

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**APLICACIÓN DE MODELOS PARA LA  
EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN  
SEDIMENTADOR DE ALTA TASA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)  
PRESENTA**

**CAROLINA SANTACRUZ LARA**

**M.I. ANTONIO RAMÍREZ GONZÁLEZ  
DIRECTOR DE TESIS**

**JIUTEPEC, MORELOS**

**ABRIL 2005**

m 343336



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Carolina Santacruz Lara

FECHA: 18/Abril/2005

FIRMA: Carolina Santacruz Lara

**Agradecimientos:**

**A mis padres, Pilar y Manuel, a mi hermano, Sebastián, a mis tíos María Eugenia y Jorge Luis y a mis suegros, Patricia e Higinio: por su apoyo incondicional, gracias.**

**A mi esposo Oswaldo y mi hijo Andrés: porque sin ustedes esta meta alcanzada no significaría lo mismo, gracias.**

**A mis maestros: porque sin su entrega no hubiera sido posible la realización de este trabajo, gracias.**

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	iv
<b>ÍNDICE DE LÁMINAS</b>	v
<b>NOMENCLATURA</b>	vii
<b>RESUMEN</b>	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
ALCANCES	3
OBJETIVO	3
HIPÓTESIS	4
<b>2. LA TÉCNICA DE TRAZADORES</b>	5
2.1. TEORÍA DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA	5
2.2. DISTRIBUCION DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA	6
2.2.1. <i>Conceptos matemáticos de la DTR</i>	8
2.2.2. <i>Adimensionamiento de la DTR</i>	9
2.2.3. <i>Características de la DTR</i>	10
2.3. SUSTANCIAS TRAZADORAS	12
2.4. MODO DE APLICACIÓN DE LOS TRAZADORES	12
2.5. LIMITACIONES DE LA PRUEBA CON TRAZADORES	13
<b>3. MODELOS MATEMÁTICOS</b>	15
3.1. MODELOS BASADOS EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	15
3.1.1. <i>Modelo para un reactor de mezcla completa</i>	17
3.1.2. <i>Modelo para reactores en serie</i>	19
3.1.3. <i>Modelo para un reactor con zonas muertas y cortocircuitos</i>	21
3.1.4. <i>Modelo para reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos</i>	23
3.2. MODELO SIMPLIFICADO - TEORÍA DE WOLF-RESNICK	24
3.3. MODELO DE DISPERSIÓN	28
3.4. ANÁLISIS DE LA CURVA DE TENDENCIA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR (MÉTODO CONVENCIONAL O MÉTODO CLÁSICO)	30

<b>4.</b>	<b>SEDIMENTACIÓN LAMINAR O DE ALTA TASA</b>	<b>33</b>
4.1.	SEDIMENTACIÓN LAMINAR O DE ALTA TASA	33
4.1.1.	<i>Principios básicos</i>	36
4.1.2.	<i>Factores que influyen en el proceso de sedimentación</i>	39
4.2.	EVALUACION DE SEDIMENTADORES	43
4.2.1.	<i>Determinación de eficiencia</i>	43
4.2.2.	<i>Determinación de condiciones hidráulicas</i>	43
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>45</b>
5.1.	ESTACIÓN EXPERIMENTAL	45
5.1.1.	<i>Unidad de tratamiento utilizada para la prueba con trazadores</i>	45
5.1.2.	<i>Sistema hidráulico del dispositivo experimental</i>	48
5.1.3.	<i>Calibración del equipo</i>	51
5.2.	PRUEBAS EXPERIMENTALES	52
5.2.1.	<i>Arreglos preliminares</i>	54
5.2.2.	<i>Pruebas realizadas con azul de metileno</i>	55
5.2.3.	<i>Pruebas realizadas con salmuera</i>	56
5.3.	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN	57
5.3.1.	<i>Modelo para varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos</i>	57
5.3.2.	<i>Modelo simplificado de Wolf y Resnick</i>	58
5.3.3.	<i>Modelo de dispersión</i>	58
5.3.4.	<i>Modelo basado en el análisis de la curva</i>	59
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
6.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	60
6.1.1.	<i>Arreglos preliminares</i>	60
6.1.2.	<i>Resultados de las pruebas con azul de metileno</i>	65
6.1.3.	<i>Resultados de las pruebas con salmuera</i>	78
6.2.	RESULTADOS DE LOS MODELOS	84
6.2.1.	<i>Modelo para reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos</i>	85
6.2.2.	<i>Modelo simplificado de Wolf y Resnick</i>	86
6.2.3.	<i>Modelo de dispersión</i>	88
6.2.4.	<i>Modelo basado en el análisis de la curva</i>	88
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>92</b>

**ANEXOS**

97

Anexo 1.	Calibración del rotámetro	97
Anexo 2.	Pruebas de repetitividad	99
Anexo 3.	Resultados experimentales de las pruebas con sal	101
Anexo 4.	Calibración del modelo de dispersión, del modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos y del modelo de Wolf-Resnick	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.	Representación de las funciones de transferencia para diferentes tipos de flujo (Martín et al., 1999).	17
Tabla 4.1.	Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000).	34
Tabla 4.2.	Tiempos de residencia recomendados para sedimentadores de placas inclinadas.	39
Tabla 4.3.	Tasas superficiales recomendadas para sedimentadores de placas inclinadas.	40
Tabla 4.4.	Velocidad del flujo a través de las placas para sedimentadores de alta tasa.	41
Tabla 4.5.	Interferencias en la sedimentación (Arboleda, 2000).	42
Tabla 5.1.	Condiciones de operación utilizados para las pruebas de trazadores.	53
Tabla 5.2.	Pruebas realizadas con azul de metileno.	55
Tabla 5.3.	Pruebas realizadas a diferentes concentraciones de sal.	57
Tabla 6.1.	Comparación de los criterios de diseño recomendados y los parámetros calculados reales de funcionamiento del sedimentador prototipo.	64
Tabla 6.2.	Descripción de las pruebas realizadas con azul de metileno y los cambios efectuados en la estructura del sedimentador.	66
Tabla 6.3.	Tiempos de residencia de la unidad para los experimentos No. 1, 2, 3 y 4.	77
Tabla 6.4.	Tiempo inicial de presencia de trazador (min) y concentraciones máximas de sal (mg/l) para las pruebas repetitivas.	79
Tabla 6.5.	Concentraciones de sal (mg/l) calculadas para las pruebas repetitivas.	79
Tabla 6.6.	Error de medición de sal con respecto a la concentración inicial de trazador $C_0$ para los pruebas de repetitividad.	79
Tabla 6.7.	Concentraciones de sal (mg/l) calculada en los experimentos No. 1, 2, 3 y 4.	83
Tabla 6.8.	Resultados de los modelos de reactores en serie y de Wolf-Resnick, aplicados por los experimentos No. 1, 2, 3 y 4 para diferentes concentraciones de sal.	84
Tabla 6.9.	Resultados de los modelos de dispersión y del análisis de la curva, aplicados en los experimentos No. 1, 2, 3 y 4 para diferentes concentraciones de sal.	85
Tabla 6.10.	Resultados del modelo de Wolf y Resnick, aplicado al experimento No. 1 para una cantidad de sal de 3 gr.	86

## INDICE DE LÁMINAS

Lámina 2.1.	Caracterización de la técnica de trazadores en una unidad de tratamiento.	6
Lámina 2.2.	Representación de la aplicación del trazador en forma de impulso (a) y en forma continua (b).	7
Lámina 2.3.	Curvas típicas de respuesta de diferentes tipos de unidades, cuando se aplican trazadores en forma de impulso.	8
Lámina 2.4.	Curvas de respuesta cuando la unidad tiene un comportamiento de flujo pistón (a), (c), (e) y (g). Curvas de respuesta cuando la unidad tiene un comportamiento de mezcla completa (b), (d), (f) y (h).	11
Lámina 3.1.	Tanque de mezcla completa.	18
Lámina 3.2.	Reactores en serie completamente mezclados.	20
Lámina 3.3.	Curvas típicas de respuesta de diferente $N$ , cuando se aplican trazadores en forma de impulso.	21
Lámina 3.4.	Un solo reactor completamente mezclado, con zonas muertas y cortocircuitos.	22
Lámina 3.5.	Reactores en serie, con zonas muertas y cortocircuitos.	23
Lámina 3.6.	Cantidad de trazador que permanece en el reactor. Curva de $1 - F(t)$ .	27
Lámina 3.7.	Representación del modelo de dispersión (flujo disperso en pistón) (Levenspiel, 1997).	28
Lámina 3.8.	Curvas típicas de respuesta en recipientes cerrados para distintas intensidades de retromezcla predichas por el modelo de dispersión (Levenspiel, 1997).	30
Lámina 3.9.	Curva de concentración del trazador en el efluente de un reactor.	31
Lámina 4.1.	Zonas hipotéticas en un sedimentador horizontal.	34
Lámina 4.2.	Geometría básica de flujo para sistemas de sedimentación inclinada (AWWA, 1999).	35
Lámina 4.3.	Relaciones geométricas de placas paralelas con flujo a contracorriente.	36
Lámina 5.1.	Prototipo de sedimentador de alta tasa utilizado para las pruebas con trazadores.	46
Lámina 5.2.	Vista en planta del prototipo de sedimentador de alta tasa.	47
Lámina 5.3.	Vista lateral Corte A-A' y vista frontal Corte B-B' del prototipo de sedimentador de alta tasa.	47
Lámina 5.4.	(a) Instalación de la entrada del sedimentador. (b) Instalación de la salida del sedimentador.	48
Lámina 5.5.	Instalación del dispositivo experimental en el laboratorio.	49
Lámina 5.6.	Esquema en perfil del dispositivo experimental.	49
Lámina 5.7.	Esquema en planta del dispositivo experimental.	50



Lámina 5.8.	Calibración volumétrica del rotámetro.	52
Lámina 5.9.	Inyección del colorante por medio de un aplicador en forma de aguja en un punto del sedimentador.	55
Lámina 6.1.	Comportamiento del flujo en el primer arreglo experimental.	61
Lámina 6.2.	Comportamiento del flujo en el segundo arreglo experimental.	61
Lámina 6.3.	Comportamiento del flujo en el tercer arreglo experimental.	62
Lámina 6.4.	Régimen laminar entre las mamparas.	63
Lámina 6.5.	Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 1.	67
Lámina 6.6.	Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 2.	69
Lámina 6.7.	Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 2.	69
Lámina 6.8.	Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 3.	71
Lámina 6.9.	Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 3.	72
Lámina 6.10.	Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 4.	74
Lámina 6.11.	Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 4.	74
Lámina 6.12.	Porcentaje de volumen aislado por los sellos hidráulicos en el sedimentador.	76
Lámina 6.13.	Pruebas de respuesta del trazador para las mismas condiciones de operación.	78
Lámina 6.14.	Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.1.	80
Lámina 6.15.	Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.2.	81
Lámina 6.16.	Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.3.	81
Lámina 6.17.	Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.4.	82
Lámina 6.18.	Calibración del modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos del experimento No. 3 al agregar 12 gramos de sal.	85
Lámina 6.19.	Calibraciones del modelo de Wolf y Resnick del experimento No. 1 al agregar 3 gramos de sal.	86

## NOMENCLATURA

$\tau$	Tiempo de residencia hidráulico o tiempo de retención nominal [T]
V	Volumen de la unidad [L <sup>3</sup> ]
Q	Gasto o caudal que pasa por el sedimentador [L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
C <sub>0</sub>	Concentración inicial de trazador [ML <sup>-3</sup> ]
C	Concentración de trazador a la salida de la unidad [ ML <sup>-3</sup> ]
w	Cantidad de trazador [M]
$\mu$	Valor medio o media de residencia real [T]
$\sigma^2$	Varianza [T <sup>2</sup> ]
$\theta$	Parámetro adimensional del tiempo []
E(t)	Parámetro adimensional de la concentración de trazador en el tiempo []
$\mu_\theta$	Parámetro adimensional de la media []
$\sigma_\theta^2$	Parámetro adimensional de la varianza []
F(t)	Función de distribución acumulada de tiempos de residencia []
N	Número de reactores idénticos []
(1-M)	Fracción de volumen con zonas muertas []
(1-n)	Fracción de flujo con cortocircuitos []
$\varepsilon$	Error entre valores experimentales y calculados por el modelo []
D/ $\mu$ L	Número de dispersión []
t <sub>i</sub>	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el influente [T]
t <sub>p</sub>	Tiempo moda o tiempo correspondiente a la concentración máxima de trazador [T]
t <sub>10</sub>	tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total de trazador [T]
t <sub>90</sub>	tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total de trazador [T]
v	Velocidad crítica de sedimentación [L <sup>3</sup> L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
T	Tiempo de residencia del flujo en la zona de sedimentación [T]
l	Longitud de la superficie de las mamparas [LT <sup>-1</sup> ]
v <sub>0</sub>	Velocidad promedio del flujo entre las superficies de las mamparas [LT <sup>-1</sup> ]
L	Longitud relativa del sedimentador []
Re	Número de Reynold []
Fr	Número de Fraude []
R <sub>h</sub>	Radio hidráulico [L]

## RESUMEN

Debido a la importancia de la búsqueda de modelos que puedan representar de manera confiable el comportamiento del flujo en unidades de tratamiento, se llevó a cabo la evaluación a una unidad prototipo de sedimentación de alta tasa mediante la técnica de trazadores.

Con los resultados de las pruebas de salmuera como trazador se obtuvieron las curvas *DTR*, se evaluaron los modelos de dispersión, el de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos, el de Wolf y Resnick y el basado en la tendencia de la curva, indicando todos ellos que el flujo en la unidad trabaja con tendencia a mezcla completa. El modelo de dispersión, el modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos y el modelo de Wolf y Resnick no indican de manera confiable los problemas hidráulicos presentados en la unidad de sedimentación. La tendencia del modelo de Wolf y Resnick es que a mayor flujo mezclado en la unidad de sedimentación, mayor es la fracción de volumen muerto.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que el modelo basado en la tendencia de la curva es el que da mayor información ya que describió los problemas hidráulicos observados en la unidad de sedimentación como zonas muertas, cortocircuitos y acumulación de trazador, que son parámetros importantes en la eficiencia de tratamiento de la unidad de sedimentación.

Las pruebas realizadas con azul de metileno permitieron establecer cualitativamente las causas que afectan el funcionamiento hidrodinámico del sedimentador como las estructuras de entrada y salida, generando mezclas de flujo y acumulación de colorante; sin embargo, no se pueden utilizar estas pruebas en unidades de plantas de tratamiento reales ya que no es posible observar el colorante dentro de ellas.

La información que se reporta en este trabajo de investigación contempla la descripción de la técnica de trazadores para obtener las curvas de distribución de tiempos de residencia de la corriente del fluido (capítulo 2), así como los modelos matemáticos empleados para la evaluación del funcionamiento hidráulico de la unidad de sedimentación (capítulo 3). En el capítulo 4 se muestra los principios básicos, los factores que influyen en la sedimentación de alta tasa y su evaluación. Posteriormente, se describe la metodología utilizada para desarrollar el estudio experimental en la unidad de sedimentación y la metodología de modelación (capítulo 5). El análisis de los resultados se presenta en el capítulo 6. Finalmente, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones del presente estudio.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

La mayoría de las plantas potabilizadoras en México funcionan con serios problemas de operación y mantenimiento lo que disminuye significativamente sus eficiencias (Martín et al, 1999). Muchas plantas de tratamiento de agua tienen problemas de funcionamiento debido a deficiencias hidráulicas por la mala distribución del flujo ocasionadas por problemas de diseño, mala operación o deficiente mantenimiento de las unidades de potabilización lo que ocasiona acumulación de lodo, baja eficiencia de la dispersión de coagulantes, turbulencia excesiva, menores tiempos de permanencia del agua, entre otros. Por lo tanto, es de prioridad la necesidad de mejorar el tratamiento en los sistemas ya existentes.

El comportamiento real de las unidades no se ajusta a situaciones idealizadas (flujo pistón y flujo completamente mezclado) ya que en la práctica existen los dos tipos de flujo.

El *flujo pistón* (FP) se caracteriza porque el fluido es ordenado sin que ningún elemento del mismo se mezcle con cualquier otro situado antes o después de él, y todas las moléculas atraviesan la unidad a la misma velocidad, por lo que no hay distribución de los tiempos de residencia. Entonces el tiempo de residencia en el reactor es el mismo para todos los elementos del fluido, por ejemplo: el comportamiento del flujo en un floculador hidráulico de mamparas.

El *flujo completamente mezclado* (FCM), conocido también como unidad ideal de tanque con agitación, es aquel que su composición en cada instante es la misma en todos los puntos de la unidad; por consiguiente, la corriente de salida tiene la misma composición que la del fluido contenido en la unidad, por ejemplo: el flujo en las unidades de mezcla rápida o en los floculadores mecánicos.

Adicionalmente, el comportamiento real de las unidades no se ajusta a situaciones idealizadas (flujo pistón o flujo completamente mezclado) ya que en la práctica existen los dos tipos de flujo, produciendo resultados adversos a los planeados en el diseño de los reactores. Estos resultados pueden ser causados por problemas de tipo hidráulico como cortocircuitos, recirculaciones o presencia de zonas estancadas dentro del reactor que disminuyen la eficiencia de las unidades de tratamiento (Weber, 1972).

La *zona muerta* representa un volumen de líquido que no se renueva constantemente en una unidad de tratamiento que trabaja durante un proceso de funcionamiento continuo. Las zonas muertas pueden ser originadas por la acumulación de lodo en floculadores y sedimentadores o por la agitación insuficiente de las paletas de los mezcladores mecánicos para la dispersión de los coagulantes o por problemas en el diseño.

El *cortocircuito* representa el volumen de líquido que sigue caminos preferenciales y sale del reactor sin mezclarse completamente, lo cual provoca que el tiempo de residencia de una parte del fluido sea más corto que el planteado durante el diseño. Por ejemplo, la dirección de rotación de las paletas puede favorecer que el flujo atraviese la unidad más rápidamente.

En la *recirculación* al contrario de los cortocircuitos, los tiempos de residencia son más prolongados que lo proyectado en el diseño de la unidad, siendo ocasionados porque parte del fluido que ya ha atravesado la unidad de tratamiento regresa y se incorpora nuevamente al volumen de la unidad. Estos pueden ser generados por la acción del viento en la superficie de los sedimentadores o la incorrecta agitación en los floculadores mecánicos, entre otras causas.

La necesidad de evaluar el funcionamiento hidráulico de las diferentes unidades de las plantas potabilizadoras tales como floculadores, sedimentadores o tanques de mezcla, obliga al uso de técnicas que permitan conocer el tiempo que permanece cada elemento del fluido dentro de la unidad.

El comportamiento del flujo de cualquier sistema se puede describir por su distribución de velocidades; sin embargo, las mediciones de los componentes de velocidad en grandes sistemas son complicadas de realizar, además de costosas (Zvirin y Shinnar, 1976). Por ello se han elaborado técnicas de trazado que proporcionan información sobre la cinemática del tanque que intentan conocer el tiempo que permanece cada elemento del fluido en la unidad. Una de estas técnicas emplea el monitoreo de señales estímulo-respuesta entre el flujo de entrada y salida de la unidad, y en forma práctica consiste en aplicar una cierta cantidad de sustancia inerte (trazador) a la entrada de la unidad para ser medida a la salida de ésta a través del tiempo.

Estas técnicas permiten el desarrollo de curvas de dispersión, a partir de las cuales se pueden evaluar las características hidráulicas (Jiménez y Buitrón, 1988). La forma de la curva indica el grado de flujo no ideal.

Estas curvas se analizan utilizando modelos matemáticos que describen el funcionamiento hidráulico de las unidades, o modelos semiempíricos en el análisis de la curva experimental y su correlación con las características hidráulicas del sistema.

El empleo de trazadores para estudiar el comportamiento hidráulico de fenómenos naturales, como el flujo de agua subterránea o superficial; o bien, para analizar el funcionamiento de procesos de tratamiento de aguas residuales, es una práctica común. Sin embargo, poco se utiliza en México para evaluar los procesos de potabilización (Martín et al, 1998).

En México, se llevó a cabo la evaluación de seis plantas potabilizadoras en la frontera norte del país que contaban con trenes convencionales de tratamiento, verificándose el funcionamiento de las etapas de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, siguiendo la metodología descrita en el “Manual de Evaluación de Plantas Potabilizadoras” elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. De manera general, en todas las plantas se detectaron problemas por la presencia de cortocircuitos, zonas muertas, tiempos de retraso y/o recirculación, sobre todo en los sedimentadores (Martín et al, 1998).

La sedimentación es un ejemplo típico en el cual el comportamiento hidráulico ejerce una influencia considerable en la eficiencia de la operación (Jiménez y Buitrón, 1988); por lo tanto, es necesario evaluar sus condiciones hidráulicas con la búsqueda de modelos adecuados para mejorar el proceso de sedimentación.

Para la modelación del flujo en las unidades de tratamiento de las plantas potabilizadoras de Matamoros, Río Bravo, Reynosa y Nuevo Laredo, Tam.; y Piedras Negras, Coah., se utilizaron los principales modelos de análisis del comportamiento de los trazadores: el modelo de dispersión, el modelo de Wolf y Resnick y el modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos (Martín et al, 1998).

El principal problema es que los resultados muestran que hay diferencias significativas en la información proporcionada por los modelos, sobre todo cuando los porcentajes de zonas muertas y cortocircuitos son importantes y existen corrientes de recirculación. Todos los modelos estudiados, no logran simular los flujos de recirculación, no se pudo llegar a un ajuste adecuado entre los valores teóricos y experimentales. Para determinar cual es el que describe el comportamiento real de los procesos, es necesario validarlos en campo o a nivel piloto (Martín et al, 1999).

## **ALCANCES**

Se utilizó un prototipo de sedimentador de alta tasa de flujo ascendente en el Laboratorio de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) como dispositivo experimental. Con los resultados obtenidos de la técnica de trazadores, se examinaron los modelos utilizados en la evaluación de las plantas potabilizadoras en la frontera norte (modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos, el modelo de dispersión y el modelo de Wolf y Resnick y el modelo basado en la tendencia de la curva) para establecer el comportamiento hidrodinámico y los problemas existentes en la unidad de sedimentación.

Para las pruebas experimentales se utilizó como trazador la salmuera, desde el punto de vista práctico, por ser fácil de aplicar, manipular y detectar a un bajo costo, y el colorante azul de metileno por disponibilidad y como auxiliar para observar cualitativamente el comportamiento del flujo en el sedimentador.

## **OBJETIVO**

Determinar, con el uso de trazadores, las condiciones hidráulicas de una unidad de sedimentación de alta tasa mediante la aplicación de modelos matemáticos.

Los objetivos del trabajo son:

- Establecer las condiciones hidráulicas de operación para el funcionamiento de un sistema en continuo para el prototipo de la unidad de sedimentación.
- Realizar pruebas experimentales utilizando colorante como auxiliar para observar el comportamiento del flujo en la unidad de sedimentación.
- Realizar pruebas idénticas con una misma concentración de salmuera para establecer que el flujo del sistema es estable.
- Realizar pruebas experimentales por medio de la técnica de trazadores, a diferentes concentraciones de sal, para determinar las curvas de estímulo-respuesta que permiten caracterizar la no idealidad del flujo.
- Calibrar los modelos con las curvas de *DTR* para determinar el tipo de flujo y los problemas hidráulicos en el sedimentador.

## **HIPOTESIS**

Los modelos utilizados en la evaluación de plantas potabilizadoras en la frontera norte (el modelo de dispersión, el modelo de Wolf y Resnick, el modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos y el modelo basado en la tendencia de la curva), pueden establecer de manera confiable el comportamiento del flujo a un prototipo de sedimentador de alta tasa.

# CAPÍTULO 2

## LA TÉCNICA DE TRAZADORES

Un estudio de trazadores puede servir para ajustar un modelo para tener una expresión con parámetros cinéticos que describan el comportamiento hidráulico, para detectar fugas o para estimar relaciones entre trazador-partículas (Morgan et al, 1999). Este trabajo está enfocado a la determinación de las tendencias del comportamiento hidráulico.

El objetivo de las pruebas con trazadores para este trabajo es el de determinar la proporción de flujo pistón y flujo mezclado, de cortocircuitos y zonas muertas existentes, agregando al flujo sustancias llamadas trazadoras, las cuales se inyectan en el afluente del tanque que se quiere analizar, en concentración conocida, y determinando a la salida del mismo la distribución de la concentración a través del tiempo.

En este capítulo se describe la técnica de trazadores para determinar las curvas de distribución de tiempos de residencia *DTR* de la corriente del fluido.

### 2.1. TEORÍA DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA

Los principios teóricos de la técnica de monitoreo estímulo-respuesta se basan en conocer dentro de una unidad de tratamiento, el tiempo de residencia hidráulico  $\tau$ , el cual se define por la relación entre el volumen  $V$  de la unidad y el gasto  $Q$  que alimenta a la misma, y se representa como:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad 2.1$$

Así mismo, se podría decir que es el tiempo que tarda una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir de la unidad, en el caso en que todas las partículas del fluido evolucionan en la misma forma dentro de esa unidad, corresponde a flujo estable ideal (Pérez, 1977).

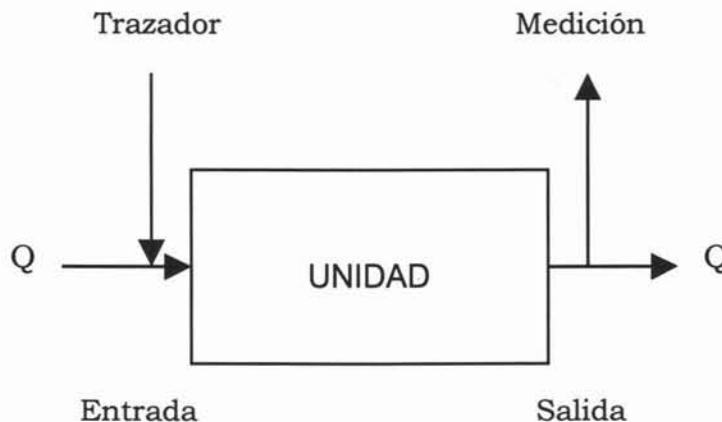
Para reactores ideales (flujo completamente mezclado y flujo pistón) el tiempo de residencia es igual para cada una de las moléculas del fluido. Pero, en la práctica es



difícil que esto ocurra ya que las condiciones hidráulicas del flujo (regiones muertas, corrientes de inercia, cortocircuitos, etc.) hacen imposibles las condiciones del flujo estable. Por lo tanto, debido a la configuración de las unidades, los elementos del fluido tardan tiempos diferentes en pasar a través del reactor.

Se ha notado que el comportamiento diferente del flujo dentro de la unidad, tiene como resultado períodos de retención del agua en los reactores diferente a los planeados durante el diseño de la misma (Pérez y Cánepa, 1992).

Para conocer, en forma experimental, lo que sucede en una unidad de tratamiento y tener una representación de su distribución de velocidades del fluido en el interior de la unidad, se puede aplicar el método de *estímulo-respuesta*. Este método consiste en aplicar un trazador conocido con una concentración de referencia bien caracterizada y parametrizada en la zona de entrada, y medir su concentración en la zona de salida de la unidad a través del tiempo. Esta técnica experimental se representa con un diagrama de bloques como se muestra en la lámina 2.1.



**Lámina 2.1.** Caracterización de la técnica de trazadores en una unidad de tratamiento.

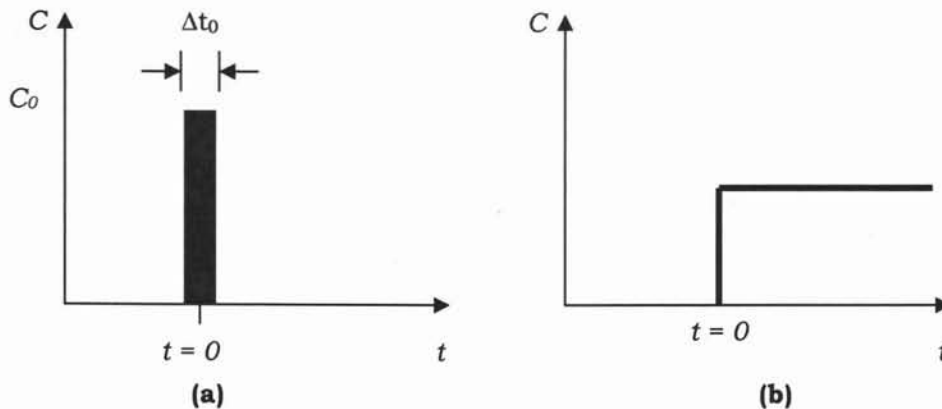
El resultado de la aplicación de la técnica de trazadores es determinar una función de distribución de la concentración del trazador ( $C$ ) a la salida de la unidad en el tiempo ( $t$ ), obteniéndose así, la distribución de los tiempos de residencia en una unidad. La forma de la curva indica el grado de flujo no ideal.

