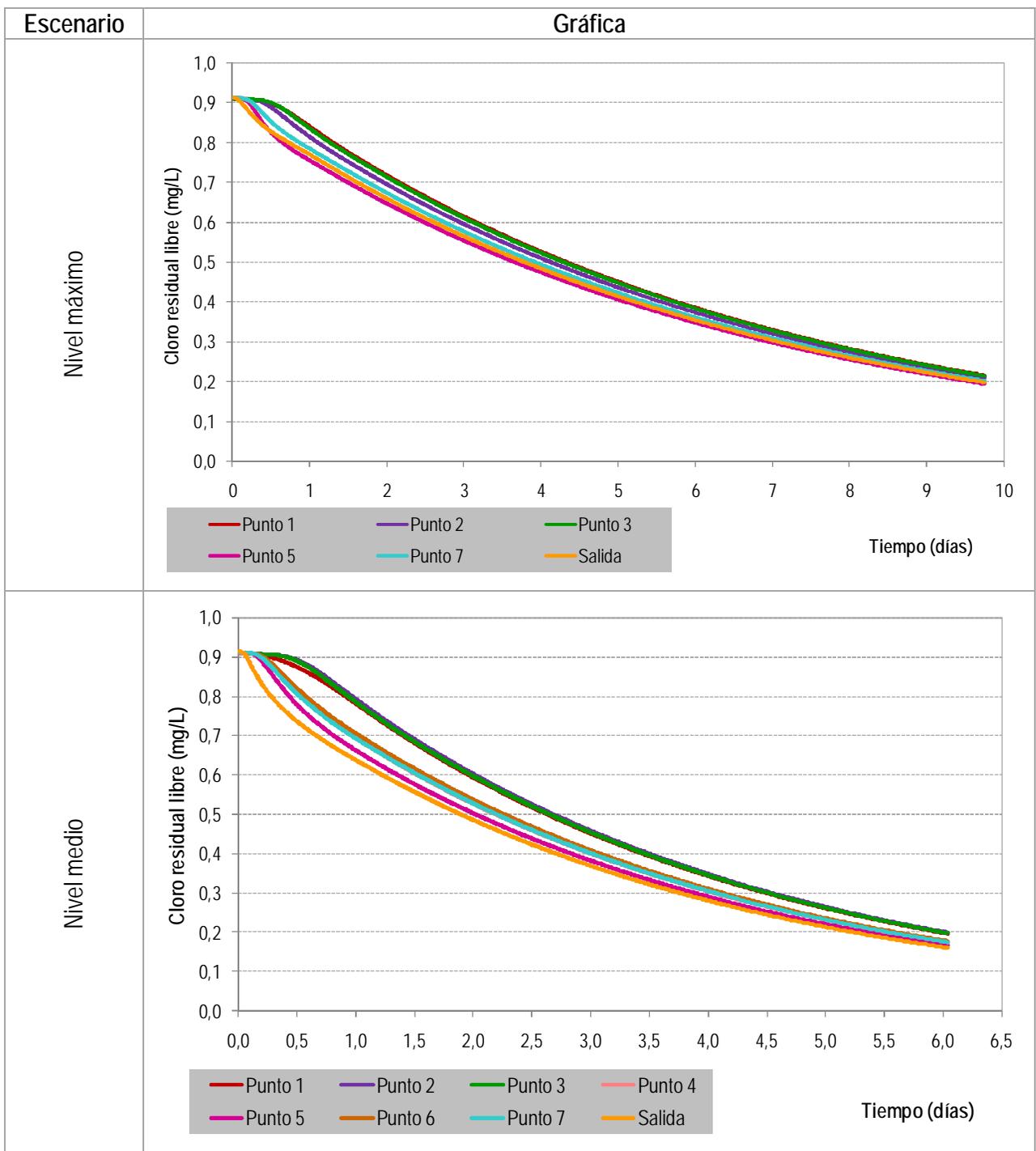
Contornos cloro residual libre. Modificación de entrada de agua