## 2.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA

Es necesario estudiar la distribución de los tiempos de residencia en el reactor, para conocer la forma a la que fue sometida la masa líquida en un determinado tratamiento (Pérez, 1977).

La distribución de los tiempos de residencia  $DTR$  de un reactor depende del tipo de flujo que ocurre dentro del mismo y de la forma como se inyecta el trazador. Hay dos formas de aplicarlo: tipo escalón (continua) y en forma de impulso (instantánea).

La representación de la concentración de trazador en función del tiempo a la entrada y durante la inyección del trazador será entonces (ver lámina 2.2):



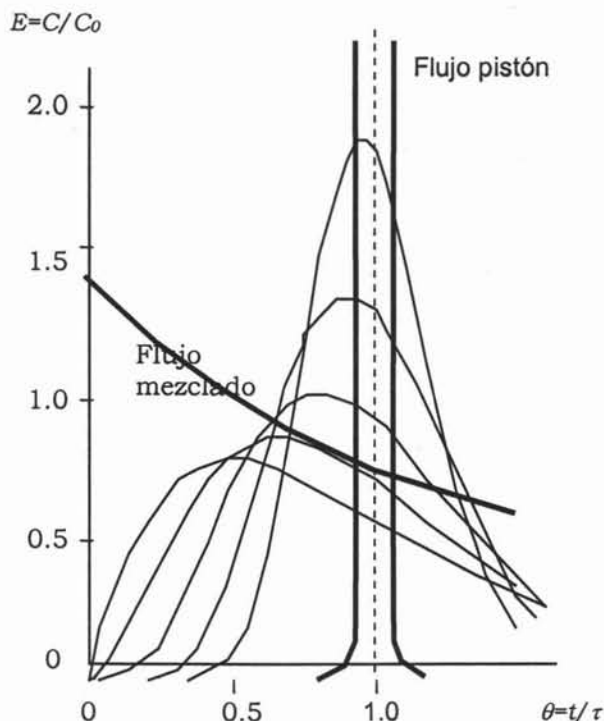
**Lámina 2.2.** Representación de la aplicación del trazador en forma de impulso (a) y en forma continua (b).

donde  $\Delta t_0$  es el tiempo de inyección del trazador y  $C_0$  la concentración inicial de trazador.

Para el caso de mezcla completa o de flujo pistón ideal, cuando se inyecta el trazador en forma de impulso, se obtienen funciones de respuesta que se observan en la lámina 2.3. Sin embargo, en la realidad, el flujo no es ideal y por esta razón se obtienen diferentes tipos de respuestas influenciadas por el tipo de flujo que se tenga en la unidad y la forma como se aplique el trazador. Entonces, el resultado de la aplicación de la técnica de trazadores es una función de distribución que indica en forma directa el grado de flujo no ideal.

Esta distribución se conoce como distribución de la edad a la salida  $E(t)$ , o distribución del tiempo de residencia  $DTR$  del fluido (lámina 2.3.) (Levenspiel, 1997).

La función  $DTR$  no describe completamente a un reactor en particular o a un sistema de reactores. Cuando se analizan reactores no ideales, la función  $DTR$  no es suficiente para determinar su desempeño. Para interpretar la respuesta de la  $DTR$  es necesario contar con un modelo adecuado de patrones de flujo de reactores no ideales que caracterizan apropiadamente el reactor (Fogler, 1992).



**Lámina 2.3.** Curvas típicas de respuesta de diferentes tipos de unidades, cuando se aplican trazadores en forma de impulso.

En casos donde no es posible conocer la concentración inicial de trazador  $C_0$ , ésta se puede determinar integrando el área bajo la curva de variación de la concentración de trazador en el tiempo a la salida de la unidad, de forma que:

$$C_0 = \frac{\int_0^{\infty} QC(t)dt}{V} = \frac{Q}{V} \int_0^{\infty} C(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} C(t)dt = \frac{\sum C \Delta t}{\tau} \quad 2.2$$

donde  $C$  es la concentración del trazador a la salida de la unidad en el tiempo  $t$ ;  $C_0$ , la concentración inicial del trazador, considerando que éste se reparte uniformemente en el volumen de estudio ( $C_0=w/V$ ) y,  $w$  es la cantidad del trazador utilizado para la prueba (ver lámina 2.3).

### 2.2.1. Conceptos matemáticos de la DTR

La forma de la función de distribución de tiempos de residencia permite determinar los momentos de primer orden (tiempo medio o media  $\mu$ ) y de segundo orden (dispersión o varianza  $\sigma$ ).

Para determinar el tiempo medio se puede utilizar la relación siguiente:

$$\mu = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\sum tC(t)\Delta t}{\sum C(t)\Delta t} \quad 2.3$$

En teoría, el valor medio de residencia real  $\mu$  es igual al tiempo de retención nominal  $\tau$ , y varía dependiendo de la *DTR* reales en la corriente de salida de la unidad.

Y la varianza se determina como:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t-\mu)^2 C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\sum t^2 C(t)\Delta t}{\sum C(t)\Delta t} - \mu^2 \quad 2.4$$

En este caso la varianza representa el cuadrado de la amplitud de la distribución y su unidad es el tiempo (Morgan et al, 1997). El uso de la varianza se utiliza para comparar la dispersión entre una curva experimental contra una curva teórica de flujo ideal.

### 2.2.2. Adimensionamiento de la *DTR*

De los resultados de la aplicación del método de *estímulo-respuesta* se determinan los siguientes parámetros adimensionales del tiempo  $\theta$ , y la concentración  $E(t)$  de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad 2.5$$

$$E(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad 2.6$$

La media y la varianza en forma adimensional es:

$$\mu_{\theta} = \frac{\mu}{\tau} \quad 2.7$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\tau^2} \quad 2.8$$

La ventaja de utilizar los valores de la media  $\mu_{\theta}$  y la varianza  $\sigma_{\theta}^2$  en forma adimensional es que realizan comparaciones entre diferentes tamaños de unidades de tratamiento y diferentes valores de concentración inicial.

### 2.2.3. Características de la DTR

La forma de una curva de distribución de tiempos de residencia permite caracterizar la no idealidad del flujo en un reactor (ver lámina 2.4).

Cuando la media es igual al tiempo de retención hidráulico,  $\tau = \mu$ , indica que no hay zonas muertas ni cortocircuitos en la unidad (lámina 2.4a y 2.4b). Si  $\mu$  es menor que  $\tau$ , quiere decir que el flujo pasa a través de canalizaciones y/o hay zonas muertas (lámina 2.4c y 2.4d), entonces la distribución de tiempos de residencia (DTR) puede indicar problemas de recirculación dentro del tanque (lámina 2.4e y 2.4f). Cuando el tiempo medio de residencia real  $\mu$  es mayor al tiempo de retención hidráulico  $\tau$ , puede existir un error en la medida del caudal o en el volumen disponible, o el trazador no es inerte y es absorbido por el flujo (lámina 2.4g y 2.4h).

Por definición de conservación de masa la DTR cumple con:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad 2.9$$

donde  $E(t)$  es la distribución de tiempos de residencia (DTR), y la función de distribución acumulada de tiempos de residencia  $F(t)$  es:

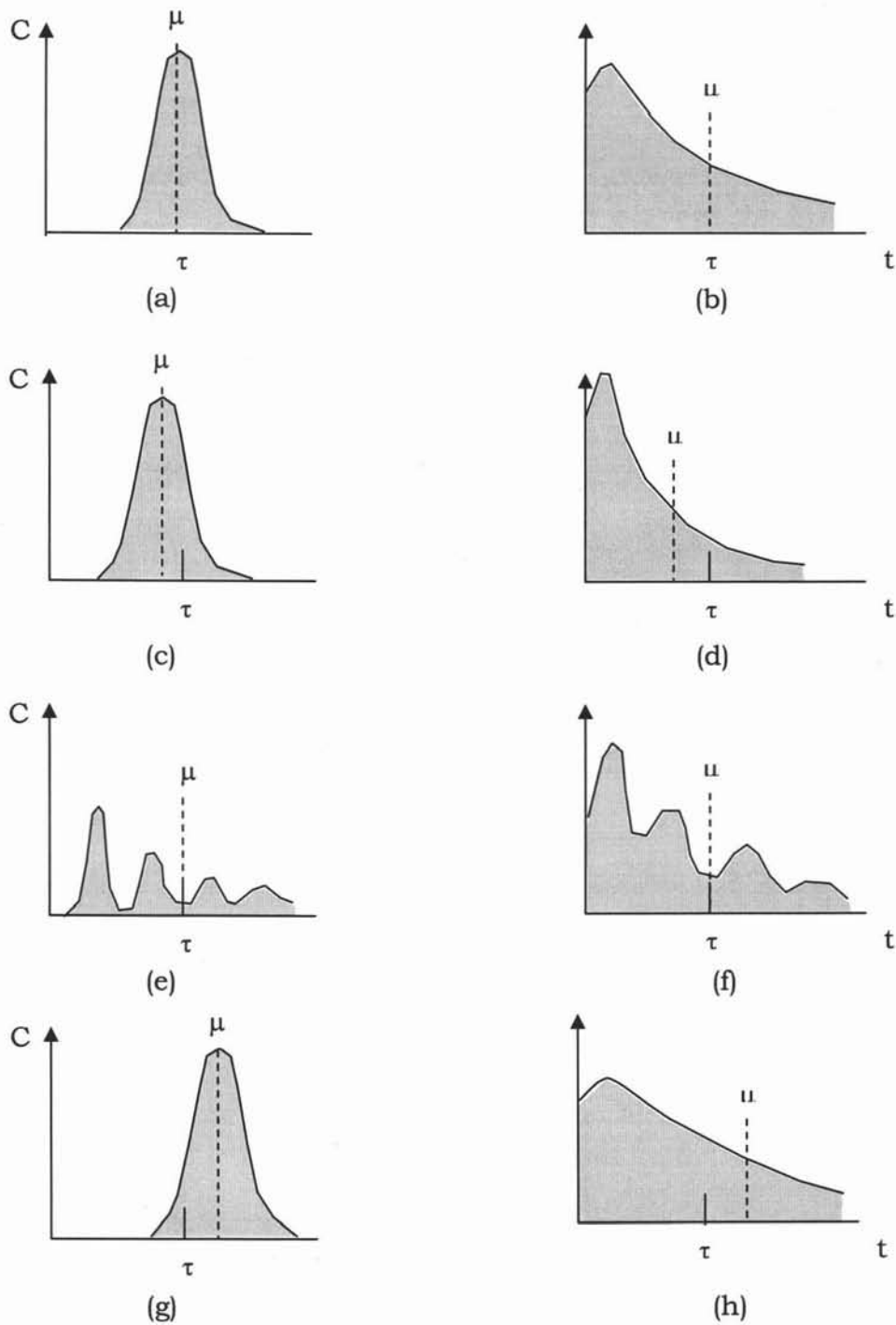
$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad 2.10$$

$$E(t) = \frac{dF}{dt} \quad 2.11$$

Aplicando la relación 2.9 en el límite de integración para un tiempo arbitrario  $t > 0$ , en la ecuación 2.10 se tiene:

$$1 - F(t) = \int_t^{\infty} E(t) dt \quad 2.12$$

Lo anterior se cumple para un sistema cerrado, donde el flujo que ya salió de la unidad, no vuelve a incorporarse a la zona de entrada del sistema (se cumple el principio de conservación de masa, ecuación 2.9).



**Lámina 2.4.** Curvas de respuesta cuando la unidad tiene un comportamiento de flujo pistón (a),(c),(e) y (g).  
 Curvas de respuesta cuando la unidad tiene un comportamiento de mezcla completa (b), (d), (f) y (h).

### 2.3. SUSTANCIAS TRAZADORAS

Las sustancias trazadoras más utilizadas para realizar la prueba experimental de estímulo-respuesta son (Pérez, 1981):

- Isótopos radioactivos
- Colorantes como fluoresceína, rodamina, azul de metileno, tintes orgánicos, entre otros.
- Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio; fluoruros o nitratos especialmente de sodio
- Ácido clorhídrico o benzóico
- Otras sustancias químicas: alizarim, aspirol, naptol, etc.

El uso de radioisótopos permite una medición continua "in situ" sin toma de muestras ni acceso al interior de las unidades además de que los detectores de radiación son más sensibles, pero tiene la desventaja de requerir un equipo de medición muy sofisticado.

Desde el punto de vista práctico, los cloruros son los más utilizados para dosificación instantánea debido a que no modifican la operación del sistema, son fáciles de aplicar, manipular y detectar ya que se determinan "in situ" con técnicas conductimétricas. Además se disuelven fácilmente con el agua, no interactúan en forma significativa con ésta y se pueden utilizar en grandes cantidades con un bajo costo.

Antes de elegir el tipo de trazador a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas.

### 2.4. MODO DE APLICACIÓN DE LOS TRAZADORES

La aplicación del trazador en una prueba experimental de estímulo-respuesta es recomendable realizarlo:

- en forma instantánea (de impulso), o
- en forma continua

Para la aplicación en forma instantánea se introduce una concentración  $C_0$  a la entrada de la unidad en un tiempo inferior a  $1/30$  del tiempo teórico de retención  $\tau$ , cuidando tener una mezcla completa con la masa de agua a la entrada de la unidad.

Para el caso de aplicación continua, la concentración  $C_0$  debe ser constante por un tiempo no menor a tres veces el período de retención nominal  $\tau$ , y al final de este tiempo se interrumpe la dosificación. La aplicación en forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando se interrumpe la misma). Además, se obtiene una concentración de equilibrio. Esta técnica tiene el inconveniente de utilizar grandes cantidades de trazador, y es difícil mantener la concentración constante.

En este estudio, las pruebas de trazadores se aplicaron de manera instantánea con las siguientes recomendaciones prácticas:

- Utilizar una concentración tal que pueda medirse con facilidad en el agua (Pérez, 1981) o una concentración de trazador  $C_0$  entre 20-30 mg/l (Martín, 1999). Es importante señalar que en todos los casos debe conocerse la concentración del trazador en el agua cruda para restar ese valor a los resultados de las mediciones de la prueba. En forma práctica, la concentración inicial de trazador se calcula con la relación  $C_0 = w/V$ , entonces, la cantidad de sal utilizada  $w$  se calcula con relación al volumen total de la unidad  $V$ .
- La toma de muestras a la salida de la unidad debe extenderse por un periodo de tiempo tal, hasta obtenerse por lo menos tres ensayos consecutivos de la concentración inicial  $C_i$  (Pérez, 1992).
- Aplicar una concentración  $C_0$  a la entrada del sedimentador en un tiempo de inyección de trazador muy corto, inferior a  $1/30$  del tiempo teórico de retención  $\tau$  y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua que se piensa analizar (Arboleda, 2000).
- Para obtener una buena correlación de los datos experimentales, el tiempo de las lecturas deben ser lo más cercanas posibles.

## 2.5. LIMITACIONES DE LA PRUEBA CON TRAZADORES

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer cómo se desplazan las diferentes masas de agua dentro de las unidades de tratamiento, pero los datos obtenidos corresponden solamente al momento de la prueba y no representan necesariamente el comportamiento en todas las condiciones de operación.

Además, no indican eficiencias de los reactores, pues estos procesos dependen no sólo de las características hidráulicas sino también de las químicas. Por lo tanto, puede presentarse el caso de que un sedimentador con un mal comportamiento hidráulico (flujo en pistón menor del 60%) produzca una remoción mayor de partículas, que otro con un buen funcionamiento hidráulico pero con partículas que tienen velocidades de sedimentación menores.

Este tipo de análisis no determina trayectorias o distribución de las partículas, solo indica su tiempo de permanencia.

Para el caso de procesos lentos, el trazador dentro de la unidad va a producir contaminación duradera del medio.

Para tener resultados experimentales significativos, al momento de ejecutar la técnica de trazadores, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Mantener un flujo constante durante un lapso tres veces mayor al tiempo de residencia teórico del ensayo.
- El flujo debe ser segregado, es decir que no se mezcle con el flujo de otras unidades.



- Si el reactor contiene lodos depositados puede producir interferencias especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masa, por lo cual la unidad debe estar limpia y sin lodos.
- El uso de altas concentraciones de trazador puede producir corrientes de densidad, dando resultados erróneos.
- La temperatura debe permanecer lo más estable posible para evitar corrientes térmicas que puedan afectar los resultados.
- Curvas resultantes del ensayo de trazadores en el mismo reactor deben tener igualdad de resultados, especialmente en lo relacionado al tiempo inicial de presencia de trazador, valores de concentración máxima y áreas bajo la curva.

A continuación se describen los modelos utilizados para describir del comportamiento hidrodinámico de una unidad de sedimentación con base en los resultados obtenidos de las pruebas con trazadores.

# CAPÍTULO 3

## MODELOS MATEMÁTICOS

Para analizar las características hidráulicas de un reactor, por medio de las curvas de distribución de tiempos de residencia (*DTR*) obtenidas de la técnica de trazadores, tres métodos pueden ser empleados: (1) la determinación de un tiempo de retención hidráulico medio y la varianza por mediciones del área bajo la curva; (2) el uso de modelos matemáticos para evaluar el patrón de flujo que se ajuste a la forma de las curvas *DTR* (tal como los modelos de tanques en serie, modelo de dispersión axial, modelos combinados, etc.); y (3) el cálculo de índices o parámetros que tienen un soporte empírico o semiempírico (Morgan et al, 1999).

Una forma de describir la magnitud de los problemas hidráulicos de las unidades es utilizando modelos matemáticos. Estos consisten en simular o describir un fenómeno que conduce a un problema matemático a resolver mediante técnicas matemáticas. En algunos casos, las ecuaciones que rigen fenómenos físicos no pueden resolverse analíticamente, siendo necesario emplear métodos aproximados.

En este capítulo se analizan, los modelos utilizados para describir el comportamiento hidrodinámico de unidades de tratamiento. Los datos, que alimentan estos modelos, son obtenidos por medio de pruebas experimentales utilizando la técnica de trazadores, tal como se describió en el capítulo anterior.

### 3.1. MODELOS BASADOS EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Estos modelos utilizan el concepto de *función de transferencia*, donde se considera un volumen de control como una caja negra con estímulos de entrada y salida. Si se define  $x(t)$  como la señal de entrada, y después de atravesar la unidad, ésta se convierte en  $y(t)$  como la señal transformada, la función de transferencia  $G(s)$  se calcula como el cociente de la transformada de Laplace de la señal de salida  $y(s)$ , entre la transformada de Laplace de la señal de entrada  $x(s)$  (Ogata, 1993):

$$\begin{aligned} L\{x(t)\} &= x(s) \\ L\{y(t)\} &= y(s) \end{aligned}$$

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad 3.1$$

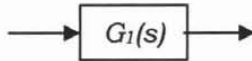
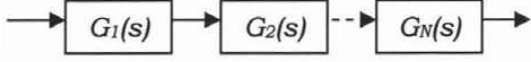
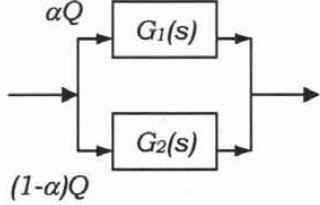
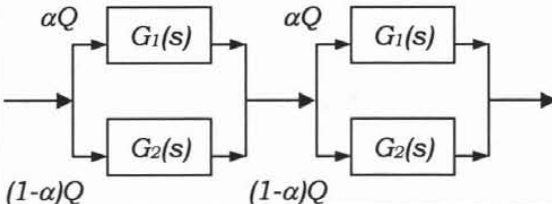
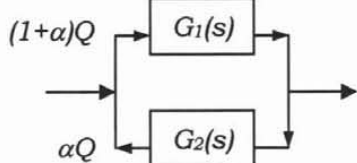
La función de transferencia global  $G(s)$  resulta de la combinación de diferentes funciones de transferencia que caracterizan el tipo de flujo, como se puede observar en la tabla 3.1.

Para el caso de unidades que trabajan en flujo pistón, la función de distribución en respuesta a una inyección de pulso, es un pico de altura infinita y ancho cero, siendo su área igual a uno. Esta función es para un tiempo  $t = \tau$ , como se muestra a continuación:

$$E(t) = \delta(t - \tau) \quad 3.2$$

Las propiedades de la "Delta de Dirac" son:

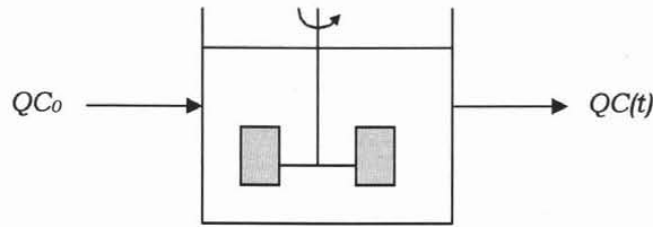
$$\begin{aligned} \delta(x) &= 0, x \neq 0 \\ \delta(x) &= \infty, x = 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx &= 1 \\ \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \delta(x - \tau) dx &= g(\tau) \end{aligned} \quad 3.3$$

Tipo de flujo	Combinación	Representación
Mezcla completa		
Pistón	<b>En serie</b> $G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot \dots$	
Zona muerta o cortocircuito	<b>En paralelo</b> $G(s) = \alpha G_1(s) + (1 - \alpha)G_2(s)$	
Pistón con zona muerta o cortocircuito	<b>En serie y paralelo</b> $G(s) = G'_1(s) \cdot G'_2(s) \cdot \dots$ donde: $G'_1 = G'_2 = \dots = \alpha G_1(s) + (1 - \alpha)G_2(s)$	
Recirculación	<b>En círculo</b> $G(s) = \frac{G_1(s)}{1 + \alpha - \alpha G_1(s) \cdot G_2(s)}$	

**Tabla 3.1.** Representación de las funciones de transferencia para diferentes tipos de flujo (Martín et al., 1999).

### 3.1.1. Modelo para un reactor de mezcla completa

Suponiendo el caso de que un reactor tenga un volumen de agua ( $V$ ), donde se aplica un trazador en forma de impulso ( $w$ ) el cual se disuelve y se mezcla completamente en toda la masa de agua, ver lámina 3.1, entonces se tendrá que la concentración de esa sustancia en el volumen es:  $C_0 = w/V$ . Si ese reactor tiene un flujo  $Q$ , en el tiempo  $t = 0$ , toda el agua que entra se mezcla completa e instantáneamente con el agua del reactor. Al medir la concentración de dicha sustancia trazadora a la salida del mismo, se encontrará que la concentración  $C(t)$  va disminuyendo progresivamente a través del tiempo.



**Lámina 3.1.** Tanque de mezcla completa.

La señal de entrada bajo estas circunstancias será igual a  $QC_0(t)$ , y el balance de materia se puede establecer de la forma siguiente:

$$QC_0(t)dt = QC(t)dt + VdC \quad 3.4$$

o también

$$C_0(t) = \frac{QC(t)dt + VdC}{Qdt} = C(t) + \frac{V}{Q} \frac{dC}{dt} \quad 3.5$$

Sustituyendo la ecuación 2.1 en la 3.5, se obtiene:

$$C_0(t) = C(t) + \tau \frac{dC}{dt} \quad 3.6$$

En el dominio de Laplace, la ecuación 3.6 queda expresada como:

$$C_0(s) = C(s) + \tau sC(s) \quad 3.7$$

y, reordenando,

$$C_0(s) = C(s)(1 + \tau s) \quad 3.8$$

Como la función de transferencia global  $G(s)$  es:

$$G(s) = \frac{C(s)}{C_0(s)} \quad 3.9$$

Sustituyendo la ecuación 3.8 en la 3.9 se tiene:

$$G(s) = \frac{C(s)}{C(s)(1 + \tau s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad 3.10$$

Finalmente aplicando la transformada inversa de Laplace en la ecuación 3.10,

$$E(t) = L^{-1}[G(s)] = \frac{1}{\tau} e^{(-t/\tau)} \quad 3.11$$

y considerando que  $E(\theta) = \tau E(t)$ , adimensionando la ecuación 3.11, resulta el modelo de un reactor de mezcla completa:

$$E(\theta) = e^{-\theta} \quad 3.12$$

Por otra parte, para este caso en particular el modelo anterior puede ser desarrollado en forma directa utilizando un modelo de mezcla en base a ecuaciones diferenciales. En donde se acepta que se tiene una reacción de primer orden, y por lo tanto aplicando el principio de conservación de masa y considerando que no hay variación en el almacenamiento, dentro de la unidad se tiene:

$$\frac{C}{\tau} = -\frac{dC}{dt} \quad 3.13$$

Donde  $C/\tau$  es la cantidad de trazador que entra en la unidad, y  $dC/dt$  el flujo de trazador que sale de la misma.

Integrando la ecuación 3.13 entre los límites  $C = C_0$  y  $C = C$ , para  $t = 0$  y  $t = t$ , donde  $C$  es la concentración que permanece en el reactor en el tiempo  $t$ , y  $C_0$  es la concentración aplicada, en el tiempo  $t = 0$ .

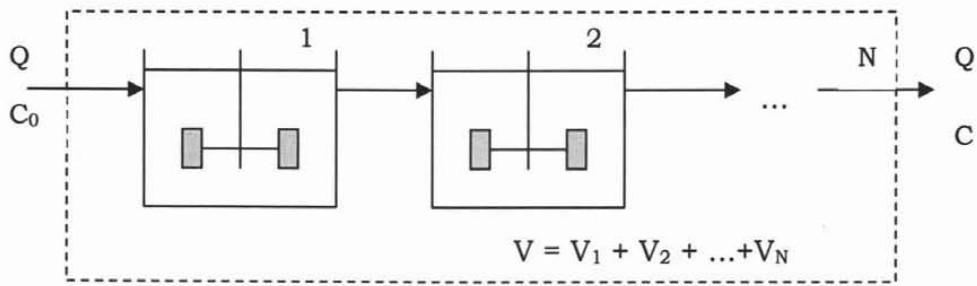
$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\int_0^t \frac{dt}{\tau}$$

y por lo tanto

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 3.14$$

### 3.1.2. Modelo para reactores en serie

Este modelo supone que el reactor puede ser representado por varios tanques en serie del mismo tamaño, funcionando como mezcla completa ideal, en este caso, el único parámetro a determinar es el número de tanques (Levenspiel, 1997). El modelo de varios reactores en serie describe el comportamiento del reactor como mezcla completa o flujo pistón, como se muestra en la lámina 3.2.



**Lámina 3.2.** Reactores en serie completamente mezclados.

Este modelo, en lugar de tener un solo reactor con un tiempo nominal de retención  $\tau$  tiene  $N$  reactores idénticos con un volumen  $V_i = V/N$  y un tiempo de retención  $\tau_i = \tau/N$  para cada reactor. De acuerdo a la tabla 3.1, la función de transferencia global de una serie de reactores se calcula como:

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \dots G_N(s) \quad 3.15$$

Entonces, si la función de transferencia para cada reactor completamente mezclado se representa por un modelo del tipo de mezcla completa (ecuación 3.10), el tiempo de residencia de cada reactor  $\tau_i$  es:

$$G_i(s) = \frac{1}{1 + \tau_i s} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{N} s} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad 3.16$$

y la función de transferencia global de este modelo es:

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \dots G_N(s) = \left[ \frac{1}{1 + \frac{\tau}{N} s} \right]^N = \left[ \frac{N}{N + \tau s} \right]^N = \frac{N^N}{\left[ \tau \left( s + \frac{N}{\tau} \right) \right]^N} = \frac{N^N}{\tau^N \left[ s - \left( -\frac{N}{\tau} \right) \right]^N} \quad 3.17$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace en la ecuación 3.17 se obtiene la función de distribución de tiempos de residencia:

$$E(t) = L^{-1}G(s) = \left[ \frac{N}{\tau} \right]^N L^{-1} \left\{ \frac{1}{\left[ s - \left( -\frac{N}{\tau} \right) \right]^N} \right\} = \frac{N^N}{\tau^N} \frac{t^{N-1} e^{(-Nt/\tau)}}{(N-1)!} = \frac{N^N t^{N-1} e^{(-Nt/\tau)}}{\tau^N t (N-1)!} \quad 3.18$$

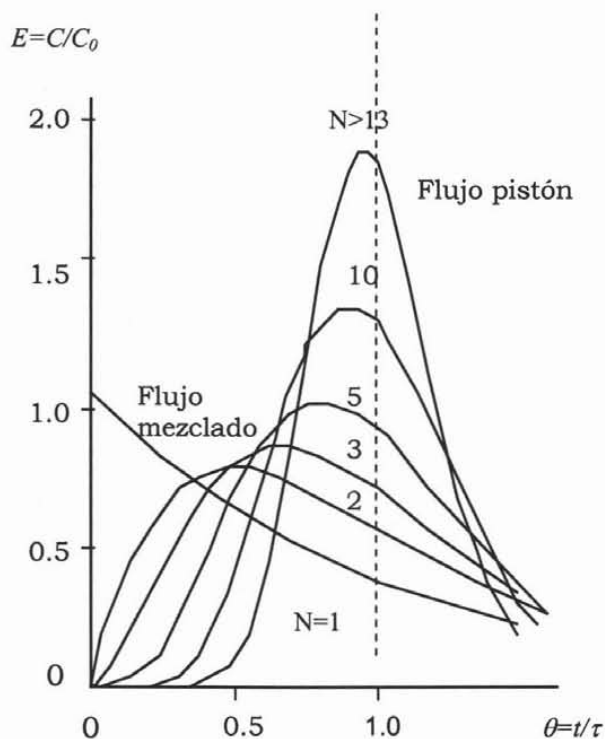
Adimensionando la ecuación 3.18, se tiene:

$$E(t) = \frac{N^N \theta^N e^{(-N\theta)} \tau}{t(N-1)! \tau} = \frac{N^N \theta^N e^{(-N\theta)}}{\tau (N-1)! \theta} \quad 3.19$$

Al hacer que  $E(\theta) = \tau E(t)$ , resulta:

$$E(\theta) = \frac{N^N \theta^{N-1} e^{-N\theta}}{(N-1)!} \quad 3.20$$

Las curvas características para diferentes valores de  $N$ , se pueden representar de forma como se muestra en la lámina 3.3:

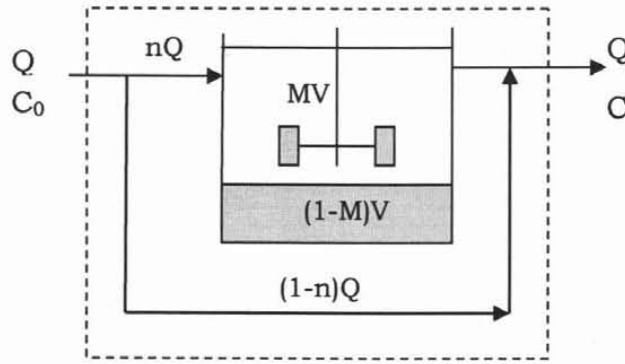


**Lámina 3.3.** Curvas típicas de respuesta de diferente  $N$ , cuando se aplican trazadores en forma de impulso.

### 3.1.3. Modelo para un reactor con zonas muertas y cortocircuitos

Este modelo describe el comportamiento de un reactor como mezcla completa con zonas muertas y cortocircuitos ( ver lámina 3.4).





$(1-n)$  = fracción de flujo con cortocircuito  
 $(1-M)$  = fracción de volumen con zonas muertas

**Lámina 3.4.** Un solo reactor completamente mezclado, con zonas muertas y cortocircuitos.

Considerando  $G_1(s)$  la función de transferencia que describe el tanque completamente mezclado con zonas muertas y  $G_2(s)$  la que describe el flujo pistón, la función de transferencia global descrita en la tabla 3.1 es:

$$G(s) = nG_1(s) + (1-n)G_2(s) \quad 3.21$$

En este caso el tiempo de residencia de cada unidad es  $\tau = \frac{MV}{nQ} = \frac{M\tau}{n}$  y por lo tanto, la función de transferencia que describe el tanque completamente mezclado con zonas muertas es (ver ecuación 3.10):

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + \frac{M\tau}{n}s} \quad 3.22$$

El cortocircuito correspondiente a la función de impulso, en la cual no hay transformación de lo que entra y sale, por definición es:

$$G_2(s) = 1 \quad 3.23$$

Sustituyendo la ecuación 3.22 y 3.23 en la 3.21 se obtiene la función de transferencia global para un reactor con zonas muertas y cortocircuitos:

$$G(s) = \frac{\frac{n^2}{M\tau}}{s - \left(\frac{-n}{M\tau}\right)} + (1-n) \quad 3.24$$

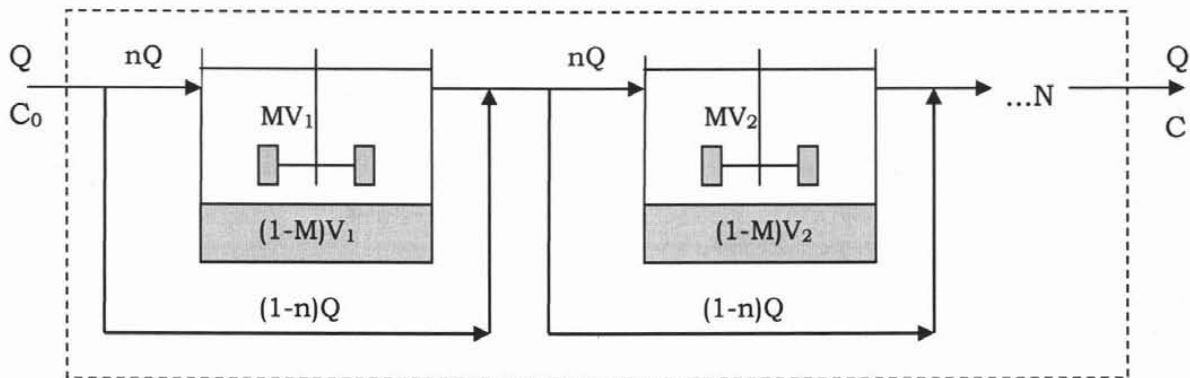
Nuevamente, aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación anterior:

$$E(t) = L^{-1}G(s) = \frac{n^2}{M\tau} e^{\left(\frac{-nt}{M\tau}\right)} \quad 3.25$$

Adimensionando la ecuación 3.25 y considerando el concepto de  $E(\theta) = \tau E(t)$  se llega a la representación final de un modelo para un reactor perfectamente mezclado con zonas muertas y cortocircuitos:

$$E(\theta) = \frac{n^2}{M} e^{\left(\frac{-n\theta}{M}\right)} \quad 3.26$$

### 3.1.4. Modelo para reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos



- $N$  = número de tanques idénticos
- $(1-n)$  = fracción de flujo con cortocircuito
- $(1-M)$  = fracción de volumen con zonas muertas

**Lámina 3.5.** Reactores en serie, con zonas muertas y cortocircuitos.

Combinando los conceptos aplicados en las secciones 3.1.2 y 3.1.3 se obtiene un modelo que incluye los parámetros  $n$ ,  $N$  y  $M$  cuando se aplica el trazador como un impulso:

$$E(\theta) = \frac{Nn}{M} \sum_{i=1}^N \frac{N! e^{\frac{-nN\theta}{M}} \left(\frac{Nn\theta}{M}\right)^{i-1} (1-n)^{N-i} n^i}{i!(N-i)!(i-1)!} \quad 3.27$$

donde la media  $\mu$  y la varianza  $\sigma^2$  para estos modelos tienen las siguientes características:

$$\mu = M\tau \quad 3.28$$

$$\sigma^2 = \frac{M^2(2-n)}{nN} \tag{3.29}$$

El rango de aplicación del modelo 3.29 se delimita para (Martín et al, 1999):

$$0 \leq \frac{\sigma^2}{\mu^2} \leq 1 \tag{3.30}$$

donde  $\sigma^2/\mu^2 = 0$  indica que el reactor trabaja como flujo pistón y  $\sigma^2/\mu^2 = 1$  como mezcla completa.

Para ajustar las mediciones experimentales con el modelo descrito en la ecuación 3.27 y para determinar los parámetros  $M$ ,  $n$  y  $N$ , se puede utilizar un método iterativo que minimice el error  $\varepsilon$ , entre los valores experimentales y calculados en el modelo de la forma siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum \left[ \left( \frac{C}{C_o} \right)_{\text{calculado}} - \left( \frac{C}{C_o} \right)_{\text{teórico}} \right]^2}}{\text{(Número de mediciones - 1)}} \tag{3.31}$$

Una aproximación para determinar el número de tanques en serie, se obtiene de la siguiente manera (Martín et al, 1999):

$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{1}{N} \tag{3.32}$$

Esta relación es válida en la medida que se conozca toda la curva experimental. La fracción de zonas muertas (1-M), se determina considerando que ésta es una medida de la desviación que existe entre el tiempo teórico de residencia y el tiempo medio de residencia, ecuación 3.28.

### 3.2. MODELO SIMPLIFICADO - TEORÍA DE WOLF-RESNICK

El modelo de Wolf y Resnick asume que el flujo dentro de una unidad tiene un comportamiento mixto, es decir parte como flujo pistón y parte como mezcla completa, además considera que existen segmentos de volumen del tanque sin flujo preferencial conocido como “zona muerta”.

El volumen de flujo dentro de una unidad se puede descomponer en dos segmentos, una parte como flujo pistón ( $p$ ) y otra como flujo no pistón ( $1-p$ ), y el comportamiento general del flujo dentro de una unidad se representa de la siguiente forma:

$$\text{Flujo pistón} + \text{flujo no pistón} = 1 \tag{3.33a}$$

$$p + (1-p) = 1 \tag{3.33b}$$

Para introducir el concepto de volumen muerto, si ( $m$ ) es la fracción del volumen considerado como espacio muerto y ( $1 - m$ ) la que no lo es, entonces la ecuación 3.3b se puede denotar como:

$$\text{Flujo pistón} + \text{flujo no pistón} + \text{espacio muerto} = 1 \quad 3.33c$$

$$[p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m = 1 \quad 3.33d$$

Considerando un flujo perfectamente mezclado, el cual se describió detalladamente en el subcapítulo 3.1.1., se tiene:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 3.34$$

donde  $C$  es la concentración de trazador a la salida de la unidad,  $C_0$  la concentración inicial de trazador y  $\tau$  el tiempo de residencia teórico de la unidad. Sustituyendo la ecuación 2.1 que define el tiempo de residencia  $\tau$  dentro de la unidad en la ecuación 3.34 se tiene:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{Qt}{V}} \quad 3.35$$

Si se considera que no hay espacios muertos en el reactor y que se presenta una combinación de flujo pistón y flujo mezclado, el volumen con mezcla perfecta es igual a  $(1 - p)V$  y el tiempo de mezcla  $(t - t')$ , donde  $t' = p\tau$  es el tiempo de retención correspondiente a flujo pistón. Sustituyendo el tiempo de mezcla en la ecuación 3.35 se tiene:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{Q}{(1-p)V}(t-t')} \quad 3.36$$

Si  $t' = p\tau$ ;  $\frac{t'}{p} = \frac{V}{Q}$  por consiguiente:

$$V = \frac{t'Q}{p} \quad 3.37$$

Al aplicar el resultado de la ecuación 3.37 en 3.36 se tiene que:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{p}{(1-p)t'}(t-t')} \quad 3.38$$

Como por definición  $\frac{C}{C_0} = 1 - F(t)$  reemplazando y acomodando términos:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)}\left[\frac{pt}{t'} - p\right]} \quad 3.39$$

Teniendo en cuenta que  $\frac{t'}{p} = \tau$

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)}\left[\frac{t}{\tau} - p\right]} \quad 3.40$$

Si el sistema, además de flujo pistón y de mezcla completa, está compuesto también de espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación el término  $(1-m)$  para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta, por lo tanto se tiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{\tau} - p(1-m)\right]} \quad 3.41$$

Esta es la expresión general desarrollada por Wolf y Resnick en 1963. Obsérvese que si no existe flujo pistón ni espacios muertos:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 3.42$$

Expresión igual a la 3.14 deducida anteriormente para el caso de mezcla perfecta.

Rebhun y Argaman en 1965, realizaron un reacomodo de la ecuación propuesta por Wolf y Resnick (ecuación 3.41) de forma que:

$$1 - F(t) = e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{\tau} - p(1-m)\right]} \quad 3.43$$

donde  $(p)$  es la fracción del flujo pistón de la parte efectiva del caudal mezclado,  $(1-p)$  la fracción de mezcla perfecta de la parte efectiva del caudal no mezclado,  $(m)$  la fracción del espacio muerto del volumen del tanque y  $(1-m)$  la porción efectiva del volumen del tanque.

Al sacar logaritmos en ambos lados de la ecuación 3.43 se tiene una ecuación que representa la expresión de una línea recta:

$$\text{Log}[1 - F(t)] = \frac{-\log e}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{\tau} - p(1-m)\right] \quad 3.44$$

donde el valor  $n = \frac{-\log e}{(1-p)(1-m)}$  se puede hallar graficando en papel semilogarítmico la

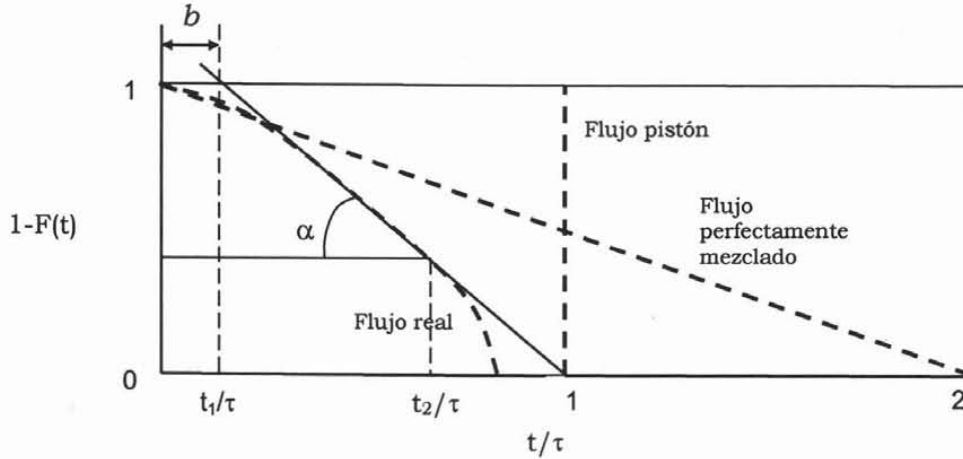
curva  $(1 - F(t))$  en relación con la abscisa  $t/\tau$ , (ver lámina 3.6), con lo que resulta una línea recta que forma un ángulo con la horizontal. La tangente que pasa por la curva de los datos experimentales en una prueba de trazadores, tiene la forma:

$$\tan \alpha = \frac{\log e}{(1-p)(1-m)} \quad 3.45$$

y la ordenada  $b$  al origen es:

$$b = p(1 - m) \quad 3.46$$

El valor  $(1-F(t))$  es la fracción del flujo que sale en un tiempo mayor a  $\tau$ .



**Lámina 3.6.** Cantidad de trazador que permanece en el reactor. Curva de  $1 - F(t)$ .

Como se puede observar en la lámina 3.6, cuando la tangente a la curva experimental tiene como ordenada al origen  $(1 - F(t)) = 1$  para  $t/\tau = 0$ , se dice que el flujo es totalmente mezclado. Si el ángulo  $\alpha = 90^\circ$  en  $t/\tau = 1$  se dice que existe flujo pistón. Ninguno de los dos casos sucede en la realidad, por lo tanto el valor de  $\alpha$  siempre será menor a  $90^\circ$ , manteniéndose la condición de que cuanto mayor sea el ángulo, mayor será la proporción de flujo de pistón en el reactor (Arboleda, 2000).

Graficando  $\log(1-F(t))$  de los datos experimentales con respecto a  $\theta$ , se obtiene una curva decreciente. La ordenada al origen ( $b$ ) y la pendiente a esta curva ( $a$ ) permiten calcular  $p$  y  $m$  despejando las ecuaciones 3.45 y 3.46, al obtenerse la relación que permita determinar el porcentaje de flujo pistón:

$$p = \frac{b \tan \alpha}{\log e + b \tan \alpha} \quad 3.47$$

y el volumen de espacios muertos,

$$m = 1 - \frac{b}{p} \quad 3.48$$

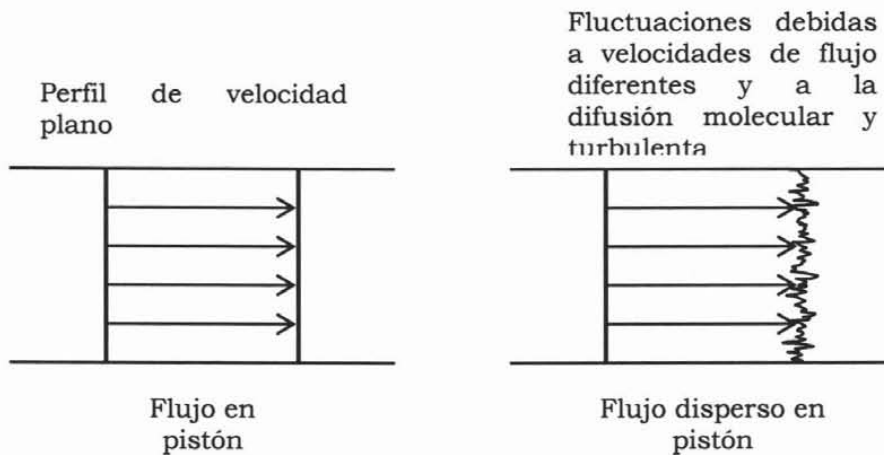
Además, el porcentaje de flujo mezclado se calcula como:

$$M = 1 - p \quad 3.49$$

### 3.3 MODELO DE DISPERSIÓN

Este modelo considera que al superponer un grado de mezcla a un fluido que se comporta como flujo pistón, la proporción de flujo pistón es independiente de la posición dentro de la unidad. Esta condición implica que no existen zonas muertas ni hay desviaciones o cortocircuitos, y este modelo de flujo se llama “flujo disperso en pistón” o, abreviadamente, “modelo de dispersión”.

En la figura 3.7 se representan las condiciones de un flujo pistón y dependiendo de las intensidades de turbulencia o condiciones de mezcla, el flujo es caracterizado desde flujo ideal en pistón hasta el flujo en mezcla completa, entonces todo el volumen de la unidad está comprendido entre la suma de los volúmenes calculados para flujo en pistón y mezcla completa.



**Lámina 3.7.** Representación del modelo de dispersión (flujo disperso en pistón) (Levenspiel, 1997).

Como el proceso de mezcla implica un reagrupamiento o redistribución de materia por deslizamiento o formación de remolinos, que se repite un número considerable de veces a través del recipiente, se puede considerar que estas perturbaciones son de naturaleza estadística, como ocurre con la difusión molecular. La ecuación diferencial que rige la difusión molecular en la dirección  $x$ , viene dada por la ley de Fick (Levenspiel, 1997):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( d \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad 3.50$$

siendo  $d$  el coeficiente de difusión molecular, que es un parámetro que caracteriza únicamente al proceso. Se puede considerar que todas las contribuciones de mezcla del fluido que circula en la dirección  $x$ , se pueden describir por la expresión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 3.51$$

Siendo  $D$  un parámetro que se denomina *coeficiente de dispersión longitudinal o axial*, y caracteriza el grado de mezcla durante el flujo. Se usan los términos longitudinal y axial, para distinguir entre la mezcla en la dirección de flujo y la mezcla en dirección lateral o radial. En el flujo laminar de fluidos a través de tubos, la mezcla axial se debe principalmente a los gradientes de velocidad del fluido, mientras que la mezcla radial se debe solamente a la difusión molecular y la ecuación diferencial básica que representa este modelo, descrita en forma adimensional es:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left( \frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad 3.52$$

donde  $u$  la velocidad promedio del fluido,  $L$  la longitud recorrida por el fluido y  $z = x/L$  es la distancia de recorrido adimensional

El parámetro adimensional  $Pe^{-1} = D/uL$ , denominado número de dispersión del recipiente, que es inverso al Número de Peclet ( $Pe$ ) (Fisher, 1981), mide el grado de dispersión axial. Por lo tanto si:

$$\frac{D}{uL} \longrightarrow 0 \text{ (dispersión despreciable), tiende a flujo pistón}$$

$$\frac{D}{uL} \longrightarrow \infty \text{ (dispersión grande), tiende a flujo en mezcla completa}$$

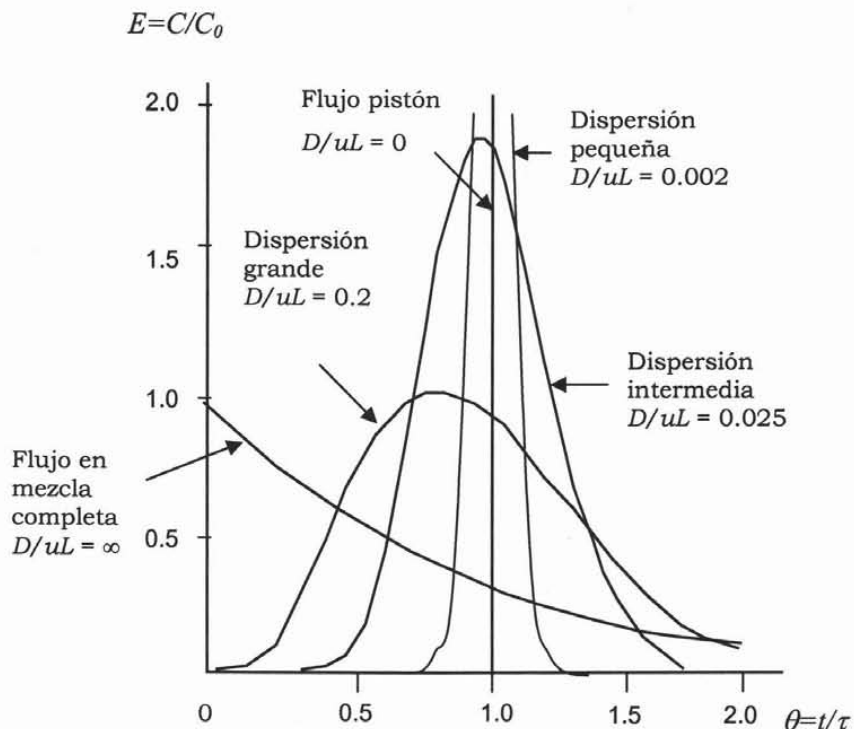
Por otra parte *Levenspiel* (1997) propone una expresión en función del número de dispersión, correspondiente a recipientes en condiciones de contorno cerrado como son las unidades de decantación, y esto permite calcular el grado de dispersión una vez conocida la media y la varianza de la curva de distribución de los tiempos de residencia, lo cual se evalúa de la forma siguiente:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 \left( 1 - e^{-\mu L / D} \right) \quad 3.53$$

Para determinar, en la ecuación 3.53, el valor del número de dispersión se puede aplicar un método iterativo al conocer los valores de la media ( $\mu$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ) de la curva experimental.

En la lámina 3.8 se ilustra la caracterización del flujo entre los dos tipos de flujo ideales, de mezcla completa a flujo pistón, con relación al número de dispersión.



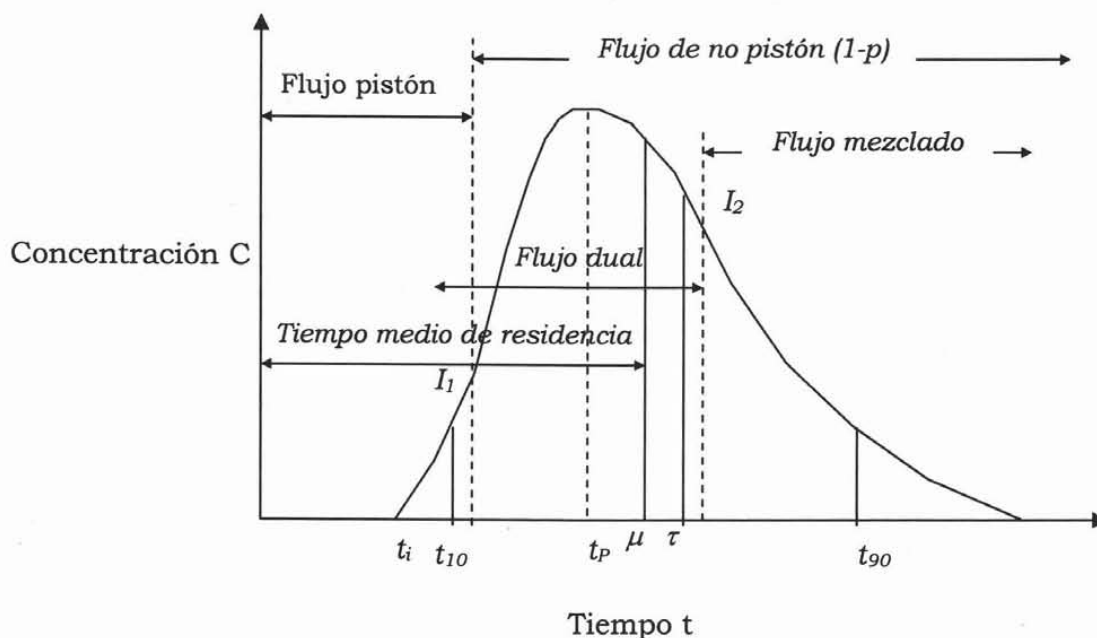


**Lámina 3.8.** Curvas típicas de respuesta en recipientes cerrados para distintas intensidades de retromezcla predichas por el modelo de dispersión (Levenspiel, 1997).

### 3.4. ANÁLISIS DE LA CURVA DE TENDENCIA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR (MÉTODO CONVENCIONAL O MÉTODO CLÁSICO)

Es práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo (CEPIS, 1992).

Al aplicar la prueba de trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida de los tanques, se obtiene una serie de valores de concentración del trazador que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, originando una curva tal como se muestra en la lámina 3.9.



**Lámina 3.9.** Curva de concentración del trazador en el efluente de un reactor.

Existen los siguientes parámetros:  $t_i$  es el tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente;  $t_{10}$  el tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total de trazador;  $t_p$  el tiempo moda, correspondiente a la concentración máxima de trazador;  $\mu$  el tiempo medio de residencia, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total de trazador;  $\tau$  el tiempo de retención teórico =  $V/Q$ , y  $t_{90}$  el tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total de trazador.

Para el análisis de la curva de concentración (lámina 3.9) se han establecido los siguientes criterios:

a.

$$\frac{t_i}{\tau} \quad 3.54$$

Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a (1) para flujo de pistón y (0) para flujo mezclado. Si el valor de la relación es ( $< 0.3$ ) puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito)

b.

$$\frac{\mu}{\tau} \quad 3.55$$

Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas en donde el trazador se haya quedado retenido con un cierto tiempo (espacios muertos), y luego haya ido saliendo lentamente, por lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de ( $\mu$ ), haciendo ( $\mu > \tau$ ).

c.

$$\frac{t_p}{\tau} \quad 3.56$$

Indica la relación de flujo pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo pistón y (0) para flujo mezclado. Cuando la relación  $t_p/\tau$  se aproxima a 1 y  $t_i/\tau > 0.5$  se puede concluir que existe predominio de flujo pistón, y cuando se aproxima a (0), existe predominio de flujo mezclado.

d.

$$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{\tau} \quad 3.57$$

Expresa la excentricidad de la curva y por lo tanto es función de la recirculación. Es igual a 0 para flujo pistón y del orden 2.3 para flujo mezclado.

e.

$$\text{Índice de Morrill} = \frac{\text{tiempo que pasa el 90\%}}{\text{tiempo que pasa el 10\%}} \quad 3.58$$

Índice de Morrill. Este autor encontró que al acumular los datos sobre la cantidad de trazador que pasa, expresados en porcentaje (%) y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtendría aproximadamente una línea recta.

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión así:

Si todo el flujo fuera pistón, la curva sería una línea horizontal y el índice de Morrill sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo  $t = \tau$  y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, se aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

d. El estudio de la totalidad de la curva puede suministrar una información más completa que la de las tendencias centrales (Arboleda, 1974).