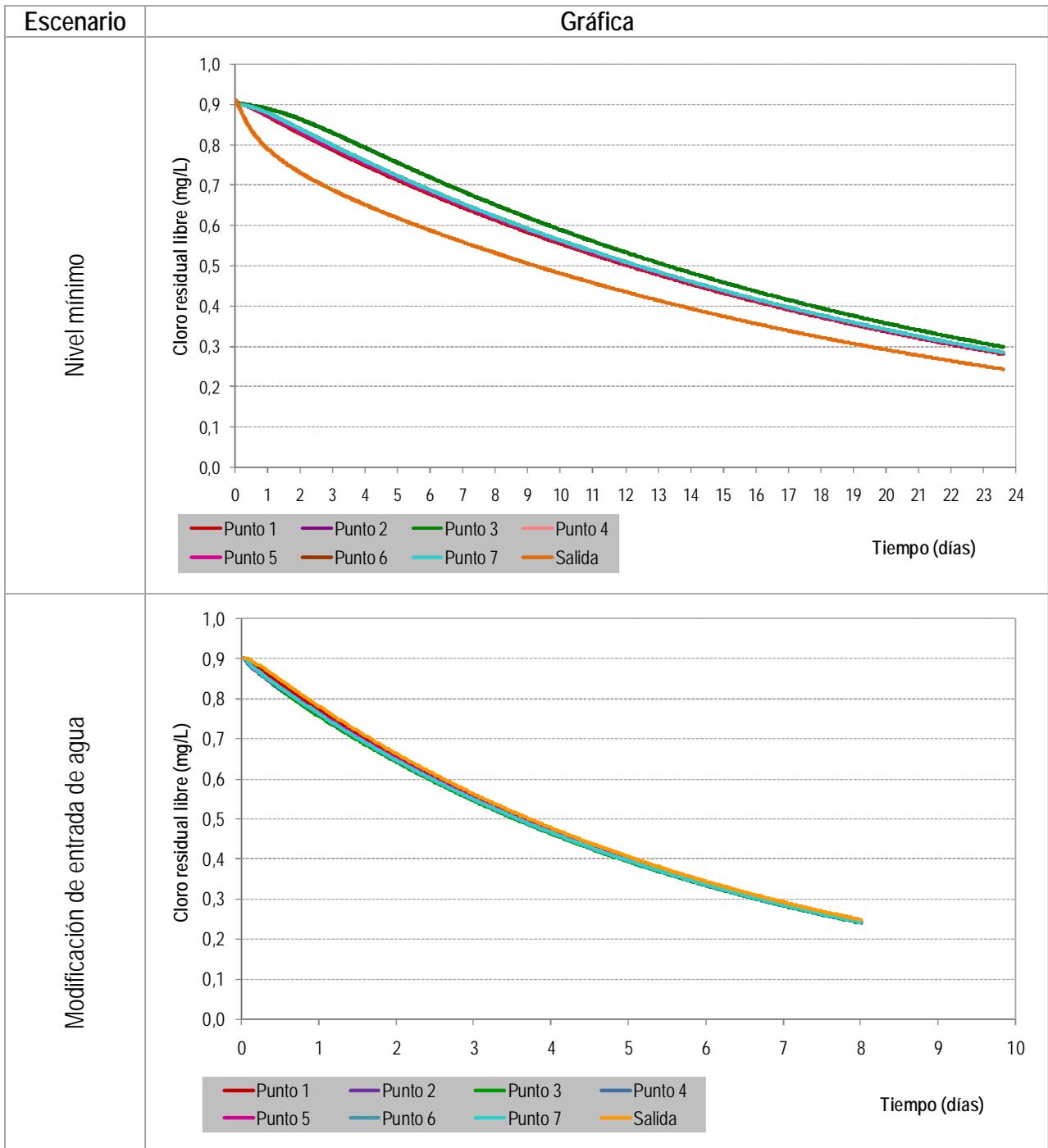


Ubicación de puntos de monitoreo de cloro al interior del tanque

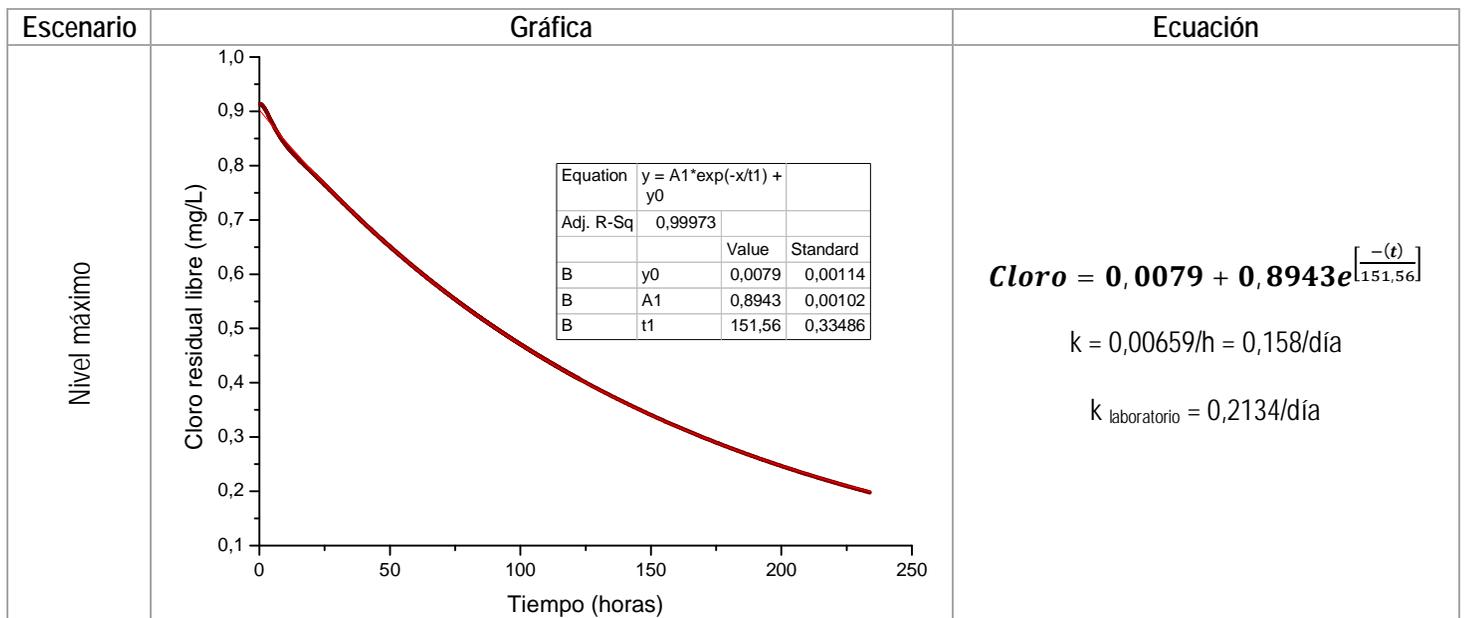


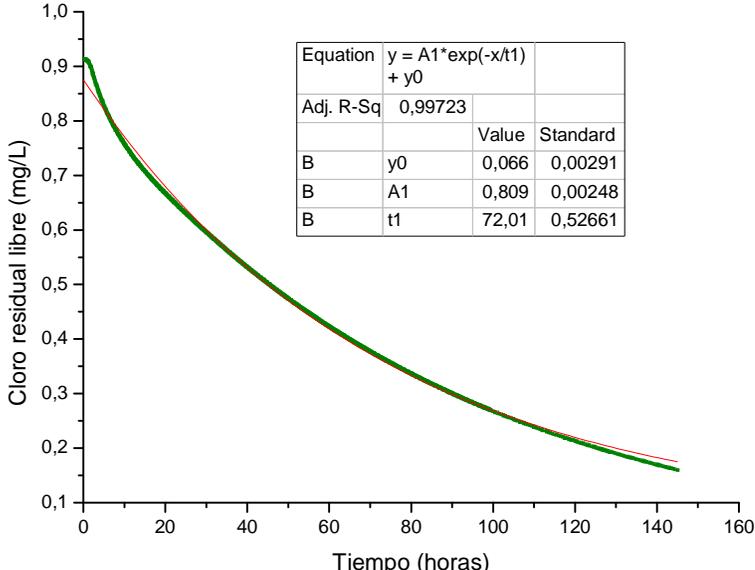
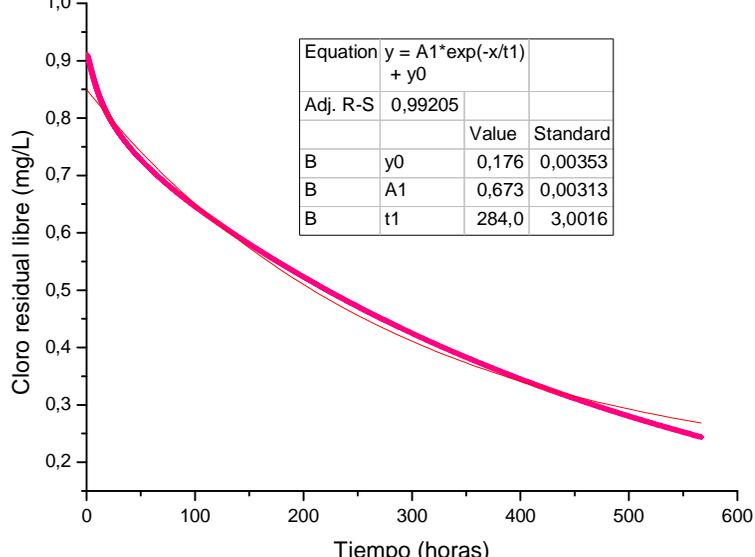
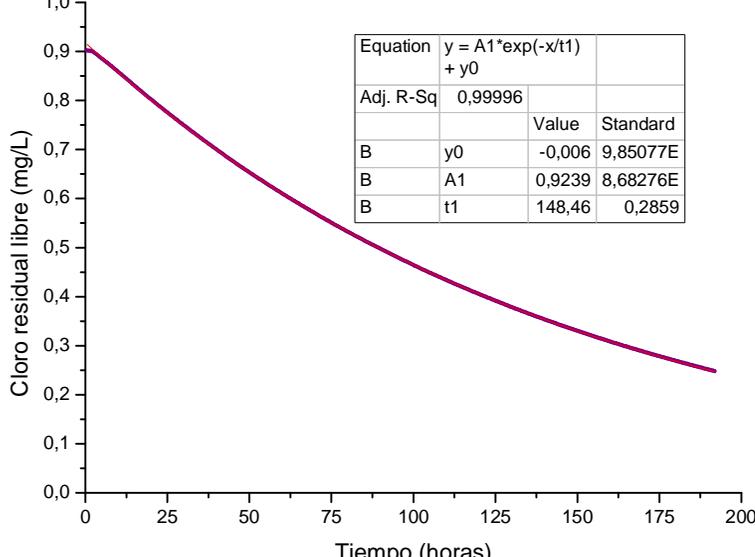
Decaimiento del cloro al interior del tanque