El flujo pistón puro, como se observa en la lámina 3.9 se considera que se toma en el punto de inflexión  $I_1$ , cuando la curva cambia de cóncava a convexa (Hirsch, 1972). De aquí en adelante el flujo debe considerarse como no pistón. Entre dicho punto y el punto de inflexión  $I_2$  en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinado). A partir del segundo punto de inflexión el flujo tiene un carácter predominantemente mixto.

# CAPÍTULO 4

## SEDIMENTACIÓN DE ALTA TASA

---

Durante la evaluación realizada a seis plantas potabilizadoras en la frontera norte del país, las unidades que presentaron mayores problemas de funcionamiento hidráulico fueron los sedimentadores, debido a la presencia de recirculaciones de flujo y lodos sépticos que impedían un correcto funcionamiento hidráulico de los mismos (Martín et al., 1998).

En este trabajo de experimentación se utilizó un prototipo de sedimentador de alta tasa de flujo ascendente diseñado y facilitado por el laboratorio de potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) como prototipo experimental para la realización de la prueba con trazadores. Antes de realizar las pruebas experimentales se evaluó el diseño del sedimentador bajo los criterios establecidos para sedimentadores de alta tasa.

En este capítulo se dará una descripción de la teoría y la evaluación referente a este tipo de unidades.

### 4.1. SEDIMENTACIÓN LAMINAR O DE ALTA TASA

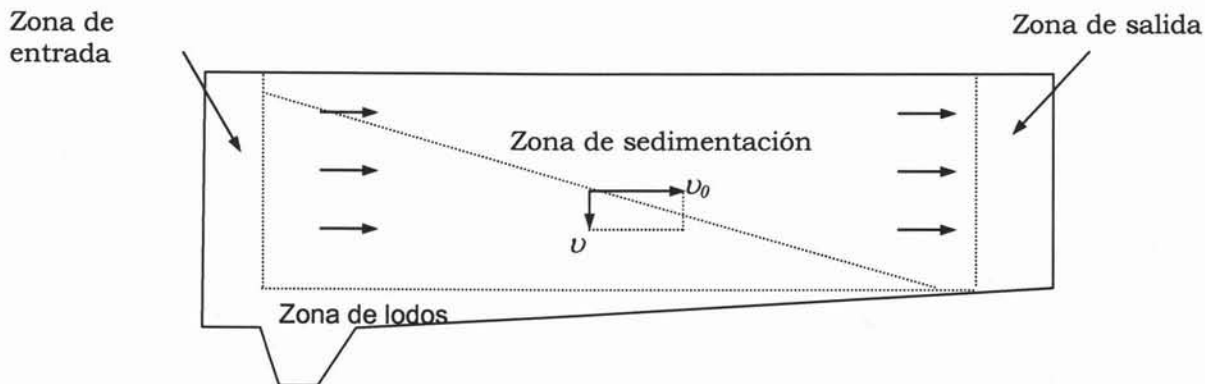
La sedimentación es el proceso utilizado en el tratamiento del agua para separar sólidos de líquidos por medio de la fuerza de la gravedad. La sedimentación ocurre de maneras diferentes, dependiendo de la concentración y de la forma en como interactúan las partículas que se encuentran en el agua. El interior de una unidad de sedimentación se divide generalmente en cuatro zonas (ver lámina 4.1), y estas son:

La *zona de entrada* tiene como función generar una transición suave entre el flujo de entrada y distribuirlo uniformemente en la zona de sedimentación.

La *zona de lodos* es donde se acumula o se retiene el material sedimentado impidiendo que exista interferencia entre asentamiento de partículas en la zona de sedimentación.

En la *zona de sedimentación* se lleva a cabo el asentamiento de los sólidos por sedimentar.

La *zona de salida* es el lugar de evacuación del agua clarificada que provee una transición suave entre la zona de sedimentación y el flujo efluente.



**Lámina 4.1.** Zonas hipotéticas en un sedimentador horizontal.

En la lámina 4.1 se esquematiza las cuatro zonas de un sedimentador y,  $v_0$  es la velocidad promedio del flujo en el sedimentador y  $v$  la velocidad de sedimentación de las partículas.

Los sedimentadores se pueden clasificar de acuerdo a la orientación del flujo dentro del sistema de la siguiente manera:

Sentido del flujo	Ejemplo de tipos de sedimentadores
Horizontal	Sedimentador rectangular Desarenadores
Vertical	Sedimentador con manto de lodos
Inclinado (ascendente o descendente)	Sedimentadores con módulos o placas

**Tabla 4.1.** Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000).

Un factor importante en las unidades convencionales (conocidas como de flujo horizontal o vertical) es conseguir que el agua se desplace con flujo tipo pistón y de forma homogénea, es decir sin que presenten corrientes de densidad. Estas condiciones en la práctica resultan difíciles de establecer debido a la baja velocidad del avance de las masas de agua (Arboleda, 2000), lo cual repercute en la eficiencia de sedimentación de la unidad. Una forma de compensar las desuniformidades de flujo es aumentar el área disponible de sedimentación e introducir pisos múltiples durante el diseño del sistema para ocupar menos espacio físico, con lo cual se obtienen mejores resultados en la remoción de partículas.

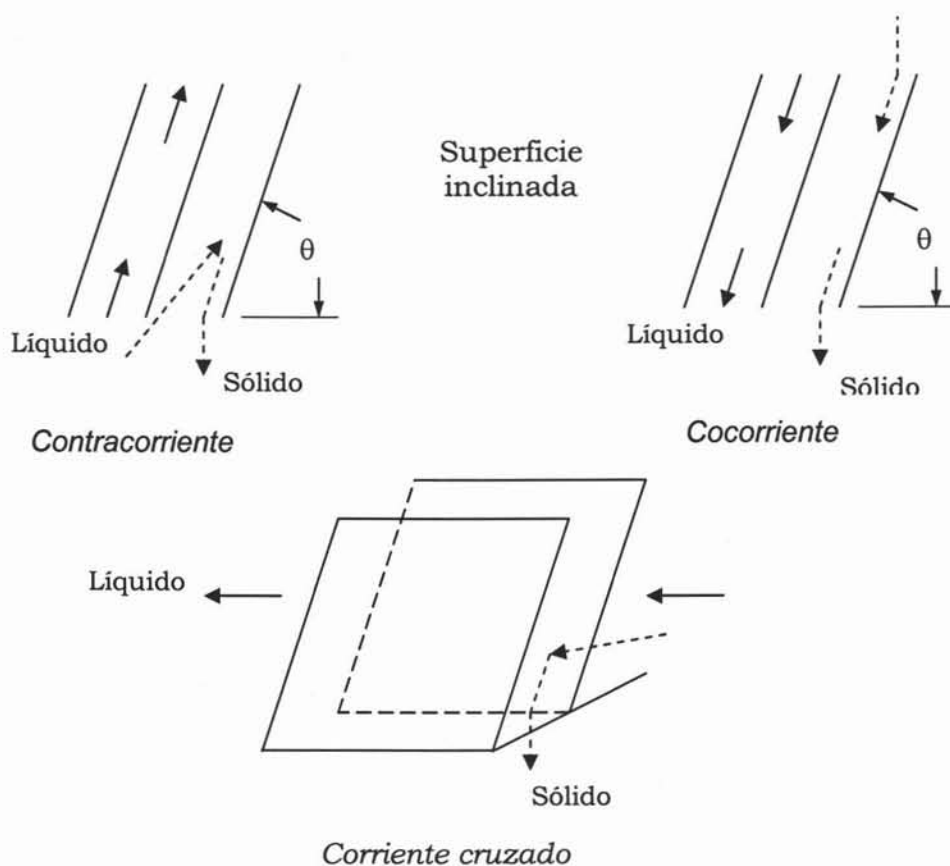
Una alternativa exitosa en la sedimentación ha sido la instalación de estructuras ligeras con superficies inclinadas estrechamente espaciadas en la zona de

sedimentación, lo cual permite incrementar la superficie de deposición de lodos, estos sedimentadores son conocidos como de “alta tasa”. Estos sistemas ofrecen condiciones hidráulicas óptimas para la clarificación, mantienen una estabilidad hidráulica y reducen el tiempo en que permanece el agua dentro de la unidad.

Los decantadores laminares son poco profundos, formados por una serie de tubos, circulares, cuadrados, octogonales o secciones de láminas paralelas, siendo éstas planas u onduladas, entre las cuales circula el agua con flujo laminar (Vargas y Pérez, 1992).

Los sistemas de sedimentación inclinada o de alta tasa se clasifican respecto a la dirección del flujo relativo con la dirección de la partícula a sedimentar, y estos son flujos a contracorriente, cocorriente y corriente cruzado (ver lámina 4.2).

El sedimentador utilizado para determinar su funcionamiento hidráulico es del tipo de placas inclinadas con dirección de flujo a contracorriente.



**Lámina 4.2.** Geometría básica de flujo para sistemas de sedimentación inclinada (AWWA, 1999).

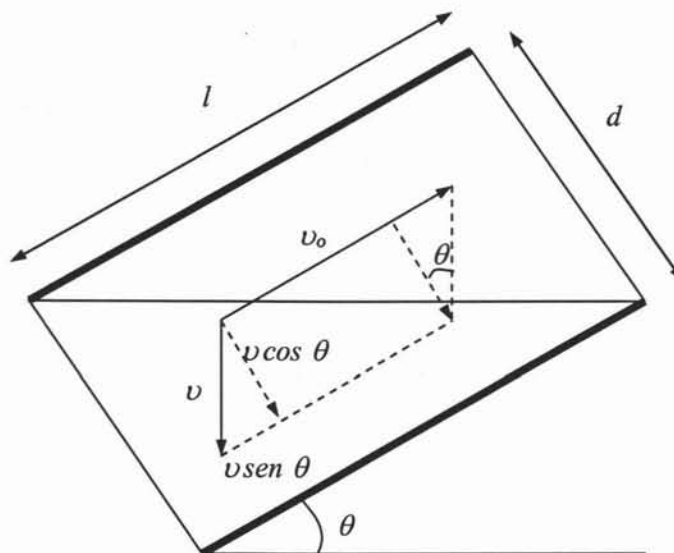
Los decantadores laminares de flujo ascendente más usados poseen generalmente en la parte inferior del decantador una zona de distribución de agua, inclinada con ángulos de  $45^\circ$  a  $60^\circ$ . El agua decantada se recolecta lateralmente de la parte superior,

en la parte inferior están ubicadas las fosas de lodos, generalmente de forma cónica para facilitar la extracción por medio de válvulas de fondo (Vargas y Pérez, 1992).

#### 4.1.1. Principios básicos

##### 4.1.1.1. Teoría de la sedimentación de alta tasa

Yao en 1970, presenta una teoría del fenómeno de sedimentación basada en la teoría clásica de Camp (Arboleda, 2000), que tiene su aplicación a sedimentadores inclinados, en donde se supone la sedimentación de partículas discretas (partículas que no cambian su tamaño, forma o peso cuando sedimentan) en tanques de alta tasa con flujo laminar y unidimensional. Esta teoría emplea relaciones geométricas que definen el proceso de sedimentación en una descomposición de vectores de velocidad como se muestra en la lámina 4.3.



**Lámina 4.3.** Relaciones geométricas de placas paralelas con flujo a contracorriente.

El tiempo de sedimentación ( $t$ ) de una partícula entre las dos superficies paralelas inclinadas es:

$$t = \frac{d}{v \cos \theta} \quad 4.1$$

donde,  $d$  es la distancia perpendicular entre las superficies;  $\theta$  el ángulo de inclinación de la superficie de las placas con la horizontal y  $v$  la velocidad crítica de sedimentación.

El tiempo que tarda un elemento del fluido en recorrer el campo de flujo entre las placas es conocido como tiempo de residencia del flujo en la zona de sedimentación y se denota como:

$$T = \frac{l}{v_0 - v \operatorname{sen} \theta} \quad 4.2$$

donde  $l$  es la longitud de superficie y  $v_0$  la velocidad promedio del líquido entre las superficies. Para que se presente sedimentación de una partícula entre las placas se debe cumplir que  $T \geq t$ , entonces sustituyendo en esta desigualdad las ecuaciones 4.1 y 4.2 se tiene:

$$v \geq \frac{v_0 d}{l \operatorname{cos} \theta + d \operatorname{sen} \theta} \quad 4.3$$

Por definición,

$$L = \frac{l}{d} = \text{longitud relativa del sedimentador} \quad 4.4$$

En general, para sedimentadores de alta tasa, la velocidad crítica de asentamiento está dada por (Romero, 1995):

$$v \geq \frac{v_0}{L \operatorname{cos} \theta + \operatorname{sen} \theta} \quad 4.5$$

Como lo muestra Yao (menciona Romero, 1995),  $L$  debe ser igual a 20 y en general menor a 40, y  $\theta$  es generalmente igual a  $60^\circ$ .

La velocidad de sedimentación de las partículas o velocidad crítica de sedimentación  $v$  se calcula mediante pruebas en laboratorio basándose en la viscosidad del fluido y en las características de las partículas (forma, tamaño y densidad).

En el diseño de sedimentadores las consideraciones teóricas han sido aplicadas al caso de sedimentación de una partícula aislada, no obstante la interferencia de otras partículas origina una serie de efectos hidrodinámicos que obedecen a leyes distintas de las que rigen a cada partícula por separado (Aznar, 1997).

#### 4.1.1.2. Consideraciones sobre el régimen de flujo

La diferencia básica entre sedimentadores de alta tasa y los convencionales, reside en que los primeros trabajan (como su nombre lo indica) con flujo laminar ( $Re < 500$ ) y los últimos con flujo turbulento ( $Re$  entre 10,000 y 250,000). Esta diferencia teórica fundamental debe reflejarse en la forma como se diseñan unos y otros (Richer y Cánepa de Vargas, 1992).

De acuerdo a investigaciones realizadas en diferentes prototipos las unidades de sedimentación se pueden diseñar con número de Reynolds ( $Re$ ) hasta 500, sin que se obtengan disminuciones apreciables en su eficiencia. En los sedimentadores laminares, el número de Reynolds ( $Re$ ) es una consecuencia de la geometría de los



elementos tubulares y de la velocidad del flujo en el interior de éstos, y no una condición del proyecto (Richter y Cánepa de Vargas, 1992). De acuerdo con este criterio (que se ha corroborando con la experiencia práctica), no es necesaria la obtención de un flujo laminar puro para mejorar la eficiencia del proceso. Al utilizarse el número de Reynolds en el límite máximo del rango laminar (de 2000), se consigue ampliar la separación de las placas o la sección de los módulos, tal como se muestra en la ecuación 4.5, lo anterior permite construir unidades más económicas y con menor número de placas.

El número de Reynolds para placas paralelas se puede determinar de acuerdo con Knudsen and Katz (1958), como:

$$Re = \frac{2v_0 d}{\nu} \quad 4.6$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática en (m<sup>2</sup>/s).

El número de Reynolds ( $Re$ ) puede calcularse también en función del radio medio hidráulico (lo que da un valor menor) en lugar del espaciamiento entre placas. Los resultados, si bien difieren numéricamente, no alteran las consideraciones hechas sobre el flujo laminar ya que de todas maneras este se produce para las cargas superficiales usadas en la práctica, siempre y cuando el flujo se distribuya uniformemente en todas las celdas, aunque no necesariamente el hecho de que haya flujo laminar puro implica que exista una decantación eficiente (Arboleda, 2000).

Por otro lado, algunos autores (Montgomery, 1985 y Fu Yen, 1999) utilizan el número de Froude ( $Fr$ ) para el diseño de sedimentadores de alta tasa y para mantener una condición estable en el sistema recomienda un  $Fr \geq 10^{-5}$ . El número de Froude se calcula de la forma siguiente:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gR_h} \quad 4.7$$

donde  $g$  es la fuerza de la gravedad y  $R_h$  el radio hidráulico que se puede calcular para placas paralelas como  $R_h = d/2$ .

#### 4.1.1.3. Criterios del tiempo de residencia hidráulico

Diferentes autores consideran los siguientes criterios para elegir el tiempo de residencia para sedimentadores de placas inclinadas (ver tabla 4.2).

Autor	Tiempo de residencia recomendado
Romero, 1995	Menores de 15 min
Swethurst, 1988	20 a 30 min
Montgomery, 1985	15 a 25 min

**Tabla 4.2.** Tiempos de residencia recomendados para sedimentadores de placas inclinadas.

En resumen, las principales características de diseño de un sedimentador de alta tasa son su poca profundidad, el fondo del decantador no es horizontal sino inclinado y el flujo en el decantador es laminar con tiempos de retención menores a 30 min.

**4.1.2. Factores que influyen en el proceso de sedimentación**

Las condiciones de funcionamiento hidráulico de una unidad de sedimentación quedan determinados, entre otros factores, por la configuración y diseño de las zonas de entrada, sedimentación, deposición de lodos y salida del agua.

El diseño de sedimentadores de alta tasa incluye consideraciones como las características de sedimentación del material suspendido, la carga superficial, la velocidad del flujo en el módulo sedimentador, el tiempo de retención en el módulo sedimentador, el número de Reynolds y Froude, la selección de la unidad de recolección de lodo, y el diseño de soporte del sedimentador y mecanismo de limpieza (Montgomery, 1985).

A continuación se hará una breve descripción de los factores que influyen en el proceso de sedimentación.

**4.1.2.1. Carga superficial**

Es el principal parámetro que influye en la eficiencia de remoción de una unidad de sedimentación, la cual representa la velocidad crítica de sedimentación (Pérez, 1992). La carga superficial es el criterio más utilizado en la práctica para diseño y clasificación de sedimentadores. En sedimentadores de alta tasa no existe un criterio unificado de valores de carga superficial (Romero, 1995), ya que depende de las características de sedimentación de los sólidos, la temperatura del agua y la calidad del agua del efluente (AWWA, 1999).

La diversidad de criterios en la determinación de la carga superficial en los sedimentadores de alta tasa es muy amplia y se puede observar en forma resumida en la tabla 4.3.

Autor	Carga superficial recomendada
Pérez, Di Fernando y Cánepa de Vargas, 1992	60 a 240 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d 120 a 180 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d (valores medios)
Schulz y Okún, 1990	120 a 185 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d (para América Latina)
Montgomery, 1985	≤ 150 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d
AWWA, 1999	16.8 a 40 8 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d (para cada placa)

**Tabla 4.3.** Tasas superficiales recomendadas para sedimentadores de placas inclinadas.

#### 4.1.2.2. Zona de entrada

La distribución del flujo a la entrada es crítica para la eficiencia de funcionamiento de los sedimentadores de placas (AWWA, 1997). El mayor problema en los sistemas distribuidores de agua floculada es la posible obstrucción de ellos por deposición en las zonas de bajo flujo o conocido también como zona muerta. Esta es la razón por la cual la velocidad de flujo no debe ser inferior a 0.20 m/s (Arboleda, 2000) pero no mucho más que ese valor, para evitar la posible ruptura del floculo, lo que afectaría el proceso de sedimentación.

Además, todos los elementos hidráulicos como son canales, orificios, vertedores, compuertas, etc., deben producir gradientes de velocidad no mayores de 20 s<sup>-1</sup> para evitar la posible ruptura del flóculo, y no debe ser inferior a 10 s<sup>-1</sup> para evitar depósito de lodo (Richter y Cánepa, 1992).

Un buen diseño de la zona de entrada estabiliza la distribución uniforme del flujo dentro del tanque y minimiza el potencial de cortocircuito. Cuando el influente es introducido uniformemente a través del tanque desde la superficie al fondo y de lado a lado, la temperatura del agua es la misma y las corrientes de densidad son menos probables que se formen (AWWA, 1999).

#### 4.1.2.3. Zona de salida

El propósito de la zona de salida es proveer una transición suave entre la velocidad del flujo en el sedimentador y la velocidad del efluente. La estructura de salida puede ser vertederos de rebose, canaletas de rebose y orificios (Arboleda, 2000).

Los vertederos de rebose, cualquiera que sea su forma, en lo posible no deben dejar zonas muertas, pues la trayectoria de las partículas se tiene que curvar aumentando las posibilidades de arrastre.

La longitud del vertedero de salida se determina para la carga sobre el vertedero escogido. Cuando un solo vertedero a lo ancho del extremo del tanque, no satisface la longitud requerida, se provee la longitud necesaria usando varios vertederos colocados en el tercio extremo de salida del tanque o agregando vertederos en “V” a las canaletas

de recolección de agua clarificada. El caudal típico para vertederos de salida en procesos de clarificación deben ser menores a 7,5 L/s.m (Romero, 1995).

**4.1.2.4. Zona de lodos**

Los principales parámetros a determinarse en la zona de depósitos de lodos son las características de los lodos y la configuración de las obras de desagüe y descarga. La primera tiene relación directa con la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y sedimentación, y la segunda con criterios de diseño.

En un decantador de placas existen dos zonas de lodos: la que se forma dentro de las mismas placas, situada contra la cara interna de la placa inferior, y la que hay en el fondo del tanque que las alberga.

**Zona de lodos en las placas**

La velocidad a través de un tanque de sedimentación debe mantenerse entre 0.25 y 1.5 cm/s, y para tanques de alta tasa deben tener valores de velocidad promedio de flujo menores de 1 cm/s (Romero, 1995).

Como la velocidad del agua dentro de las placas rara vez sobrepasa los 0.3 cm/s es de esperarse que el arrastre sea mínimo, con la ventaja de que a medida que la partícula se acerca a la cara de la lámina plana, dicha velocidad decrece hasta llegar a cero, lo que estimula la decantación de los fangos y su ulterior remoción (Arboleda, 2000). La velocidad a través de las placas no debe exceder 0.8 m/min (1.3 cm/s) (Swethurst, 1988). Adicionalmente, Montgomery (1985) recomienda que la velocidad del flujo en el módulo sedimentador debe ser menor que 0.6 m/min.

En la tabla 4.4. se muestra un resumen de lo anterior:

Autor	Velocidad del flujo a través de las placas
Arboleda, 2000	< 0.3 cm/s
Romero, 1995	< 1 cm/s
Swethurst, 1988	< 1.3 cm/s
Montgomery, 1985	< 1 cm/s

**Tabla 4.4.** Velocidad del flujo a través de las placas para sedimentadores de alta tasa.

El rendimiento de sedimentadores de placas planas varía con su inclinación. En un sedimentador laminar se debe seleccionar una inclinación tal que asegure una continua y eficiente remoción de lodos. Por razones prácticas, para permitir la remoción continua del lodo el ángulo de inclinación de las placas  $\theta$  es alrededor de 60° (Arboleda, 2000; Schulz y Okún, 1990; Romero, 1995).

## Zona de lodos en las tolvas

El sitio de recolección final dentro del sedimentador se conoce como zona de tolvas y para su diseño se recomienda que la pendiente de las tolvas en el fondo del tanque debe estar entre 45 y 60°, y la velocidad mínima de arrastre de los lodos no debe ser menor a 1 cm/s (Richer y Cánepa, 1992).

### 4.1.2.5 Características del agua

Los parámetros que influyen en la eficiencia de un sedimentador laminar en las características del agua son: la calidad del agua (turbiedad y color), las propiedades físicas del agua (temperatura, viscosidad), y las características de los sólidos suspendidos (densidad, concentración, tamaño y forma de las partículas).

Cuanto mayor es la temperatura menor es la viscosidad del líquido y más rápida es la sedimentación, por lo tanto, la temperatura del agua afecta de forma importante en este proceso, se recomienda que al disminuir la temperatura se reduzca la carga superficial de diseño (Romero, 1995).

### 4.1.2.6 Otros

El proceso de sedimentación es muy complejo y se tiene una serie de variables que no están consideradas en la teoría, que en forma resumida se muestran en la tabla 4.5.

Tipo de interferencia	Causa	Efecto
Corrientes de densidad	Corrientes térmicas	Cortocircuitos superficiales o cortocircuitos de fondo
	Corrientes de concentración	Giros de la masa de agua
Corrientes eólicas	Vientos que impulsan la masa superficial	Desvíos del flujo superficial
Corrientes cinéticas	Alteraciones hidráulicas a la entrada	Flujos transversales en el tanque
	Obstrucciones en la zona de decantación	Turbulencias que levantan el flóculo
	Alteraciones a la salida	Arrastre de partículas

**Tabla 4.5.** Interferencias en la sedimentación (Arboleda, 2000).

En resumen, el correcto funcionamiento de un decantador laminar de flujo ascendente, debe asegurar una distribución uniforme del agua en toda el área de las placas, y tener una recolección uniforme del efluente encima de las placas.

Los factores más importantes que afectan la eficiencia de remoción de una unidad de sedimentación y/o decantación son:

- Las características del proceso, como:
  - a. Las características físico-químicas de las aguas, especialmente turbiedad, color y temperatura.
  - b. Las características del pretratamiento: mezcla-floculación.

- Las condiciones del flujo hidráulico, como:
  - a. La configuración y diseño de las unidades y zonas de entrada, sedimentación, depósito de lodos y salida de agua.
  - b. Las características de las obras de interconexión
  - c. Operación y mantenimiento

Los criterios de diseño de sedimentadores para la clarificación del agua se basan en valores obtenidos a través de la experiencia en la operación de prototipos de plantas y plantas piloto de tratamiento de agua (Romero, 1995).

Los actuales criterios de diseño de unidades de sedimentación y/o decantación son aparentemente incompletos, puesto que se basan tanto en condiciones hidráulicas, como del proceso de sedimentación en sí mismo, “totalmente ideales”, los cuales no se presentan en la práctica. En general, se reducen a simples especificaciones de relaciones geométricas y en ningún momento consideran los factores internos y externos que afectan el proceso.

## **4.2. EVALUACION DE SEDIMENTADORES**

Las actividades de evaluación de una unidad de sedimentación se clasifican en:

- a. Determinación de eficiencia
- b. Determinación de condiciones y características hidráulicas

### **4.2.1. Determinación de eficiencia**

La eficiencia de una unidad de sedimentación se determina en función de la calidad del agua sedimentada, la calidad del agua cruda, la carga superficial y pretratamiento. Los resultados de estos ensayos que se establecen en la práctica, no indican las causas o problemas que se presentan por un mal funcionamiento de la unidad.

### **4.2.2. Determinación de condiciones hidráulicas**

En teoría se dice que la dirección de flujo y la concentración de partículas de cada tamaño debe ser la misma en todos los puntos de una sección al comienzo de la zona de sedimentación (conceptos que conllevan a la necesidad de obtener en las unidades de sedimentación un comportamiento típico de flujo pistón puro).

Pero en la práctica no se cumplen los enunciados anteriores, por lo tanto es necesario determinar las condiciones hidráulicas reales, por medio de ensayos de caracterización de flujo, como:

- a. Porcentaje de flujo de pistón y mezclado.
- b. Volumen de espacios muertos y cortocircuitos.
- c. Tiempo real de retención  $\mu$ , que se obtiene de los datos experimentales que se obtienen de la prueba de trazador.
- d. Líneas de flujo o corriente, de igual turbiedad (topogramas de turbiedad o color) en los planos horizontal y vertical del sedimentador.

- e. La carga superficial real, por medio el tiempo real de retención del ensayo de trazadores.

La determinación de la proporción de flujo pistón en sedimentadores tiene una gran importancia, pues mide la fracción del volumen de agua que pasa por el reactor y que ha permanecido durante todo el tiempo de retención sometida al tratamiento que se le intenta hacer (Pérez, 1977); por lo tanto, suele recurrirse a utilizar trazadores para determinar los posibles problemas hidráulicos ocasionados por las obras de entrada y salida, la disposición de las placas de decantación, la acumulación de lodos, etc.

# CAPÍTULO 5

## METODOLOGÍA

El objetivo principal de las pruebas experimentales es el de corroborar físicamente, por medio de la técnica de trazadores, los fenómenos hidráulicos que se presentan en la unidad de sedimentación y analizar si los modelos propuestos describen el comportamiento hidrodinámico de esta unidad.

Entonces, en este capítulo se muestra la metodología experimental a nivel laboratorio que se llevó a cabo al aplicar la técnica de trazadores, al adicionar instantáneamente sal (NaCl) y colorante (azul de metileno), para evaluar el comportamiento hidráulico del sedimentador de alta tasa.

Antes de describir la metodología, fue necesario adaptar la unidad de sedimentación como un sistema de flujo en continuo, con lo cual se establecen las condiciones hidráulicas de operación necesarias para su funcionamiento.

### 5.1. ESTACIÓN EXPERIMENTAL

#### 5.1.1. *Unidad de tratamiento utilizada para la prueba con trazadores*

Para aplicar la técnica de trazadores, se utilizó un prototipo de sedimentador de alta tasa de flujo ascendente. Esta unidad fue diseñada y facilitada por la Subcoordinación de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

La unidad tiene un volumen de 357 litros aproximadamente (ver láminas 5.1, 5.2 y 5.3), fabricado en acrílico transparente de 0.5 cm de espesor, compuesto por:

- 2 tolvas en "V" de plástico rígido (acrílico) formadas cada una por 2 placas de 20x90 cm para la recolección de lodo.
- 3 tuberías de PVC perforadas (16  $\phi$ 1/4") con una longitud de 90 cm y 5 cm de diámetro, una para la entrada de agua y dos para el desagüe.
- 12 placas de plástico rígido de 30 x 60 cm y 2 mm de espesor que sirvieron de mamparas.



El cuerpo del sedimentador está compuesto por:

- 2 placas en acrílico de 80x90 cm
- 2 placas en acrílico de 80x60 cm
- 1 placa en acrílico de 60x90 cm

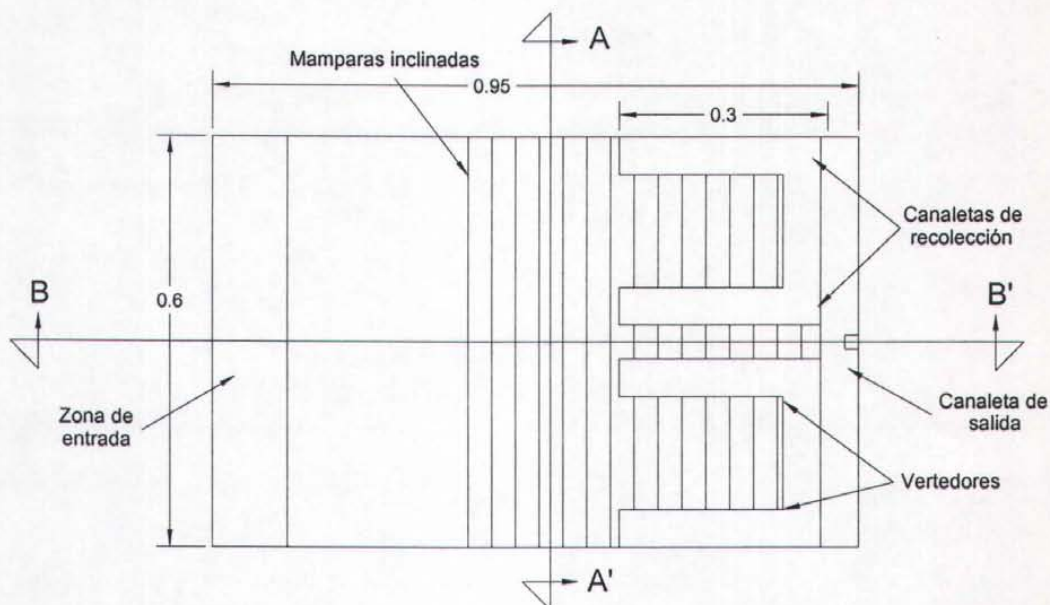
Las 12 placas móviles pueden variar su ángulo de inclinación y retirarse o colocarse más separadamente según se requiera.

Dado que la unidad de sedimentación fue diseñada y construida antes de realizar este estudio, solamente fue necesario construir el dispositivo de alimentación de flujo en continuo y los aditamentos necesarios para la inyección de los trazadores.

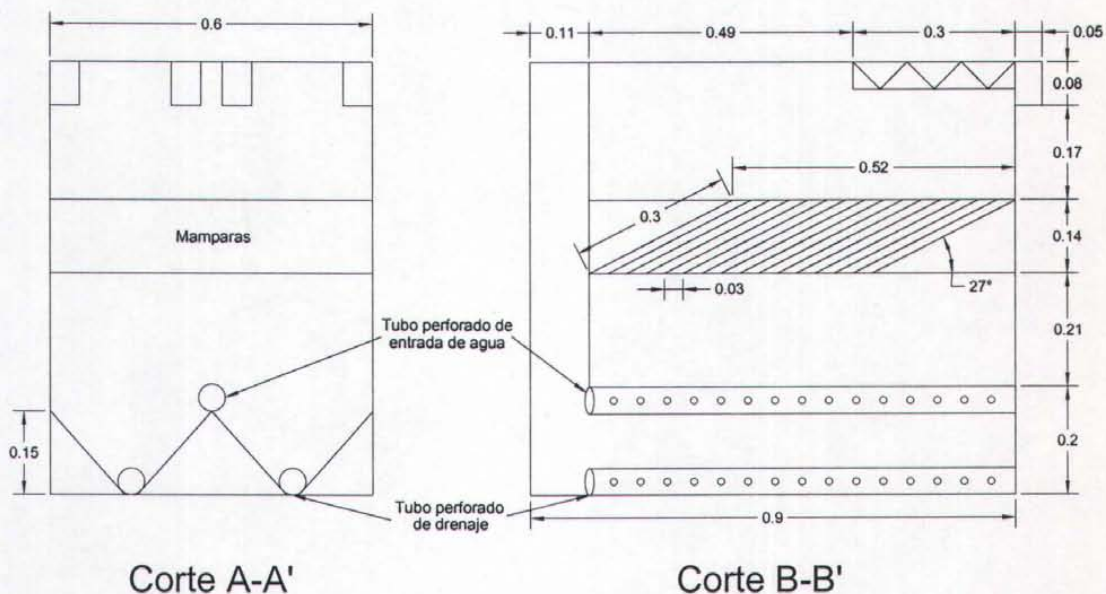


**Lámina 5.1.** Prototipo de sedimentador de alta tasa utilizado para las pruebas con trazadores.

Las dimensiones propias del sedimentador se muestran en las láminas 5.2. y 5.3.:



**Lámina 5.2.** Vista en planta del prototipo de sedimentador de alta tasa.

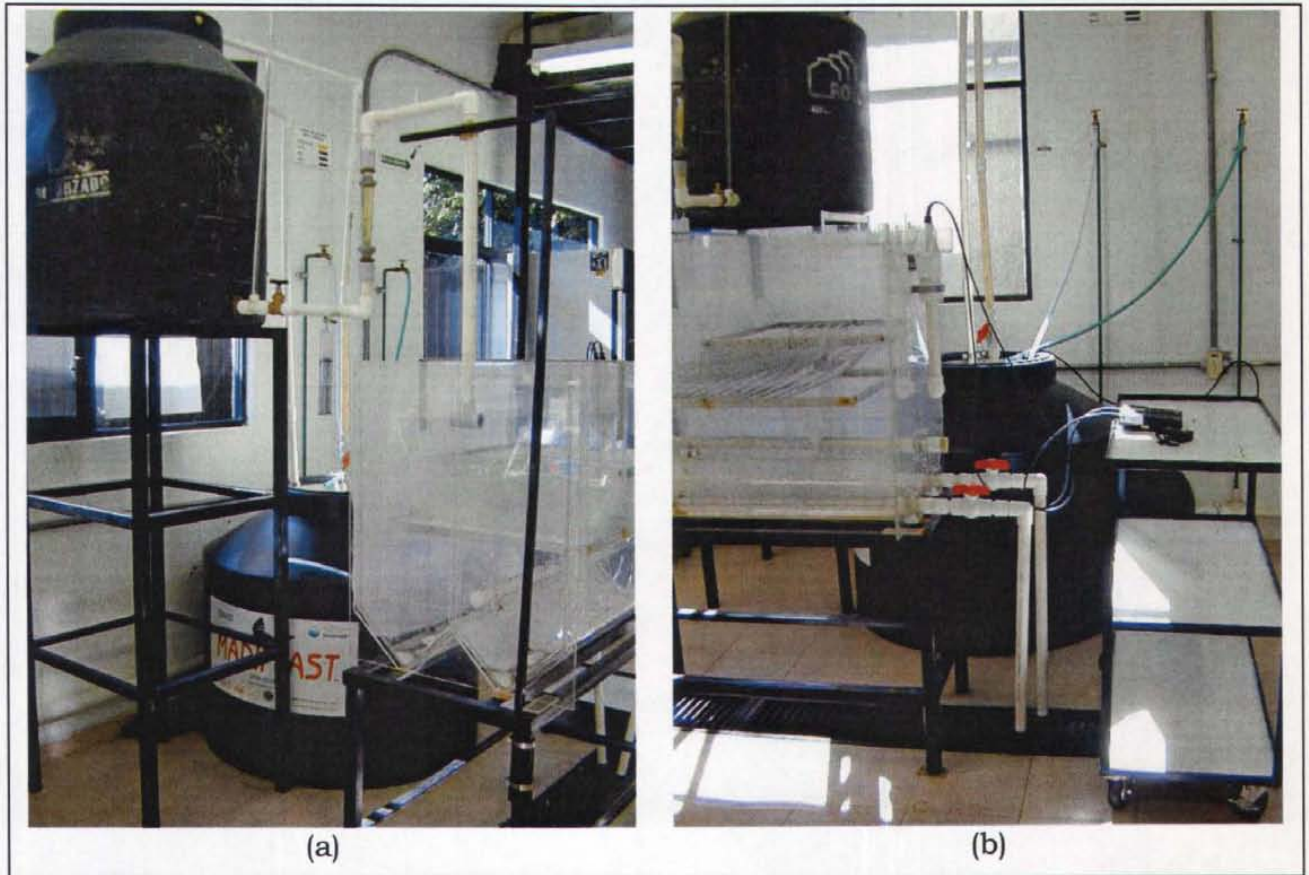


**Lámina 5.3.** Vista lateral Corte A-A' y vista frontal Corte B-B' del prototipo de sedimentador de alta tasa.

A continuación se describirá en detalle, la adecuación de la instalación del dispositivo experimental, así como la descripción de las pruebas realizadas mediante la técnica de trazadores.

### 5.1.2. Sistema hidráulico del dispositivo experimental

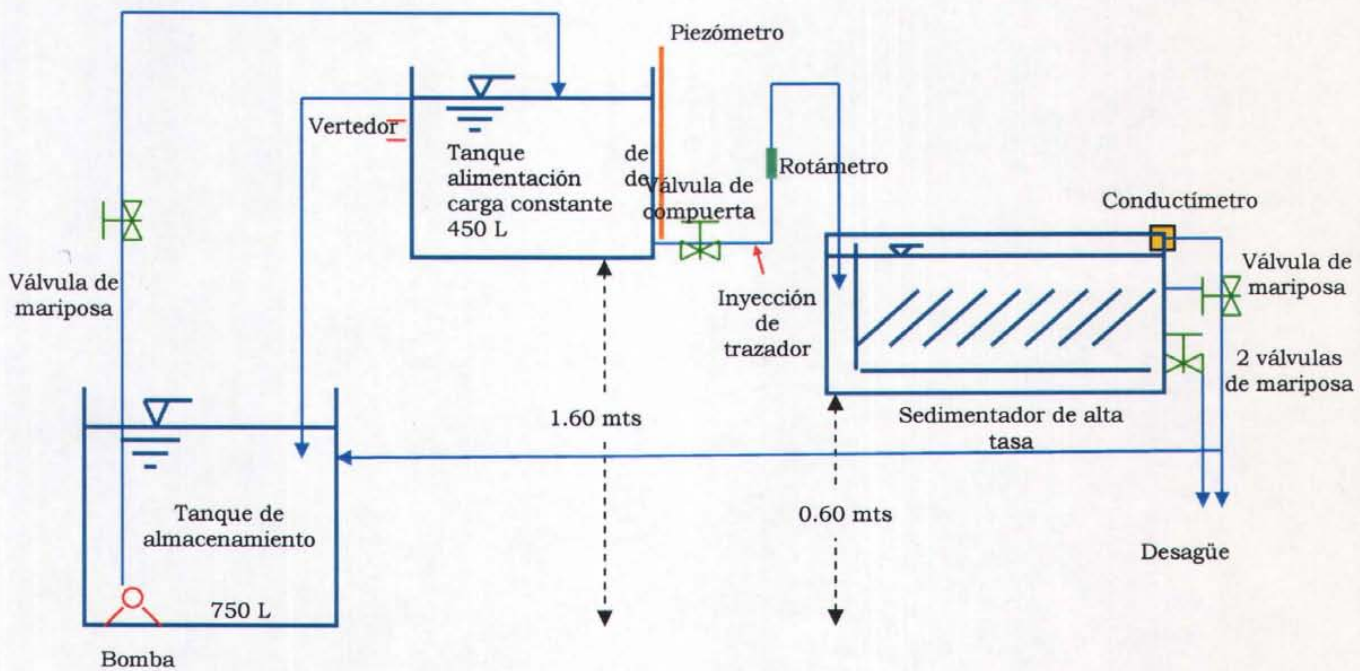
Para la utilización de la técnica de trazadores se requirió adaptar la unidad a un sistema en flujo continuo, estableciendo las condiciones hidráulicas de operación necesarias para su funcionamiento (ver láminas 5.4, 5.5 y 5.6 y 5.7).



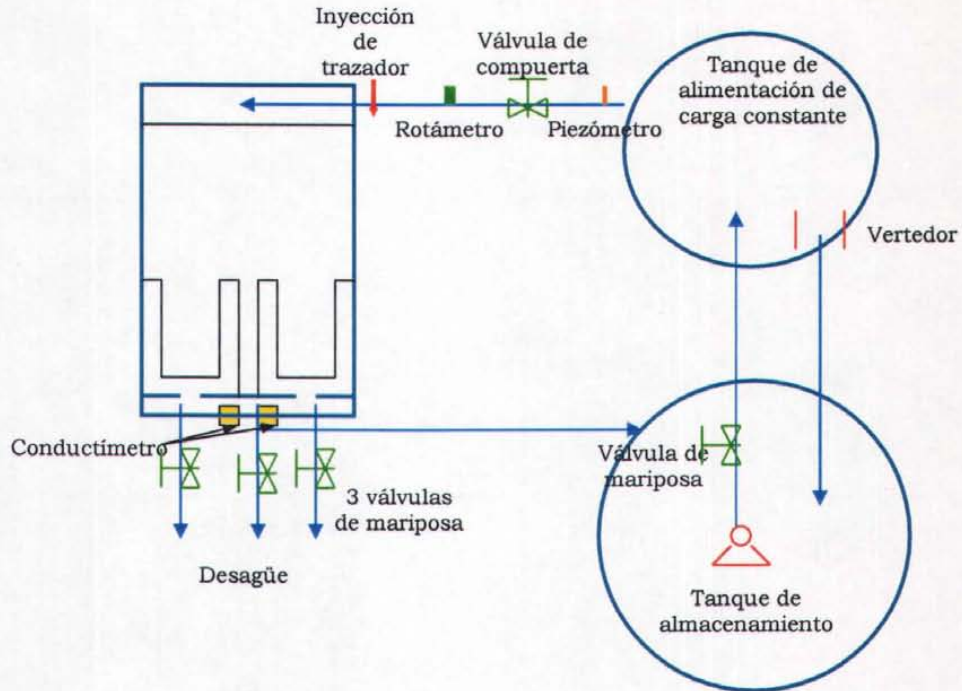
**Lámina 5.4.** (a) Instalación de la entrada del sedimentador.  
(b) Instalación de la salida del sedimentador.



**Lámina 5.5.** Instalación del dispositivo experimental en el laboratorio.



**Lámina 5.6.** Esquema en perfil del dispositivo experimental.



**Lámina 5.7.** Esquema en planta del dispositivo experimental.

Para la realización de la prueba experimental, el dispositivo experimental requirió los siguientes componentes:

- Tanque de almacenamiento de 750 litros.
- Bomba sumergible, marca Little Giant, modelo No. 5-MSP.
- Tanque de alimentación de 450 litros, elevado 1.60 m sobre el piso.
- Tubería de conexión de PVC de 1½" de diámetro.
- Válvulas de 1½" de diámetro cada una (una válvula de compuerta de cobre y cinco válvulas mariposas de PVC).
- Rotámetro para medir el gasto, marca Blue White Industries, modelo No. CF45750.
- Salmuera como trazador y azul de metileno.
- Dos jeringas de 50 ml cada una, para inyectar la salmuera y el colorante en forma de impulso.
- Inyector de azul de metileno para las pruebas de visualización del flujo.
- Cámara digital marca Nikon serie 500 para registrar el comportamiento del flujo cuando se utiliza el azul de metileno.
- Conductímetro, marca Orion, modelo 130, el cual se colocó a la salida del sedimentador en la canaleta de recolección para medir la conductividad, sólidos disueltos totales y temperatura del agua al momento de las pruebas con trazadores.
- Piezómetro para controlar el nivel del agua en el tanque de almacenamiento.
- Cronómetro.

El funcionamiento del prototipo experimental consiste en alojar en el tanque de almacenamiento el agua recibida por la red de agua potable del Laboratorio de Potabilización del IMTA. En este sitio la bomba sumergible, que envía el agua almacenada al tanque elevado conectado por medio de una tubería, es controlado por una válvula de mariposa ( $V_1$ ). Este tanque de alimentación se colocó con el fin de mantener un nivel de carga hidráulica constante durante las pruebas y así proveer un gasto constante al sedimentador. Para llevar esto a cabo, en el tanque alimentador, se instaló un vertedor de excedencia que está conectado al tanque de almacenamiento para recircular el agua y no producir derramamiento de ésta. Con la ayuda de un piezómetro instalado en la tubería de conexión entre el tanque de alimentación y el sedimentador se observó el nivel del agua. Además, en este tanque, para establecer el flujo de agua requerido para las pruebas, se instaló un rotámetro que mide el caudal que alimenta al sedimentador, controlado con una válvula de compuerta ( $V_2$ ).

El agua de salida del sedimentador está conectado con una tubería al tanque de almacenamiento y a la red de desagüe del laboratorio.

La tubería de purga conectada a la tubería perforada de drenaje en la parte inferior de las tolvas, permite vaciar el sedimentador rápidamente al finalizar la prueba además de que facilita su lavado.

Para inyectar el trazador a la tubería de alimentación se utilizaron jeringas que se conectan por medio de dos mangueras de plástico de 1/8" de diámetro que recibe la boquilla de las dos jeringas; éstas se instalaron antes de un cambio de dirección del flujo para asegurar una mezcla uniforme entre el trazador y el agua que alimenta al sedimentador. Una vez inyectado el trazador, se cierran las mangueras con una abrazadera de tornillo para evitar la salida del flujo de agua.

Durante la prueba con sal se colocaron dos conductímetros en la canaleta de salida para medir los sólidos disueltos totales (en mg/l) y la temperatura del agua (en °C) del agua que sale de la unidad de sedimentación.

### **5.1.3. Calibración del equipo**

Antes de realizar la prueba con trazadores se verificó que las mediciones del gasto y el volumen fueran las correctas, de lo contrario los resultados no serían confiables. Con esto, se evitó provocar errores sistemáticos que pudieran distorsionar los resultados reales al momento de las pruebas.

Para verificar que se tenía un flujo constante durante las pruebas de trazadores se utilizó un rotámetro que mide el caudal que alimenta la unidad de sedimentación. Este dispositivo se calibró volumétricamente en el banco de medición del laboratorio "Enzo Levi" del IMTA (ver figura 5.8). Los resultados de la calibración se pueden consultar en el anexo 1.

El motivo de hacer esta calibración es que la medición del caudal debe ser lo más exacta posible, ya que de esto depende la calidad de análisis de las curvas de concentración del trazador y la comparación con los modelos que van a determinar el comportamiento hidráulico de la unidad de sedimentación.

Los conductímetros utilizados al momento de realizar los experimentos con el trazador de solución salina, se calibraron antes y después de realizar cada prueba con trazadores, tal como lo indica el manual de control de calidad analítica del Laboratorio de Potabilización del IMTA.



**Lámina 5.8.** Calibración volumétrica del rotámetro.

## 5.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES

El suministro de sal en las pruebas de trazadores y el colorante, se aplicó de manera instantánea, con las siguientes condiciones de operación:

Parámetro	Valor utilizado para las pruebas	Valor recomendado
Duración de la prueba	de $2\tau$ a $3\tau$	mínimo dos veces el tiempo de residencia teórico de la unidad, para inyección del trazador en forma de impulso
Tiempo de inyección	5 seg	inferior a $1/30$ del tiempo teórico de retención $\tau$ ( $< 45$ seg).
Tiempo de las lecturas	30 seg	se deben tener las lecturas lo más cercanas posibles

**Tabla 5.1.** Condiciones de operación utilizados para las pruebas de trazadores.

La realización de las pruebas experimentales con trazadores se desarrolló con el siguiente procedimiento:

1. Se preparó la solución de trazador, a diferentes concentraciones de sal (ver tabla 5.3) en 90 ml.
2. Se transfirió la solución de trazador a las dos jeringas de 50 ml cada una y se conectaron a la tubería de alimentación del sedimentador para el momento de la inyección.
3. En forma paralela a las actividades 1 y 2 se llenó de agua el tanque de almacenamiento y se encendió la bomba sumergible para llenar el tanque de alimentación y el sedimentador.
4. Se recirculó el agua en un período igual al tiempo de residencia en todo el dispositivo hasta lograr un régimen permanente de flujo. Se reguló la cantidad de flujo que alimenta al sedimentador con la ayuda de las válvulas, verificándose tener un gasto continuo y constante. La verificación del gasto constante se llevó a cabo con el rotámetro y con el nivel del tanque constante, mediante el vaso comunicante adosado al tanque.
5. Se verificó con los conductímetros que la temperatura y la conductividad del agua fuera la misma en el tanque de almacenamiento, en el tanque de alimentación y en el sedimentador. Luego se colocaron los conductímetros en la canaleta de salida del sedimentador.
6. Se interrumpió la recirculación del flujo del agua de salida del sedimentador que se dirige al tanque de almacenamiento, cambiando el tubo de recirculación a la red de desagüe, lo anterior con el fin de eliminar el agua contaminada con trazador en el tanque de almacenamiento.
7. Se inyectó el trazador de manera instantánea (aproximadamente 5 segundos), se midieron los sólidos disueltos totales SDT y temperatura del agua con los conductímetros, para la pruebas con sal.



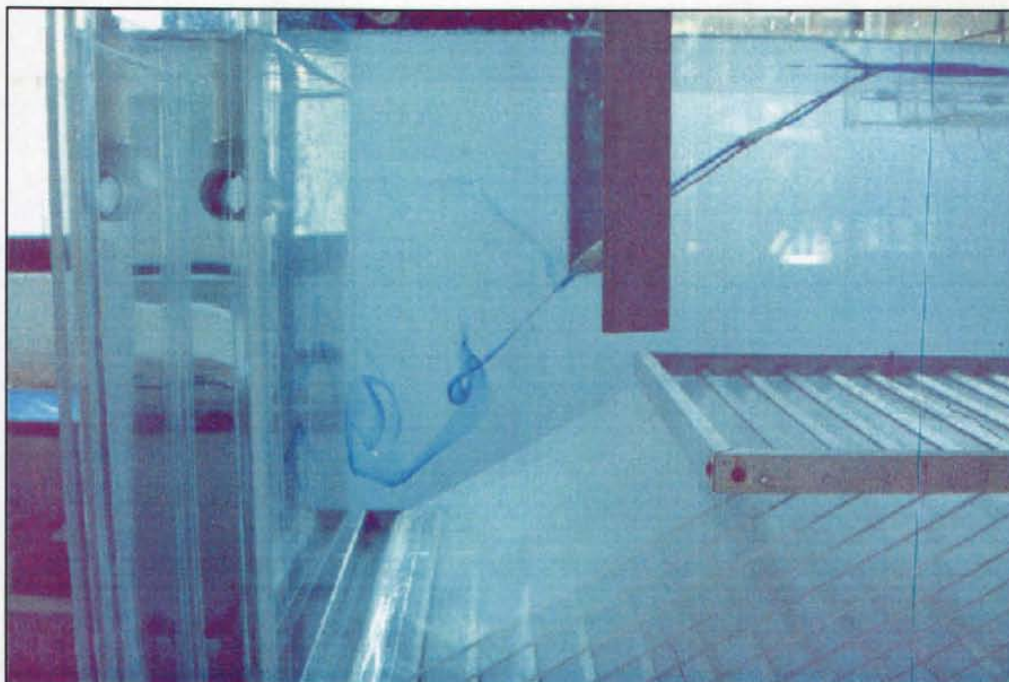
8. Se finalizó la prueba con sal cuando se tuvo tres valores consecutivos de los SDT a los del inicio de la prueba. Se finalizó la prueba con colorante cuando éste no se apreció visiblemente en el sedimentador.
9. Se apagó la bomba para comenzar a vaciar el sedimentador con la ayuda de la tubería de purga ubicada en la parte inferior de las tolvas.
10. Por último, se lavó con agua limpia el sedimentador para que no quedaran residuos de trazador.
11. Para la prueba con sal se pesó la cantidad agregada de sal (ver tabla 5.3) con la ayuda de una báscula electrónica. Se disolvió la sal en 90 ml de agua destilada en un matraz de 150ml con un agitador magnético. En el caso de la inyección con azul de metileno, se adicionó directamente en los 90 ml de las jeringas sin diluir el colorante y se tomaron registros de fotos cada minuto.

### **5.2.1. Arreglos preliminares**

Como la unidad de sedimentación ya estaba diseñada y construida, se realizaron pruebas con colorante para observar el comportamiento del flujo en la unidad y establecer las condiciones necesarias de funcionamiento hidrodinámico lo más parecido a un sedimentador ascendente de alta tasa de flujo pistón.

Para el caso de estos ensayos preliminares, el azul de metileno se inyectó por medio de un aplicador en forma de aguja en un punto dado del fluido en movimiento (ver lámina 5.9), para observar, después de un cierto tiempo, la línea de traza que se ha formado durante ese lapso.

Con estos ensayos de colorante se debe observar las líneas de corriente del flujo, ya que éstas muestran desplazamientos del fluido, e indican la dirección general de movimiento (Maza y García, 1994), como auxiliar para establecer cualitativamente las posibles causas que afectan el funcionamiento hidrodinámico del sedimentador.



**Lámina 5.9.** Inyección del colorante por medio de un aplicador en forma de aguja en un punto del sedimentador.

### 5.2.2. Pruebas realizadas con azul de metileno

Una vez efectuados los arreglos preliminares, para evitar problemas hidráulicos generados por recirculaciones y cortocircuitos, se realizaron 4 experimentos (ver tabla 5.2) con azul de metileno inyectando el trazador directamente al flujo de entrada. Estos resultados se registraron fotográficamente para establecer de manera visual el comportamiento hidráulico de la unidad.

Experimento No.	Caudal (l/s)	Volumen (l)	Tiempo de retención hidráulico (min)	Cantidad de colorante agregado (ml)
1	0.52	357	11.5	90
2	0.52	293	9.4	90
3	0.52	225	7.2	90
4	0.52	211	6.8	90
<b>Total de pruebas realizadas con colorante</b>				<b>4</b>

**Tabla 5.2.** Pruebas realizadas con azul de metileno.

Después de realizarse las pruebas experimentales del azul de metileno, se continuó con las pruebas experimentales de sal como trazador.

### **5.2.3. Pruebas realizadas con salmuera**

Se adicionó instantáneamente cloruro de sodio (NaCl), para determinar la distribución de tiempos de residencia de la unidad de sedimentación.

Se tuvo cuidado en las variaciones de temperatura del agua durante todos los experimentos, que no variara más o menos de 1°C, para evitar cambios de densidad y por consiguiente cortocircuitos.

Adicionalmente, se efectuaron pruebas de repetitividad bajo las mismas condiciones de operación (igual caudal y misma concentración de sal) para que las curvas de distribución de los tiempos de residencia se reproduzcan a sí mismas en forma razonablemente aceptable y así establecer que el flujo a través del tanque es estable (Fair y Geyer, 1996).