Ajuste exponencial al decaimiento del cloro residual libre en la salida



Escenario	Gráfica	Ecuación																								
Nivel medio	 <table border="1" data-bbox="581 236 914 432"> <tr> <td>Equation</td> <td colspan="3">$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$</td> </tr> <tr> <td>Adj. R-Sq</td> <td colspan="3">0,99723</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Value</td> <td>Standard</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>y0</td> <td>0,066</td> <td>0,00291</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>A1</td> <td>0,809</td> <td>0,00248</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>t1</td> <td>72,01</td> <td>0,52661</td> </tr> </table>	Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$			Adj. R-Sq	0,99723					Value	Standard	B	y0	0,066	0,00291	B	A1	0,809	0,00248	B	t1	72,01	0,52661	$\text{Cloro} = 0,066 + 0,809e^{\left[\frac{-(t)}{72,01}\right]}$ <p>$k = 0,014/h = 0,33/\text{día}$</p> <p>$k_{\text{laboratorio}} = 0,2134/\text{día}$</p>
Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$																									
Adj. R-Sq	0,99723																									
		Value	Standard																							
B	y0	0,066	0,00291																							
B	A1	0,809	0,00248																							
B	t1	72,01	0,52661																							
Nivel mínimo	 <table border="1" data-bbox="581 827 898 1024"> <tr> <td>Equation</td> <td colspan="3">$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$</td> </tr> <tr> <td>Adj. R-S</td> <td colspan="3">0,99205</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Value</td> <td>Standard</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>y0</td> <td>0,176</td> <td>0,00353</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>A1</td> <td>0,673</td> <td>0,00313</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>t1</td> <td>284,0</td> <td>3,0016</td> </tr> </table>	Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$			Adj. R-S	0,99205					Value	Standard	B	y0	0,176	0,00353	B	A1	0,673	0,00313	B	t1	284,0	3,0016	$\text{Cloro} = 0,176 + 0,673e^{\left[\frac{-(t)}{284}\right]}$ <p>$k = 0,0035/h = 0,085/\text{día}$</p> <p>$k_{\text{laboratorio}} = 0,2134/\text{día}$</p>
Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$																									
Adj. R-S	0,99205																									
		Value	Standard																							
B	y0	0,176	0,00353																							
B	A1	0,673	0,00313																							
B	t1	284,0	3,0016																							
Modificación de entrada de agua	 <table border="1" data-bbox="638 1405 971 1602"> <tr> <td>Equation</td> <td colspan="3">$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$</td> </tr> <tr> <td>Adj. R-Sq</td> <td colspan="3">0,99996</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Value</td> <td>Standard</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>y0</td> <td>-0,006</td> <td>9,85077E</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>A1</td> <td>0,9239</td> <td>8,68276E</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>t1</td> <td>148,46</td> <td>0,2859</td> </tr> </table>	Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$			Adj. R-Sq	0,99996					Value	Standard	B	y0	-0,006	9,85077E	B	A1	0,9239	8,68276E	B	t1	148,46	0,2859	$\text{Cloro} = -0,006 + 0,9239e^{\left[\frac{-(t)}{148,46}\right]}$ <p>$k = 0,0067/h = 0,162/\text{día}$</p> <p>$k_{\text{laboratorio}} = 0,2134/\text{día}$</p>
Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$																									
Adj. R-Sq	0,99996																									
		Value	Standard																							
B	y0	-0,006	9,85077E																							
B	A1	0,9239	8,68276E																							
B	t1	148,46	0,2859																							



Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería - Área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental

Santiago de Cali, Marzo de 2012