Las pruebas con sal se realizaron bajo las mismas condiciones de operación de las pruebas con azul de metileno, pero no se realizaron al mismo instante para evitar errores en la medición de la conductividad. Se efectuaron pruebas variando la cantidad de sal agregada a la unidad para observar las respuestas de las curvas DTR y evaluar los resultados obtenidos de la calibración de los modelos. En total se efectuaron 28 pruebas con salmuera repartidas así (ver tabla 5.4.):

Experimento No.	Caudal (l/s)	Volumen (l)	Tiempo de retención hidráulico (min)	Cantidad de sal agregada (g)	Concentración de sal Co (mg/l)	Pruebas realizadas con sal
1	0.52	357	11.5	19.4	54.4	4 (Pruebas de repetitividad)
1	0.52	357	11.5	3 6 9 12 15 18	8.4 16.8 25.2 33.6 42.0 50.4	6
2	0.52	293	9.4	3 6 9 12 15 18	10.2 20.5 30.7 41.0 51.2 61.4	6
3	0.52	225	7.2	3 6 9 12 15 18	13.3 26.7 40.0 53.3 66.7 80.0	6
4	0.52	211	6.8	3 6 9 12 15 18	14.2 28.4 42.7 56.9 71.1 85.3	6
<b>Total de pruebas realizadas con sal</b>						<b>28</b>

**Tabla 5.3.** Pruebas realizadas a diferentes concentraciones de sal.

### 5.3. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN

Las curvas experimentales de las pruebas con salmuera permitieron calibrar los modelos para establecer el comportamiento hidráulico de la unidad de sedimentación.

#### 5.3.1. Modelo para reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos

La metodología de calibración seguida con los modelos basados en funciones de transferencia fue la siguiente:

- Se calculó el tiempo de residencia hidráulico (ecuación 2.1), la concentración inicial de trazador (ecuación 2.2), la media  $\mu$  y la varianza  $\sigma^2$  de los datos experimentales (ecuaciones 2.7 y 2.8).
- Se determinó la fracción de zonas muertas  $M$ , la cual es la desviación entre la media y el tiempo teórico de residencia (ecuación 3.28).

Para un valor de  $M$  encontrado experimentalmente, existe un número infinito de combinaciones de  $n$  y  $N$ , se necesitó hacer lo siguiente:

- Se obtuvo una primera aproximación del número de reactores en serie mediante la varianza reducida o adimensional (ecuación 3.32).
- Se calculó mediante un método iterativo el valor de  $n$  que minimice el error entre los valores calculados con el modelo y los datos experimentales (ecuación 3.31).
- Se varió el valor de  $N$ .
- Se escogió los valores  $n$  y  $N$  que permitieran un mejor ajuste a la curva de los datos experimentales.

Para realizar este ajuste, se aplicó el programa (Visual Basic para Excel) utilizado en el estudio de las plantas del norte del país (Martín et al, 1999), el cual permitió en forma sistemática calibrar el modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos.

### **5.3.2. Modelo simplificado de Wolf y Resnick**

La metodología para evaluar el modelo de Wolf y Resnick se desarrolló de la siguiente manera:

- Se determinó la función  $F(t)$  con base en los datos experimentales (ecuación 3.43).
- Se graficó el  $\log(1-F(t))$  vs  $\theta$ .
- En la gráfica se localizaron dos puntos adyacentes situados en la parte recta de la curva.
- Se calcularon la pendiente  $\tan \alpha$  y la ordenada  $b$  al origen de la recta. (ecuaciones 3.45 y 3.46).
- Se calculó el porcentaje de flujo pistón  $p$  (ecuación 3.47), el volumen de espacios muertos  $m$  (ecuación 3.48) y fracción de mezcla completa  $M$  (ecuación 3.49).

### **5.3.3. Modelo de dispersión**

Se realizó un método iterativo para determinar el valor del número de dispersión, como sigue:

- Se determinó la media  $\mu$  y la varianza  $\sigma^2$  de la curva experimental (ecuaciones 2.7 y 2.8).
- Se calculó el parámetro adimensional del número de dispersión  $D/uL$ , (ecuación 3.53), al aplicar un método iterativo con los valores de  $\sigma^2$  y  $\mu$ .

### **5.3.4. Modelo basado en el análisis de la curva**

La metodología para evaluar la curva experimental se realizó así:

- Se calculó el tiempo de residencia hidráulico (ecuación 2.1), el tiempo medio de residencia ( $\mu$ ) correspondiente al paso del 50% de la cantidad total de trazador (ecuación 2.7).
- Se determinó el tiempo inicial desde que se aplicó el trazador hasta que apareció en el efluente ( $t_i$ ), el tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total de trazador ( $t_{10}$ ), el tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total de trazador ( $t_{90}$ ) y el tiempo moda ( $t_p$ ) correspondiente a la concentración máxima de trazador.
- Se relacionó el tiempo de residencia hidráulico con los diferentes parámetros determinados en el punto anterior (ecuaciones 3.55, 3.56 y 3.57) y el índice de Morrill (ecuación 3.58) para establecer las condiciones del flujo de acuerdo a los criterios empíricos establecidos en la literatura.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

A continuación se analizarán los resultados de las pruebas experimentales con azul de metileno y sal para evaluar el comportamiento de los modelos presentados en este estudio.

### 6.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 6.1.1. Arreglos preliminares

Por medio del colorante de azul de metileno se observó el movimiento hidráulico para diferentes arreglos del flujo dentro del sedimentador.

Se realizaron tres arreglos preliminares modificando el ángulo de las placas, cambios de alimentación y ajustes en la estructura del sedimentador (ver láminas 6.1, 6.2 y 6.3), para evitar problemas en su funcionamiento hidrodinámico sin mezcla, sin cambios importantes de dirección de flujo, con una adecuada distribución de flujo en la unidad. Estos arreglos se registraron de forma gráfica.

El primer arreglo experimental mostró, mediante el azul de metileno, que existen zonas de cortocircuitos (ver lámina 6.1), en la zona A, debido a la deficiencia en el diseño mismo del sedimentador. La inclinación de las mamparas a  $60^\circ$  con respecto a la horizontal, permitieron que el flujo pasara directamente a los vertedores de recolección.

Por otra parte, se presentaron problemas de mezcla (zona B), debido a la alimentación del flujo por medio de la tubería perforada ubicada en el centro del sedimentador, por lo que se decidió modificar la alimentación de la unidad.

También se observó recirculación del flujo arriba de las mamparas (zona C) debido a que las diferencias de velocidades de flujo generaron corrientes, además de que las canaletas de recolección no estaban repartidas en toda el área superficial.

Parámetro	Fórmula	Valor calculado	Valor recomendado
Carga superficial	$v = \frac{Q}{A_h} = v_0 * \text{sen}\alpha$	170 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	120 – 185 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d (para América Latina)
Caudal	$Q = A_0 * v_0$	0.518 l/s	-
Velocidad del flujo entre las placas	$v_0 = \frac{Q}{A_0}$	0.43 cm/s	$v_0 < 1$ cm/s
Velocidad de entrada	$v_e = \frac{Q}{Ae}$	0.012 m/s	0.3 m/s
Número de Reynolds	$Re = \frac{v_0 * R_h}{\nu}$	32	< 500
Número de Froude	$Fr = \frac{v_0^2}{g * R_h}$	1.34 x 10 <sup>-4</sup>	> 10 <sup>-5</sup>
Ángulo de inclinación de las placas	-	27°	60°
Ángulo tolvas	-	45°	45°

**Tabla 6.1.** Comparación de los criterios de diseño recomendados y los parámetros calculados reales de funcionamiento del sedimentador prototipo.

La tabla 6.1. se obtuvo de la siguiente manera:

El área útil de las mamparas  $A$  es:

$$A = 0.44\text{m} * 0.60\text{m} = 0.264 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el área perpendicular a las mamparas  $A_0$  es:

$$A_0 = A * \text{sen } \alpha = 0.264 \text{ m}^2 * \text{sen } 27^\circ = 0.12 \text{ m}^2$$

Considerando que se escoge un caudal de 32 l/m medida en el rotámetro, que equivale a 0.518 l/s, la velocidad del flujo entre las placas es:

$$v_0 = \frac{Q}{A_0} = \frac{0.000518\text{m}^3/\text{s}}{0.12\text{m}^2} = 4.32\text{E}^{-3} \text{ m/s} = 0.43 \text{ cm/s (menor a 1 cm/s)}$$

Con el ángulo de inclinación de mamparas de 27°, la carga superficial  $v$  que pasa por el sedimentador es:

$$v = v_0 * \text{sen}\alpha = 4.32 \text{ E}^{-3} * \text{sen}(27^\circ) = 1.96\text{E}^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s} = 169.32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Para un área de entrada  $Ae$  igual a:



$$A_e = \frac{0.15m * 0.60m}{2} = 0.045 m^2$$

se tiene que la velocidad de entrada del flujo es:

$$v_e = \frac{Q}{A_e} = \frac{0.00052m^3 / s}{0.045m^2} = 0.012 m/s \text{ (menor a } 0.2 m/s)$$

El radio hidráulico para placas paralelas se puede calcular como:

$$R_h = \frac{d}{2} = \frac{0.015m}{2} = 0.0075 m$$

por lo tanto, el número de Reynolds  $Re$  ( $1.004E^{-6} m^2/s$  a  $20^\circ C$ ) es igual a:

$$Re = \frac{v_0 * R_h}{\nu} = \frac{4.3E^{-3} m / s * 0.0075m}{1.004E^{-6} m^2 / s} = 32 \text{ (menor a } 200)$$

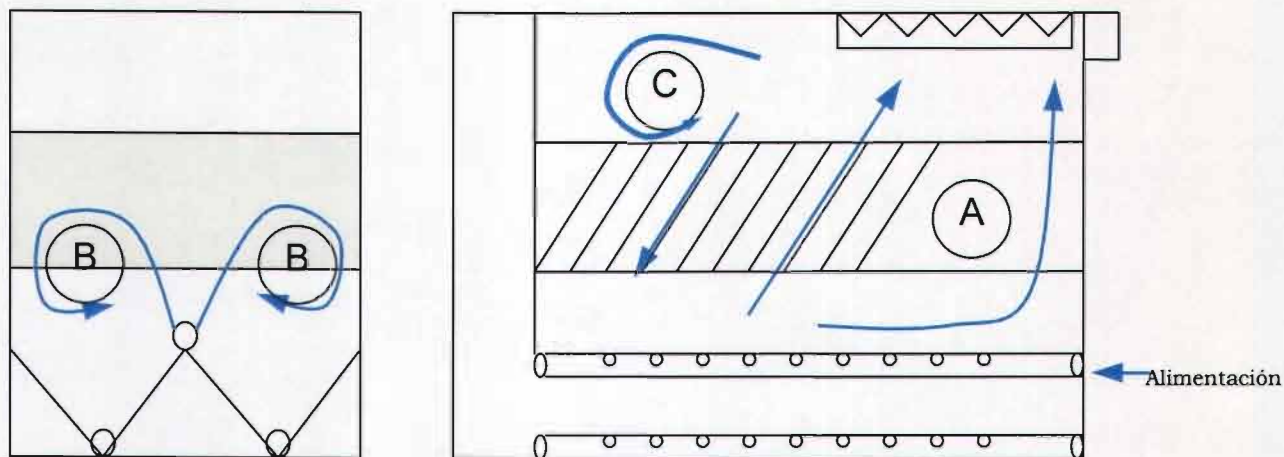
y el número de Froude  $Fr$  es:

$$Fr = \frac{v_0^2}{g * R_h} = \frac{(4.3E^{-3} m / s)^2}{9.81m / s^2 * 0.0075m} = 2.5E^{-4} \text{ (mayor a } 10E^{-5})$$

### **6.1.2. Resultados de las pruebas con azul de metileno**

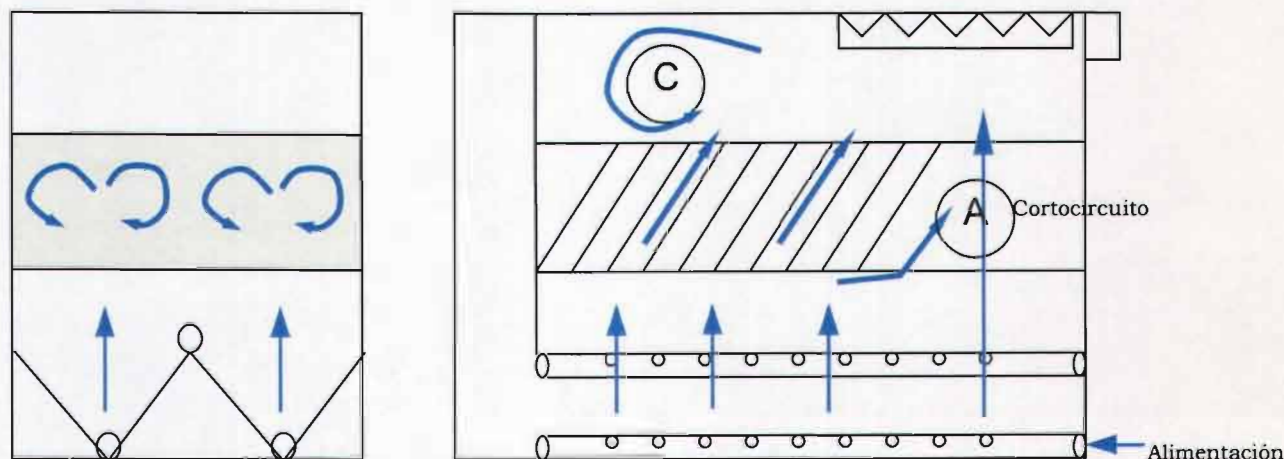
Después de realizar los arreglos necesarios en la estructura de la unidad, se hicieron pruebas por medio del colorante (azul de metileno) introduciendo el colorante a la entrada de la unidad, observándose el comportamiento del flujo por medio de registros fotográficos mostradas en las láminas 6.5., 6.7., 6.9. y 6.11.

En la tabla 6.2 se describen cada uno de los cuatro experimentos realizados con el colorante y las modificaciones que se realizaron a la estructura de la unidad para eliminar los problemas hidráulicos que fueron observados en las fotografías.



**Lámina 6.1.** Comportamiento del flujo en el primer arreglo experimental.

En el segundo arreglo experimental se cambió la zona de alimentación de flujo, el cual se introdujo por la tubería de desagüe como se observa en la lámina 6.2. En este caso, al cambiar la alimentación del flujo a la entrada de la unidad, se evitó la mezcla que se presentó en el primer arreglo; sin embargo, entre las mamparas, se observó mezcla del fluido. También se observó que la corriente de líquido cruza preferentemente la zona del sedimentador que no está cubierta por las mamparas, produciéndose cortocircuitos en la zona A.

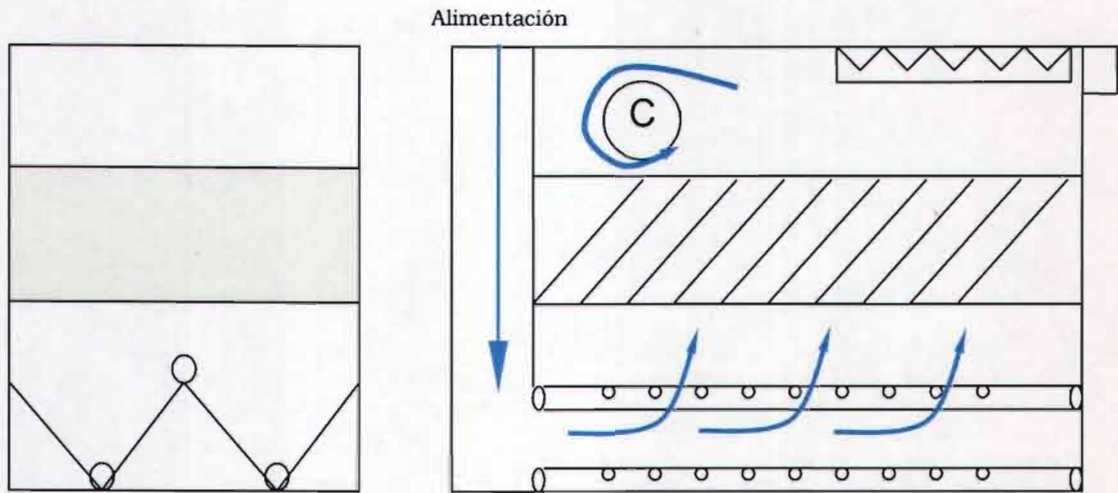


**Lámina 6.2.** Comportamiento del flujo en el segundo arreglo experimental.

En el tercer arreglo experimental (figura 6.3) se introdujo la alimentación por la mampara colocada lateralmente al inicio del sedimentador para permitir una mejor distribución de flujo en la zona de entrada. Como no se podía colocar más mamparas a un ángulo de  $65.5^\circ$ , para cubrir el espacio sobrante de la zona A y evitar el cortocircuito que se presentó en el segundo arreglo, se decidió inclinar las mamparas hasta la pared del sedimentador (ángulo de  $27^\circ$  con respecto a la horizontal) para

evitar este tipo de problemas hidráulicos; además, el objetivo de este estudio fue el evaluar el comportamiento hidráulico del flujo y no la eficiencia de sedimentación de las partículas, ya que el tipo de agua utilizada para las pruebas no contenía materia en suspensión, por lo tanto no iba a formar lodo.

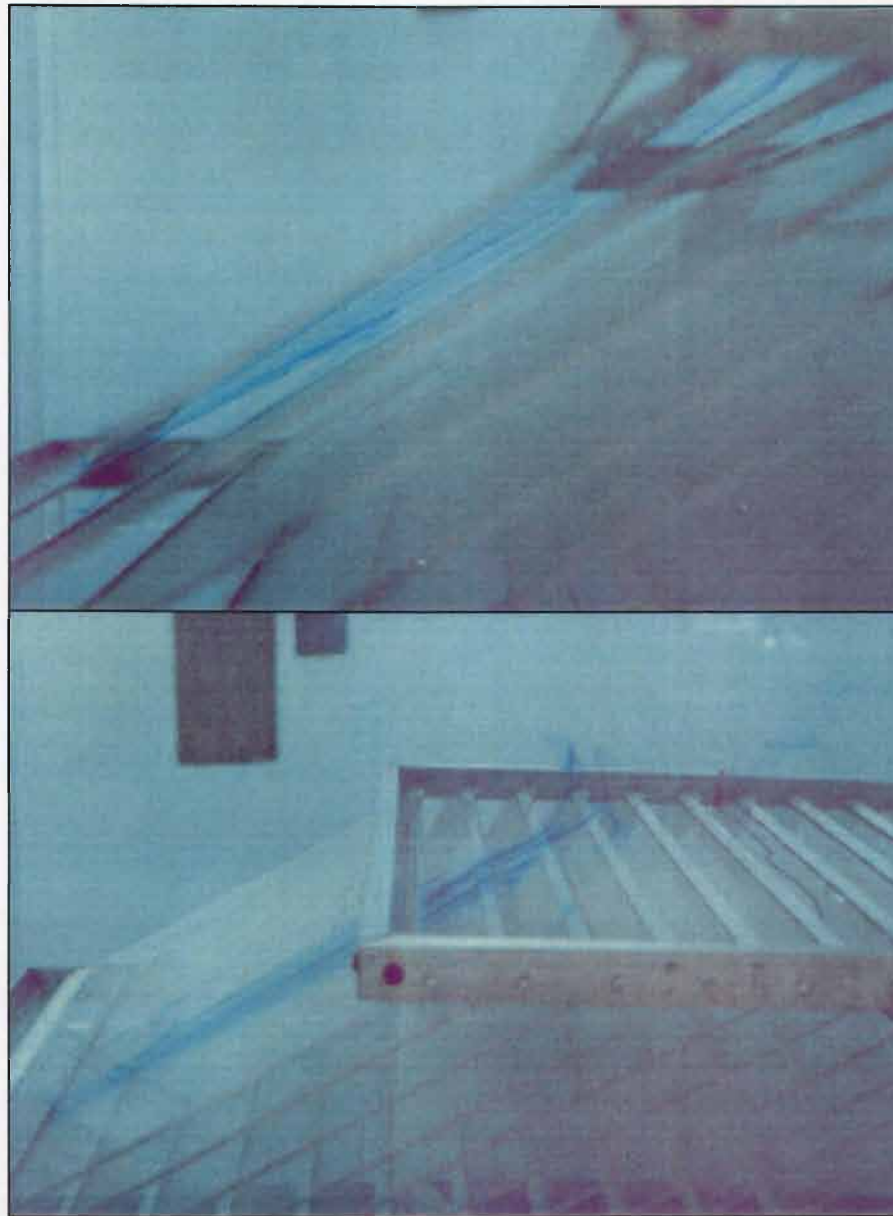
Como se puede observar en la lámina 6.3, el hecho de inclinar las mamparas a  $27^\circ$  no evitó la zona de recirculación indicada en la zona C que provoca acumulación de colorante.



**Lámina 6.3.** Comportamiento del flujo en el tercer arreglo experimental.

Para conseguir una distribución de flujo uniforme en todo el fondo del decantador y una recolección también uniforme del efluente encima de las placas, a fin de obtener una repartición lo más equilibrada posible del flujo en toda el área, cada espacio entre las placas debe considerarse como un pequeño decantador que tiene que recibir la misma cantidad de agua que los otros. Sin embargo, no se logró una distribución uniforme del flujo de salida porque los vertedores de recolección no estaban repartidos uniformemente en toda el área superficial del sedimentador.

Con el tercer arreglo, al introducirse lateralmente el flujo de alimentación al inicio del sedimentador, se aseguró que el flujo se comportara con régimen laminar entre las mamparas (ver figura 6.4), acercándose lo más parecido a un sedimentador ascendente de alta tasa de flujo pistón.



**Lámina 6.4.** Régimen laminar entre las mamparas.

Una vez logrado estos arreglos (cambio en la inclinación de las mamparas y la zona de alimentación) y con las dimensiones de la unidad de sedimentación, se obtuvieron los parámetros de funcionamiento establecidos por los criterios de diseño para el sedimentador, como se muestra en la tabla 6.1:

Parámetro	Fórmula	Valor calculado	Valor recomendado
Carga superficial	$v = \frac{Q}{A_h} = v_0 * \text{sen } \alpha$	170 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	120 – 185 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d (para América Latina)
Caudal	$Q = A_0 * v_0$	0.518 l/s	-
Velocidad del flujo entre las placas	$v_0 = \frac{Q}{A_0}$	0.43 cm/s	$v_0 < 1 \text{ cm/s}$
Velocidad de entrada	$v_e = \frac{Q}{A_e}$	0.012 m/s	0.3 m/s
Número de Reynolds	$Re = \frac{v_0 * R_h}{\nu}$	32	< 500
Número de Froude	$Fr = \frac{v_0^2}{g * R_h}$	1.34 x 10 <sup>-4</sup>	> 10 <sup>-5</sup>
Ángulo de inclinación de las placas	-	27°	60°
Ángulo tolvas	-	45°	45°

**Tabla 6.1.** Comparación de los criterios de diseño recomendados y los parámetros calculados reales de funcionamiento del sedimentador prototipo.

La tabla 6.1. se obtuvo de la siguiente manera:

El área útil de las mamparas  $A$  es:

$$A = 0.44\text{m} * 0.60\text{m} = 0.264 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el área perpendicular a las mamparas  $A_0$  es:

$$A_0 = A * \text{sen } \alpha = 0.264 \text{ m}^2 * \text{sen } 27^\circ = 0.12 \text{ m}^2$$

Considerando que se escoge un caudal de 32 l/m medida en el rotámetro, que equivale a 0.518 l/s, la velocidad del flujo entre las placas es:

$$v_0 = \frac{Q}{A_0} = \frac{0.000518\text{m}^3/\text{s}}{0.12\text{m}^2} = 4.32\text{E}^{-3} \text{ m/s} = 0.43 \text{ cm/s} \text{ (menor a } 1 \text{ cm/s)}$$

Con el ángulo de inclinación de mamparas de  $27^\circ$ , la carga superficial  $v$  que pasa por el sedimentador es:

$$v = v_0 * \text{sen} \alpha = 4.32 \text{ E}^{-3} * \text{sen}(27^\circ) = 1.96 \text{ E}^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s} = 169.32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Para un área de entrada  $A_e$  igual a:

$$A_e = \frac{0.15\text{m} * 0.60\text{m}}{2} = 0.045 \text{ m}^2$$

se tiene que la velocidad de entrada del flujo es:

$$v_e = \frac{Q}{A_e} = \frac{0.00052 \text{ m}^3/\text{s}}{0.045 \text{ m}^2} = 0.012 \text{ m/s} \text{ (menor a } 0.2 \text{ m/s)}$$

El radio hidráulico para placas paralelas se puede calcular como:

$$R_h = \frac{d}{2} = \frac{0.015\text{m}}{2} = 0.0075 \text{ m}$$

por lo tanto, el número de Reynolds  $Re$  ( $1.004 \text{ E}^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20^\circ\text{C}$ ) es igual a:

$$Re = \frac{v_0 * R_h}{\nu} = \frac{4.3 \text{ E}^{-3} \text{ m/s} * 0.0075 \text{ m}}{1.004 \text{ E}^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 32 \text{ (menor a } 200)$$

y el número de Froude  $Fr$  es:

$$Fr = \frac{v_0^2}{g * R_h} = \frac{(4.3 \text{ E}^{-3} \text{ m/s})^2}{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.0075 \text{ m}} = 2.5 \text{ E}^{-4} \text{ (mayor a } 10 \text{ E}^{-5})$$

### 6.1.2. Resultados de las pruebas con azul de metileno

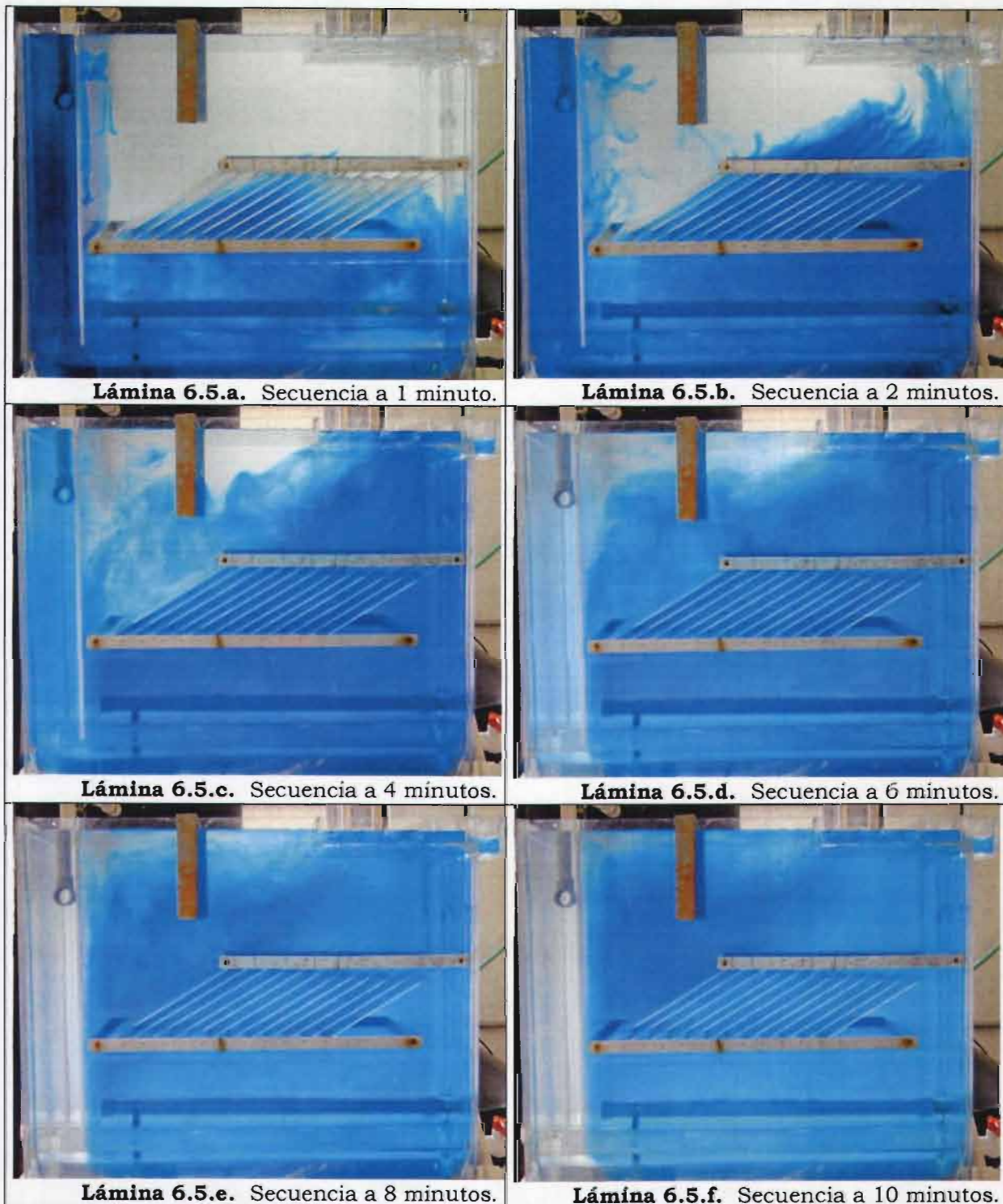
Después de realizar los arreglos necesarios en la estructura de la unidad, se hicieron pruebas por medio del colorante (azul de metileno) introduciendo el colorante a la entrada de la unidad, observándose el comportamiento del flujo por medio de registros fotográficos mostradas en las láminas 6.5., 6.7., 6.9. y 6.11.

En la tabla 6.2 se describen cada uno de los cuatro experimentos realizados con el colorante y las modificaciones que se realizaron a la estructura de la unidad para eliminar los problemas hidráulicos que fueron observados en las fotografías.

Experimento	Observación	Modificaciones
<p><b>1</b></p> <p>Ver lámina 6.5</p>	<p>Los registros fotográficos (figura 6.5.) muestran una mayor concentración de colorante en la parte inferior de las placas (ver figura 6.5.b.), así como líneas de corriente entre las mamparas que indican régimen laminar. Conforme pasa el tiempo la concentración de colorante se homogeniza en la parte inferior de las placas indicando mezcla del flujo. También se puede observar acumulación de colorante en la parte superior izquierdo de las placas (ver figura 6.5.f.), y la posterior liberación del mismo a medida que transcurrió el tiempo (ver figura 6.5.h., 6.5.i. y 6.5.j.).</p>	<p>Se selló con mica la parte inferior de las placas (lámina 6.6) para evitar mezcla de flujo en la zona A.</p>
<p><b>2</b></p> <p>Ver lámina 6.6</p> <p>Ver lámina 6.7</p>	<p>Como se puede observar en la lámina 6.7., en los primeros 6 minutos de la inyección del colorante, existe una zona donde el colorante no se reparte en la zona B, debido a que el flujo sigue el camino preferencial que dirige el ángulo de las mamparas hacia los vertederos de recolección. Pero después de que a pasado la mayor parte del colorante por las mamparas, una parte de colorante se acumula en la parte superior de las mamparas (ver lámina 6.7.g.) y después lentamente sale por los vertederos.</p>	<p>Se colocó un sello hidráulico de mica como se muestra en la lámina 6.8., provoca una zona parcial de aislamiento en la zona B, que limita el paso del líquido a esta zona.</p>
<p><b>3</b></p> <p>Ver lámina 6.8</p> <p>Ver lámina 6.9</p>	<p>Parte del colorante logra pasar a las zonas selladas, debido a que éstos no son herméticos y no impiden el paso del líquido. Al final de la prueba se observa que el colorante permanece en las zonas selladas (ver lámina 6.9.j.). Sin embargo, se observa en la zona C, una pequeña acumulación de colorante por encima de las placas (ver figura 6.9.g.), que sale lentamente al final de la prueba (ver lámina 6.9.j.).</p>	<p>Para evitar finalmente la pequeña acumulación de colorante por encima de las placas, se inclinó el sello hidráulico en dirección a los vertederos (ver lámina 6.10.) para obligar al flujo a salir directamente por los mismos.</p>
<p><b>4</b></p> <p>Ver lámina 6.10</p> <p>Ver lámina 6.11</p>	<p>A pesar de que no se elimina totalmente la acumulación temporal del colorante en la parte superior de las placas, se observa que el flujo sigue preferencialmente la dirección de las mamparas al salir por las canaletas de recolección, presentándose poca desviación del flujo a otras zonas (ver lámina 6.11).</p>	

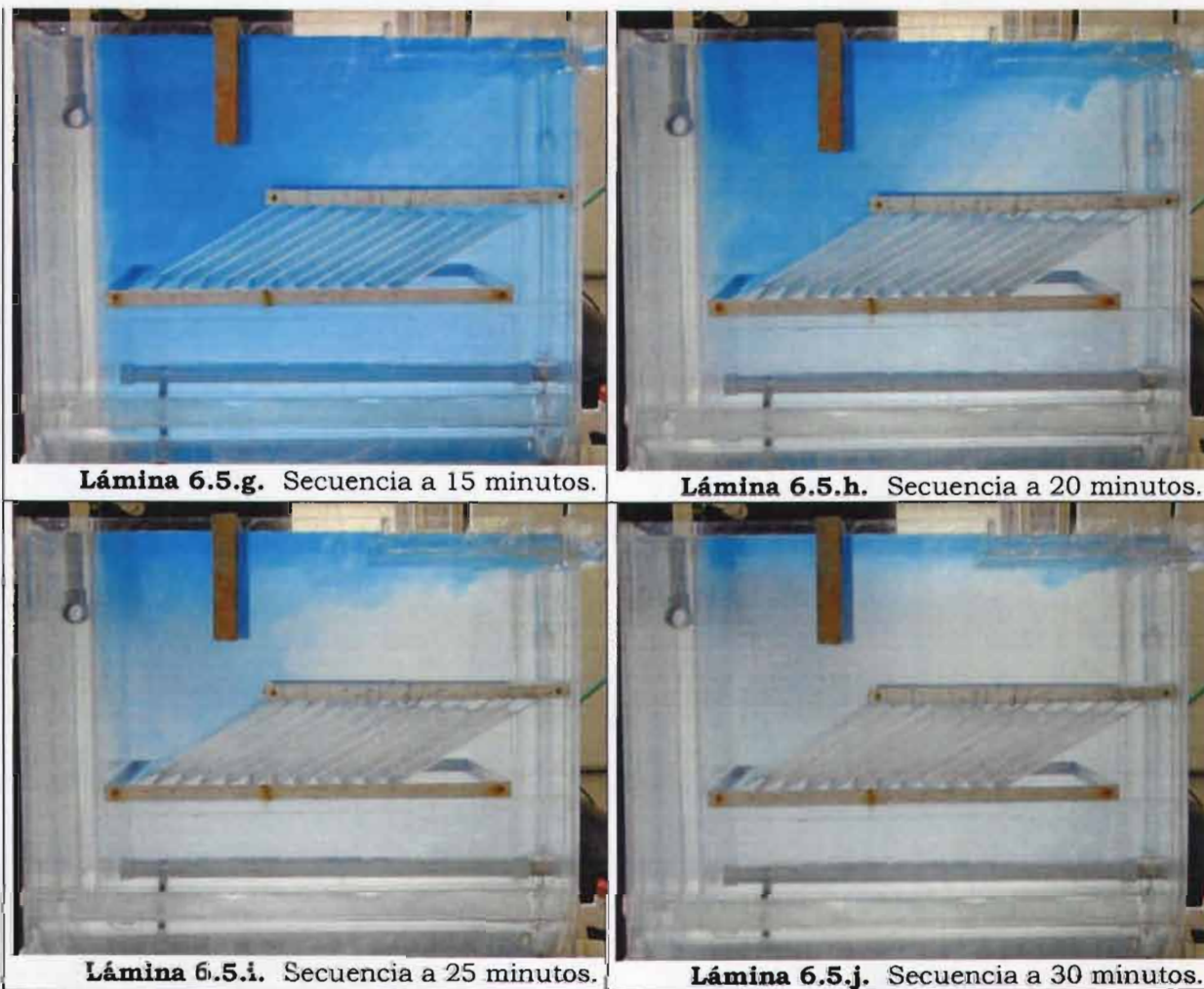
**Tabla 6.2.** Descripción de las pruebas realizadas con azul de metileno y los cambios efectuados en la estructura del sedimentador.

**6.1.2.1. Resultados de las pruebas con azul de metileno del Experimento No. 1.**



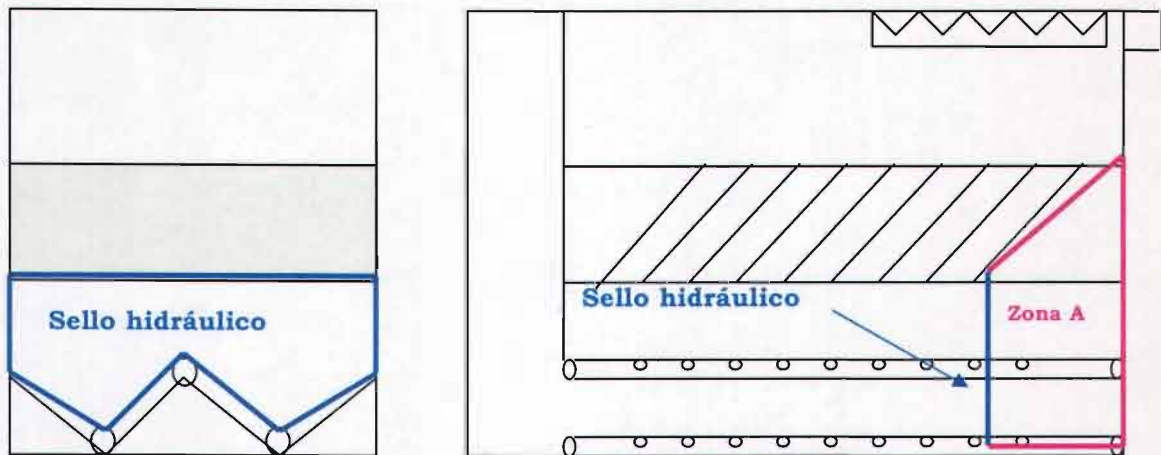
**Lámina 6.5.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 1. (Continuación)



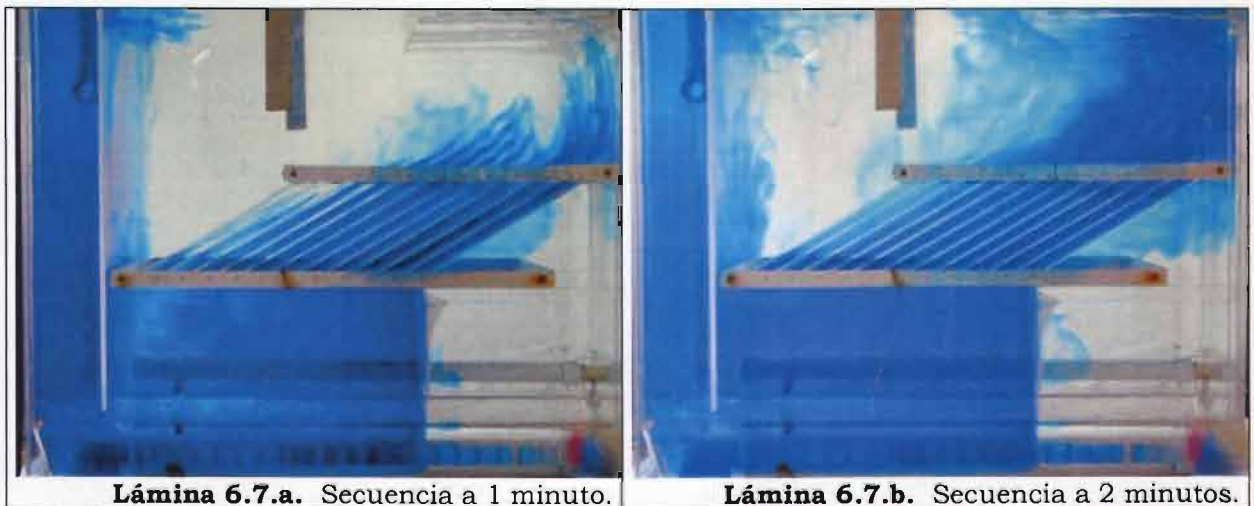


**Lámina 6.5.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 1.

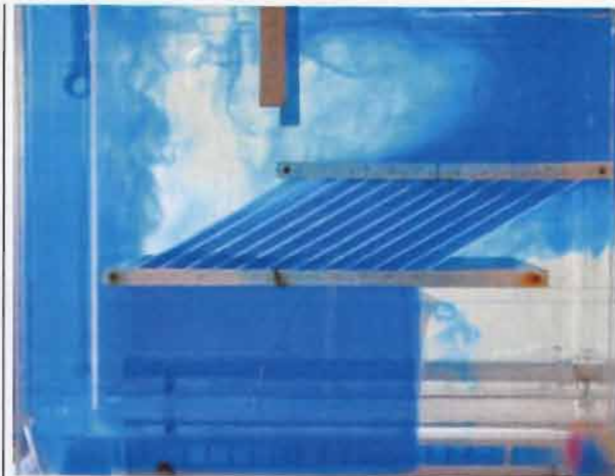
**6.1.2.2. Resultados de las pruebas con azul de metileno del Experimento No. 2.**



**Lámina 6.6.** Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 2.



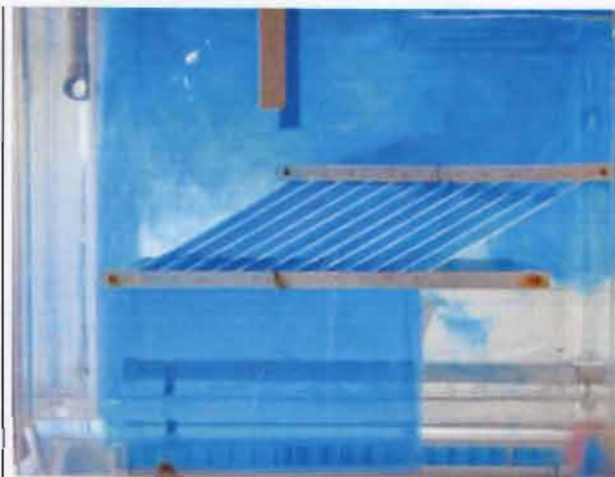
**Lámina 6.7.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 2. (Continuación)



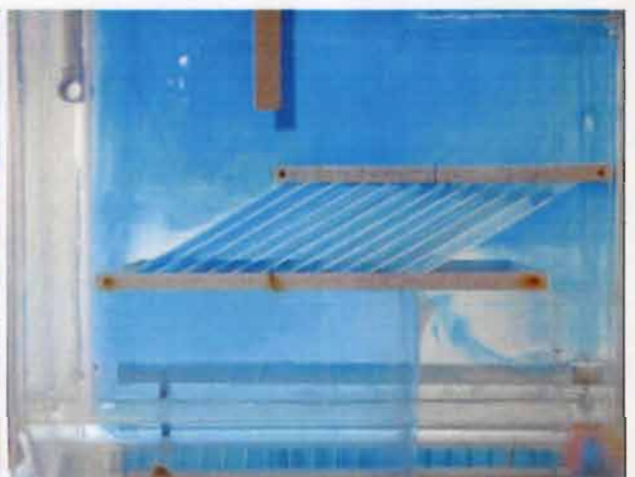
**Lámina 6.7.c.** Secuencia a 4 minutos.



**Lámina 6.7.d.** Secuencia a 6 minutos.



**Lámina 6.7.e.** Secuencia a 8 minutos.



**Lámina 6.7.f.** Secuencia a 10 minutos.

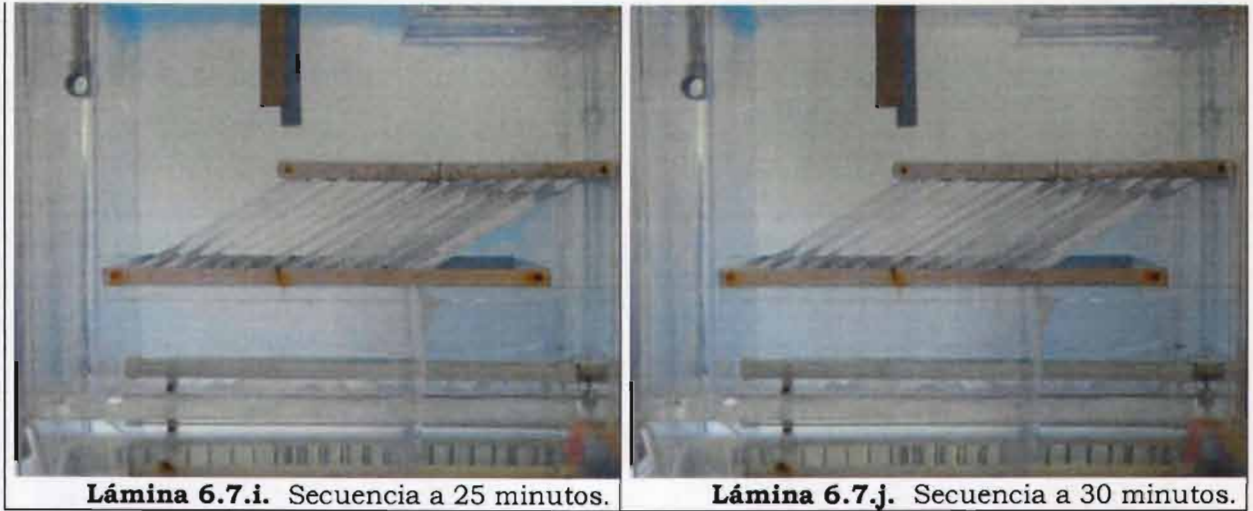


**Lámina 6.7.g.** Secuencia a 15 minutos.



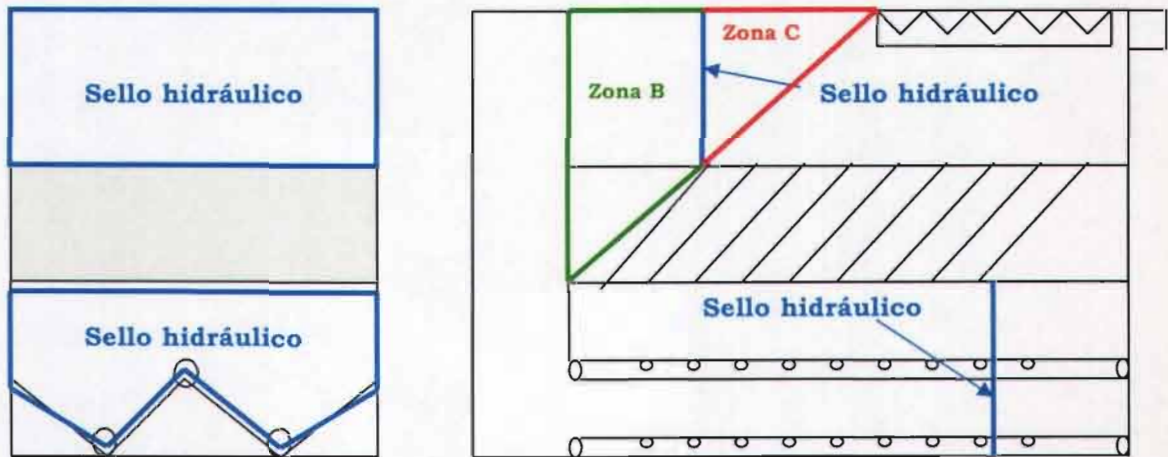
**Lámina 6.7.h.** Secuencia a 20 minutos.

**Lámina 6.7.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 2. (Continuación)

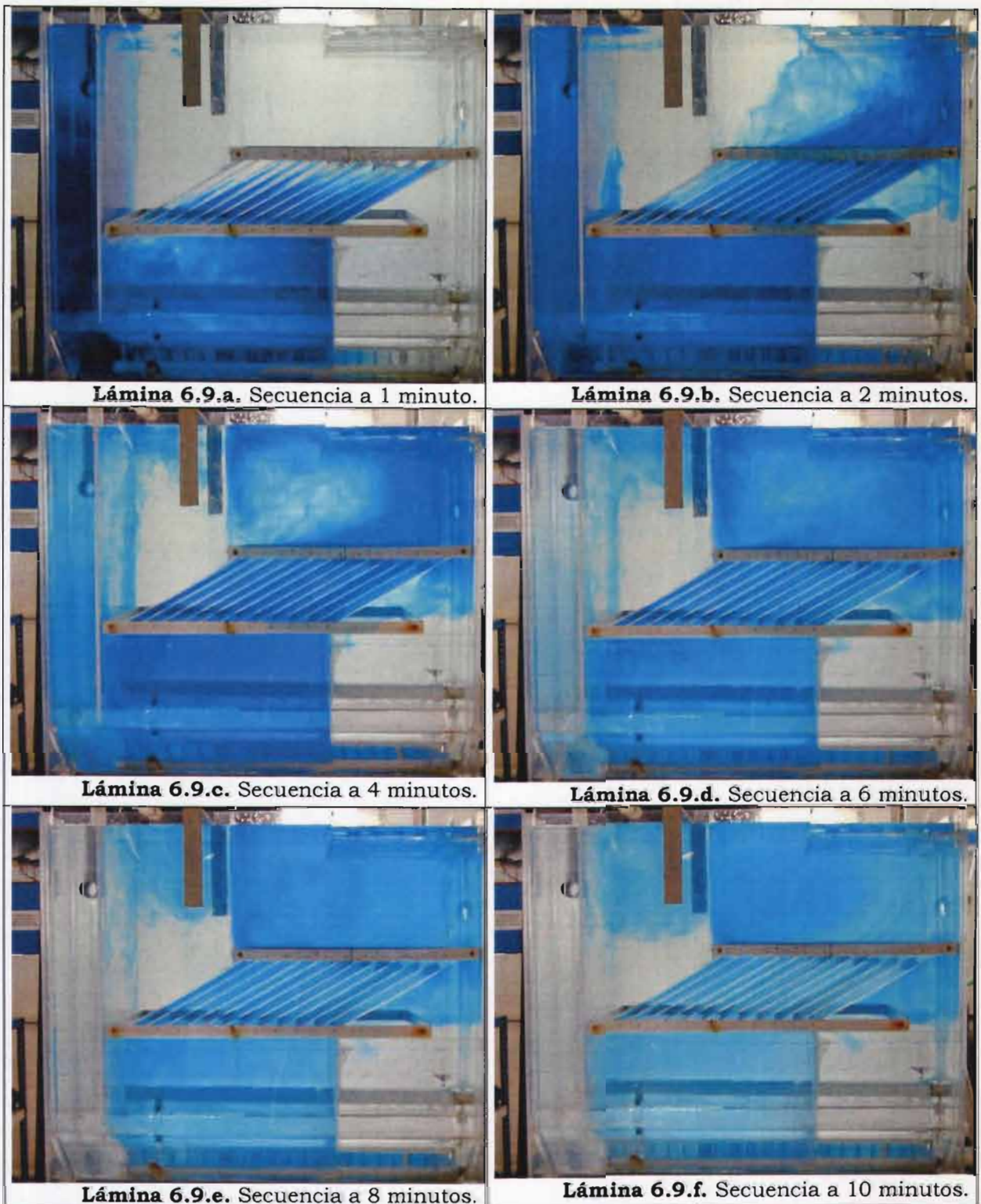


**Lámina 6.7.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 2.

**6.1.2.3. Resultados de las pruebas con azul de metileno del Experimento No. 3.**



**Lámina 6.8.** Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 3.



**Lámina 6.9.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 3. (Continuación)



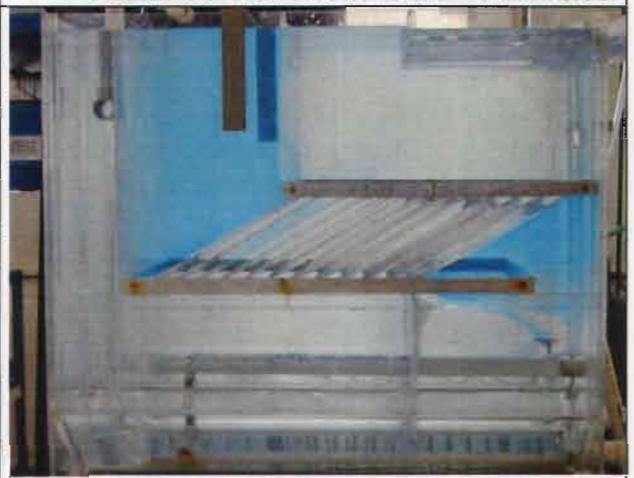
**Lámina 6.9.g.** Secuencia a 14 minutos.



**Lámina 6.9.h.** Secuencia a 20 minutos.



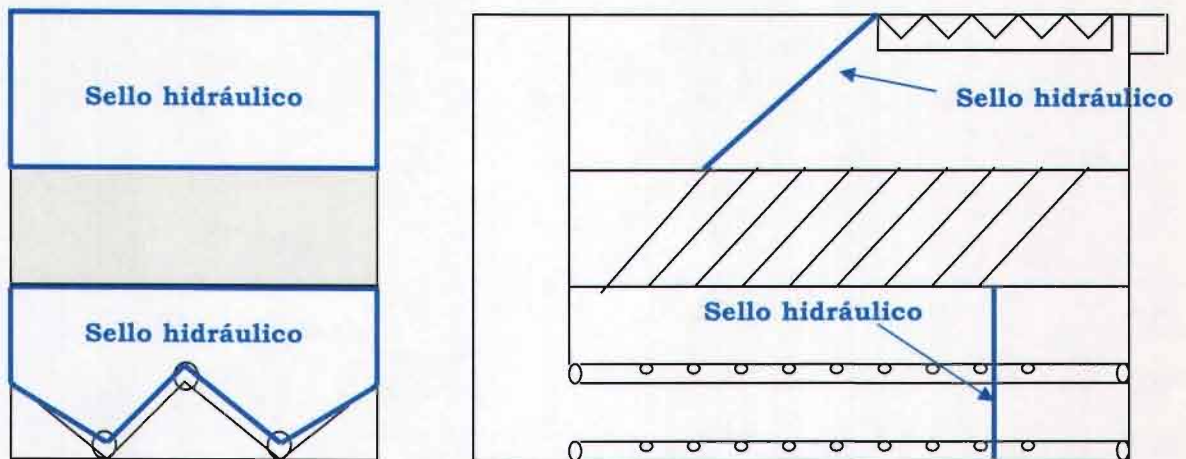
**Lámina 6.9.i.** Secuencia a 25 minutos.



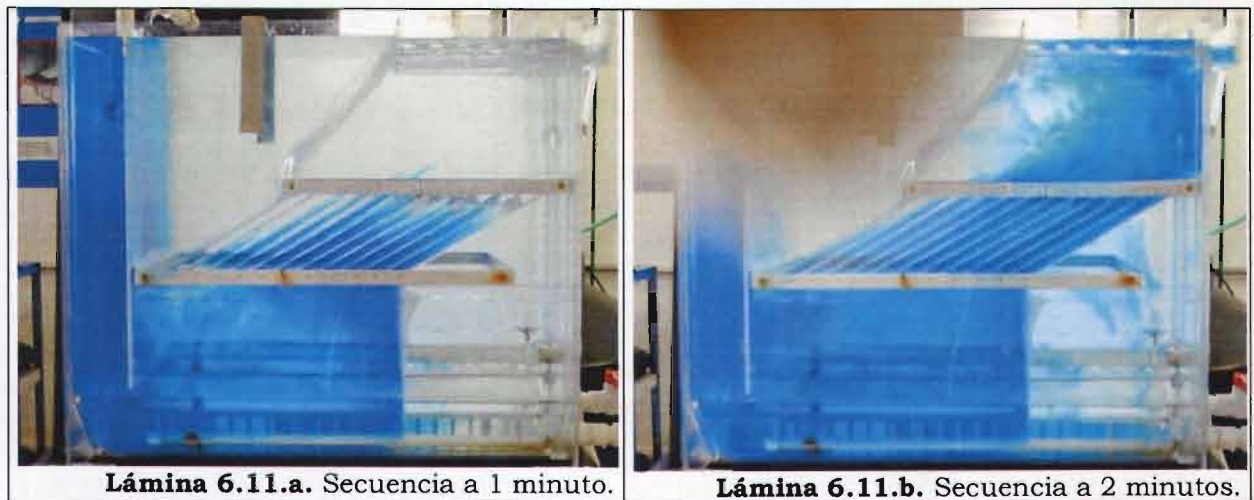
**Lámina 6.9.j.** Secuencia a 30 minutos.

**Lámina 6.9.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 3.

**6.1.2.4. Resultados de las pruebas con azul de metileno del Experimento No. 4.**



**Lámina 6.10.** Esquema de la posición del sello hidráulico para el experimento No. 4.



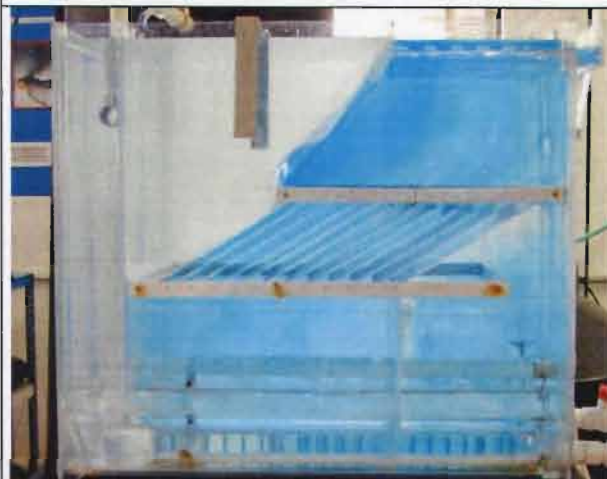
**Lámina 6.11.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 4. (Continuación)



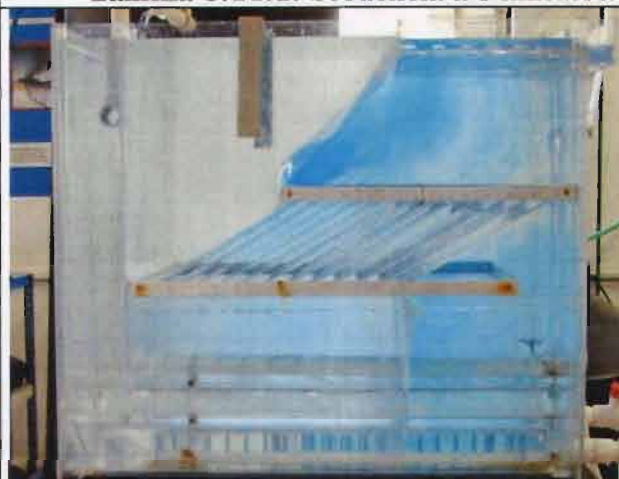
**Lámina 6.11.c.** Secuencia a 4 minutos.



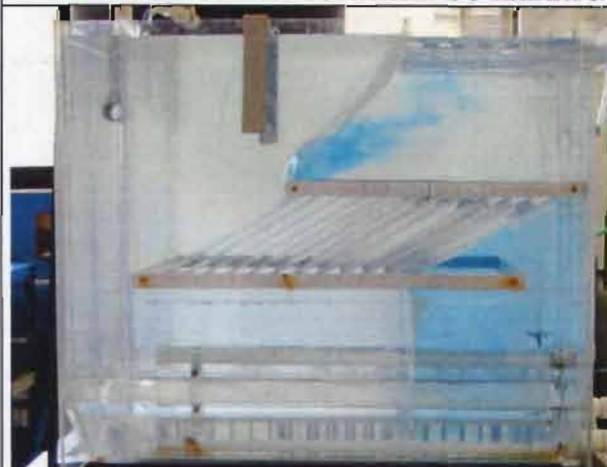
**Lámina 6.11.d.** Secuencia a 6 minutos.



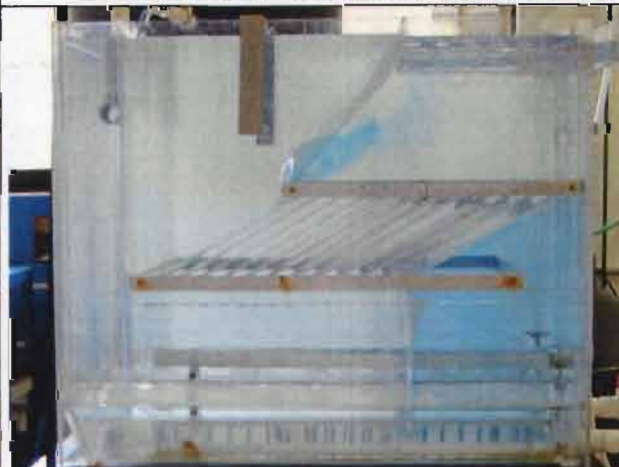
**Lámina 6.11.e.** Secuencia a 8 minutos.



**Lámina 6.11.f.** Secuencia a 10 minutos.



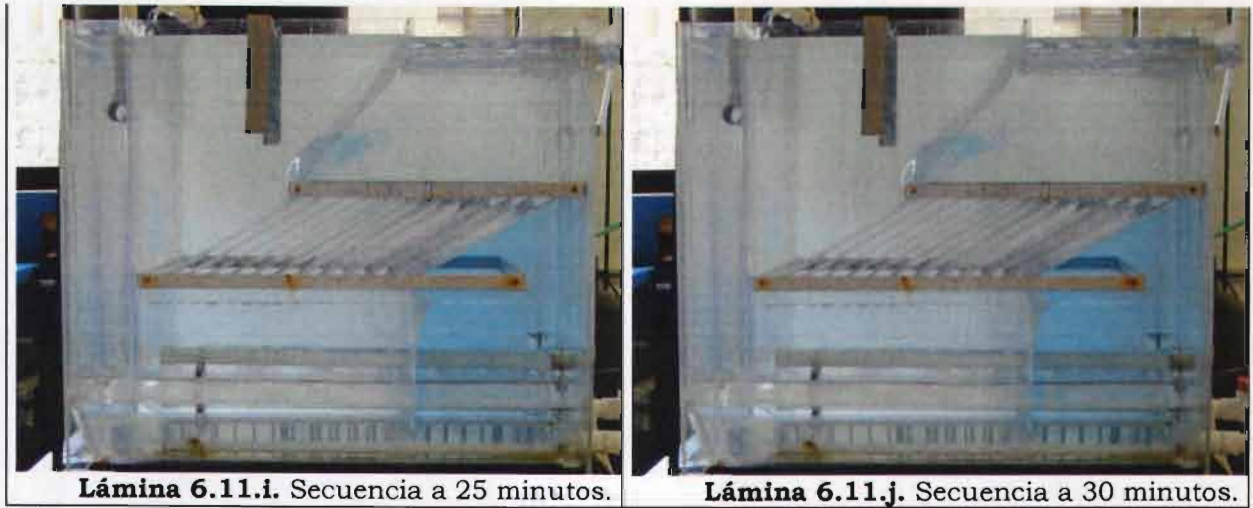
**Lámina 6.11.g.** Secuencia a 15 minutos.



**Lámina 6.11.h.** Secuencia a 20 minutos.

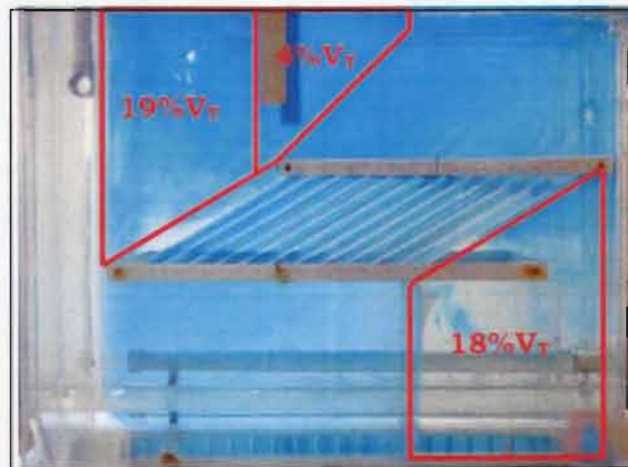
**Lámina 6.11.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 4. (Continuación)





**Lámina 6.11.** Secuencia de inyección de trazador del Experimento No. 4.

Los sedimentadores reales de las plantas de tratamiento de agua son más largos siendo prácticamente insignificante el volumen que origina la zona A y la zona B ( $18\%V_T$  y  $19\%V_T$  de los experimentos 2 y 3 respectivamente). Además, como la distribución de los vertedores no está a todo lo largo de los módulos de placas, se inclinó el sello de mica hacia la canaleta de recolección para eliminar la acumulación de colorante que se presentó arriba de las mamparas (aproximadamente un total de  $23\%V_T$ ) en el experimento No. 1, ver la lámina 6.12.



**Lámina 6.12.** Porcentaje del volumen aislado por los sellos hidráulicos en el sedimentador.

Como se puede observar en la lámina 6.12, al cambiar el volumen del sedimentador cambia el tiempo de residencia de la unidad; por lo tanto, para los experimentos No. 1, 2, 3 y 4, se tiene que (ver tabla 6.3.):

Experimento No.	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Volumen de la unidad V (litros)	Tiempo de residencia $\tau$ (minutos)
1	0.518	357	11.5
2	0.518	293	9.4
3	0.518	225	7.2
4	0.518	211	6.8

**Tabla 6.3.** Tiempos de residencia de la unidad para los experimentos No. 1, 2, 3 y 4.

Como se observó en las láminas 6.5, 6.7, 6.9 y 6.11 de los experimentos No. 1, 2, 3 y 4, en la zona de entrada del sedimentador, en la parte inferior de las mamparas y en la parte superior de las mamparas, para cualquier instante de los registros fotográficos, existe igual concentración de color, es decir, mezcla de flujo. Sólo existe régimen laminar (flujo pistón) entre las placas como se observó en la lámina 6.4.

No existe un diseño adecuado de la zona de entrada de la unidad lo que provoca mezcla del flujo. Como menciona Romero (1995), la forma como se distribuye el flujo por debajo de las placas es muy diferente a la que se supone teóricamente cuando este penetra horizontalmente por el fondo. Dependiendo de la velocidad en él y de la carga superficial, puede quedar trabajando con mucha más carga la zona de entrada que la de salida o viceversa, lo que va a reflejar en la eficiencia de la decantación. Se induce a considerar la necesidad de evitar introducir el agua en los decantadores de placas por el fondo, de forma que se desplace horizontalmente por debajo de las placas. Tal método hace imposible el control de la distribución del flujo y permite que se crean zonas muertas que no trabajan y zonas de alta velocidad que tenga una baja eficiencia. Por lo tanto el diseño de la entrada del flujo a la unidad debe ser distribuido lo más uniformemente posible por debajo de las placas.

El fenómeno de dispersión del colorante que se genera en cada una de las pruebas, también es resultado del diseño de salida del sedimentador. Arboleda (2000) menciona que cuando se construyen vertederos de salida solamente al final del tanque, al estilo del sistema tradicional, la eficiencia del decantador de placas disminuye considerablemente, debido a que no trabaja toda el área cubierta por ellas sino solo la que se aproxima a los vertederos y el resto actúa como zona muerta, por lo que es recomendable construir vertederos a la salida en toda el área superficial del sedimentador.

Por lo tanto, se puede decir que la turbulencia que se genera por los flujos de agua a distintas velocidades genera mezcla del flujo; además, el equilibrio químico dentro del agua se logra cuando la concentración es igual en cada punto, entonces la fuerza motriz generada depende principalmente del gradiente de concentración que se tenga.

Además, como se puede observar en los registros fotográficos, para todos los experimentos se presenta en mayor o menor grado (en la parte superior de las mamparas) el fenómeno de difusión turbulenta que se genera por dos razones: por el arrastre convectivo del flujo y por la diferencia de concentración.

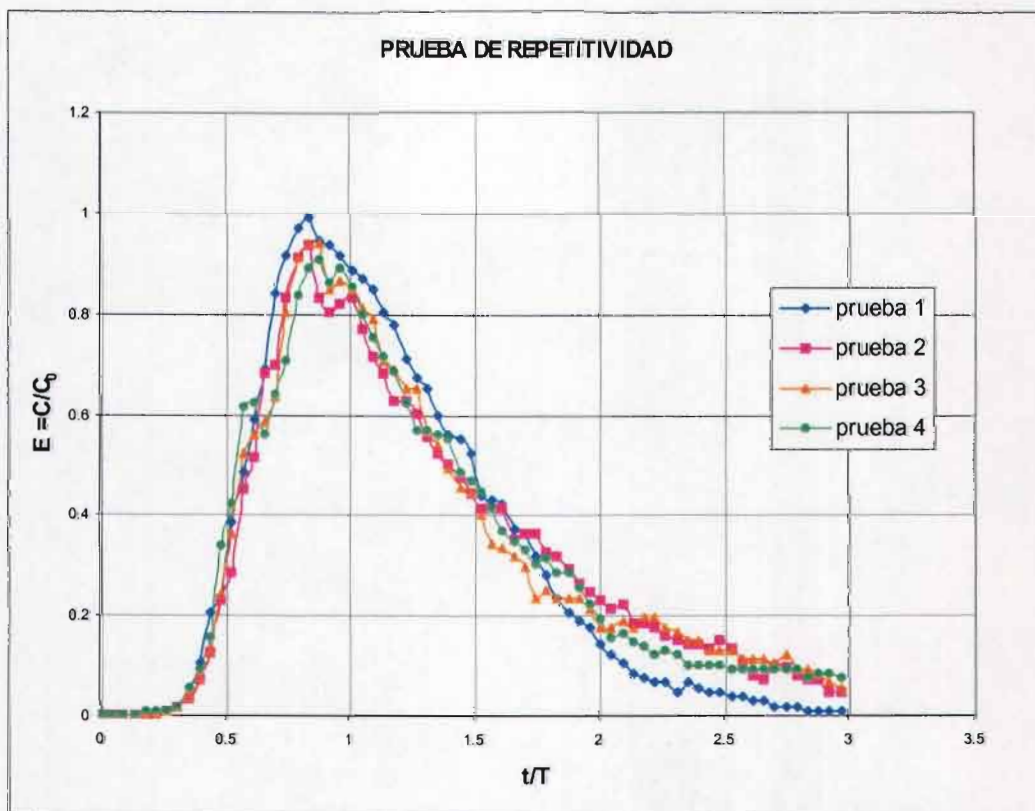
### 6.1.3. Resultados de las pruebas con salmuera

En todos los resultados de las pruebas realizadas con salmuera, la temperatura del agua permaneció alrededor de  $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  entre el inicio y final de la prueba; por lo tanto, no fue necesario hacer una corrección de los sólidos disueltos totales por cambio de temperatura.

Las jeringas de inyección con una capacidad de 90 ml a  $22^{\circ}\text{C}$  de temperatura del agua destilada, requieren una máxima cantidad de cloruro de sodio de 32.35 gr para evitar llegar al nivel de saturación. En las pruebas se varió la concentración de sal inicial de 3 a 19.4 gr de sal, lo que aseguró una disolución de la sal en la inyección de la zona de entrada.

#### 6.1.3.1. Resultados de la prueba de repetitividad

Se realizaron las pruebas de repetitividad bajo las mismas condiciones del experimento No. 1 con una cantidad de trazador agregado de 19.4 gr de sal, es decir, una concentración inicial de sal  $C_0$  de 54.4 mg/l, en la unidad de sedimentación, obteniéndose los resultados en el anexo 2 (ver lámina 6.13).



**Lámina 6.13.** Pruebas de respuesta del trazador para las mismas condiciones de operación.

Estas curvas resultantes del ensayo de trazadores en el mismo reactor deben tener igualdad de resultados, especialmente en lo relacionado al tiempo inicial de presencia

de trazador, valores de concentración máxima y las concentraciones de sal calculada como el área bajo la curva de la ecuación 2.2 (ver tabla 6.4 y 6.5).

Prueba	Tiempo inicial de presencia de trazador (min)	Concentración máxima (mg/l)
1	3	175
2	3.5	175
3	3.5	173
4	4	171

**Tabla 6.4.** Tiempo inicial de presencia de trazador (min) y concentraciones máximas de sal (mg/l) para las pruebas repetitivas.

Prueba	Concentración de sal calculada (mg/l)	Media (min)
1	52.4	13.2
2	55.5	14.7
3	52.6	14.6
4	53.5	14.3

**Tabla 6.5.** Concentraciones de sal (mg/l) calculadas para las pruebas repetitivas.

Por lo tanto, los errores de medición, con respecto a la concentración inicial de sal  $C_0$  (54.4 mg/l) para pruebas repetidas son:

Prueba	Error (%)
1	-4
2	2
3	-3
4	-2

**Tabla 6.6.** Error de medición de sal con respecto a la concentración inicial de trazador  $C_0$  para las pruebas de repetitividad.

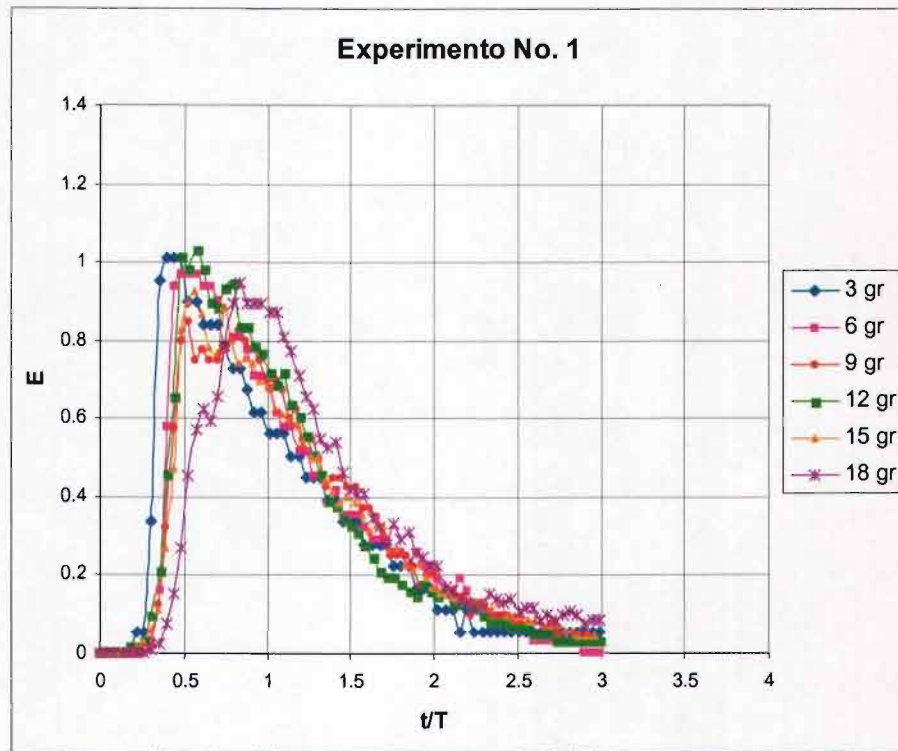
Como se observa en la tabla 6.6, el error de medición es menor al 5%, por lo tanto se puede garantizar que una prueba bajo las mismas condiciones de operación, para una misma cantidad de trazador y mismo gasto, representa una misma respuesta de comportamiento de flujo.

### 6.1.3.2. Resultados de las pruebas a diferentes concentraciones de salmuera

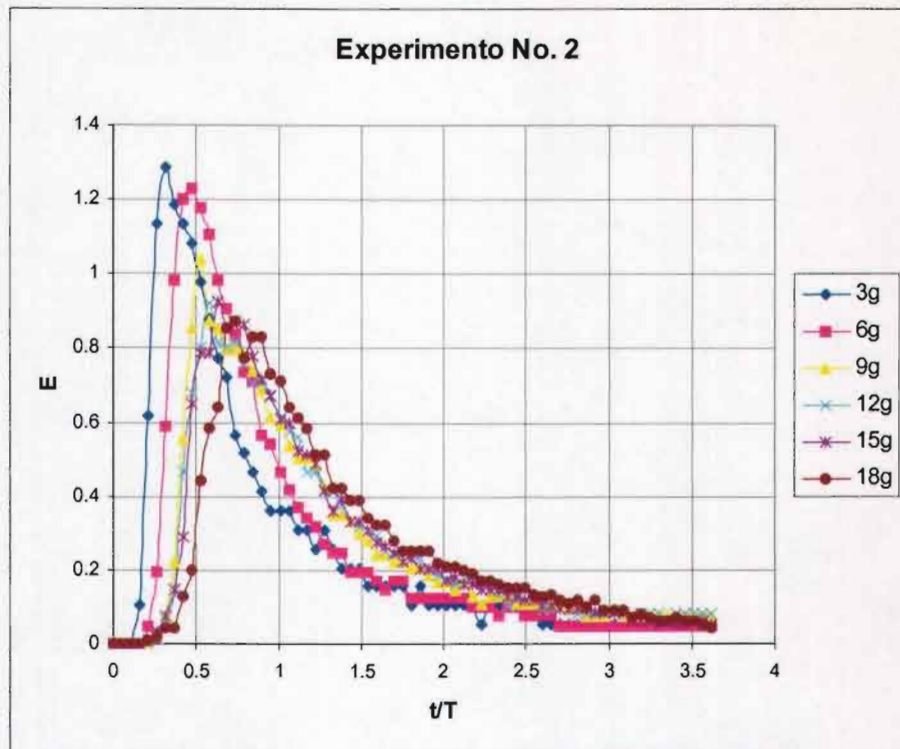
Se realizaron pruebas a diferentes concentraciones de salmuera para observar la forma que toma las curvas de respuesta *DTR* y la interpretación de los modelos.

Los experimentos realizados con el azul de metileno fueron repetidos bajo las mismas condiciones adicionando sal como trazador. Esas curvas de respuesta fueron evaluadas por los modelos para describir los problemas hidrodinámicos del sedimentador.

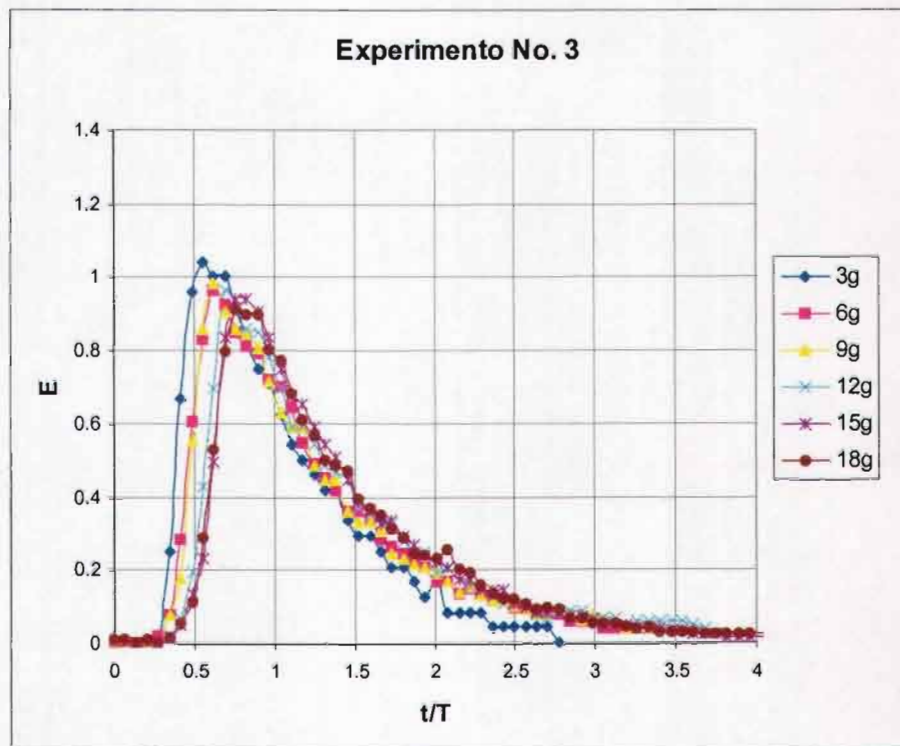
Los resultados de las curvas de respuesta de salmuera para los cuatro experimentos (ver anexo 3), son presentadas en las láminas 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17.



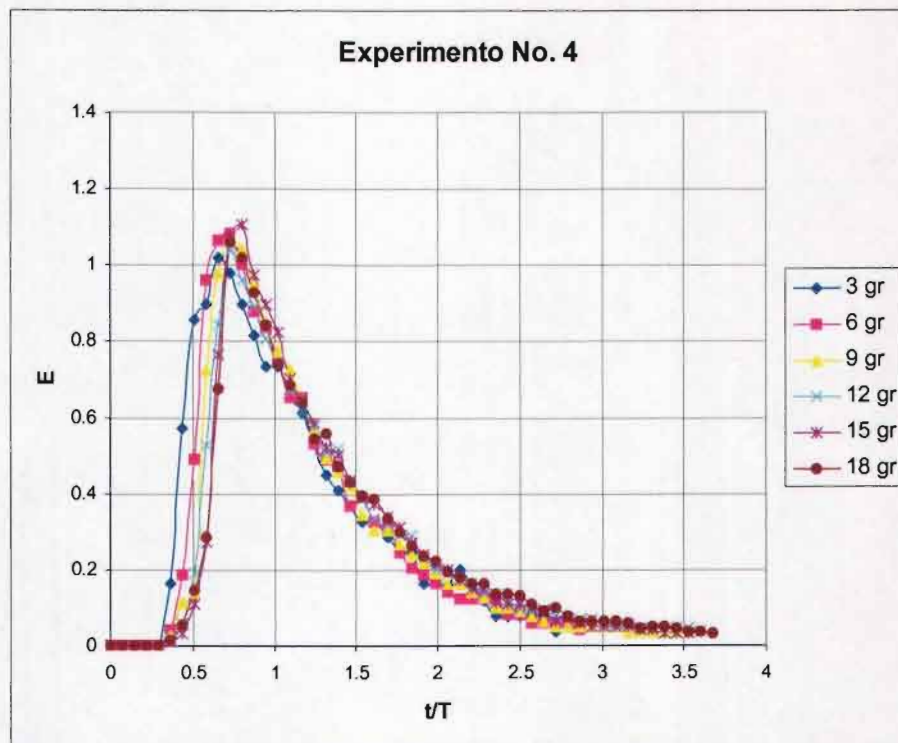
**Lámina 6.14.** Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.1.



**Lámina 6.15.** Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.2.



**Lámina 6.16.** Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.3.



**Lámina 6.17.** Curvas de respuesta para diferentes concentraciones de trazador en el experimento No.4.

Como se observa en las láminas anteriores a medida que se fue cambiando la estructura del sedimentador, las curvas de respuesta para diferentes concentraciones de salmuera tendieron a una misma respuesta. Además, las colas largas que se presentaron al final de todas las curvas, refleja la salida constante de trazador que se ha acumulado en las zonas estancadas.

Por otra parte, se midió la concentración de sal  $C_0$ , calculada como el área bajo las curvas de respuestas del trazador, comparado con la concentración inicial de sal agregada, para obtener el porcentaje de recuperación de sal en todos los experimentos, que en su mayoría superó el 80%, ver tabla 6.7:

Experimento No.	Cantidad de sal agregada (gr)	Concentración de sal agregada (mg/l)	Concentración de sal calculada (mg/l)	Media $\mu$ (min)	Tiempo de retención hidráulico $\tau$ (min)	Varianza $\sigma^2$ (min <sup>2</sup> )	Recuperación de sal (%)
1	3	8.403	8.399	11.595	11.5	43.089	99.95
	6	16.807	15.016	12.332		38.734	89.34
	9	25.210	23.349	13.111		40.388	92.62
	12	33.613	29.627	12.033		37.526	88.14
	15	42.017	41.005	13.205		44.177	97.59
	18	50.420	45.112	14.423		42.844	89.47
2	3	10.239	9.252	8.969	9.4	51.953	90.36
	6	20.478	19.413	9.616		46.204	94.80
	9	30.717	25.703	11.819		53.144	83.68
	12	40.956	35.734	12.203		52.872	87.25
	15	51.195	44.700	12.052		49.454	87.31
	18	61.433	52.886	13.034		48.379	86.09
3	3	13.333	11.134	7.269	7.2	12.685	83.51
	6	26.667	25.247	8.529		19.189	94.68
	9	40.000	36.245	8.452		18.117	90.61
	12	53.333	47.718	9.221		19.543	89.47
	15	66.667	59.902	9.806		23.868	89.85
	18	80.000	62.101	9.736		22.744	77.63
4	3	14.218	12.332	7.239	6.8	10.954	86.74
	6	28.436	24.587	7.608		11.410	86.46
	9	42.654	37.026	8.145		13.882	86.81
	12	56.872	52.200	8.722		17.442	91.79
	15	71.090	60.855	8.704		15.397	85.60
	18	85.308	76.825	9.072		18.904	90.06

**Tabla 6.7.** Concentraciones de sal (mg/l) calculada en los experimentos No. 1, 2, 3 y 4.



## 6.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS

Los modelos de reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos, Wolf y Resnick, de dispersión de Levenspiel y el modelo de análisis de la curva están representados en el anexo 4.

Resumiendo las calibraciones de los modelos, se tienen los siguientes resultados (ver tablas 6.8 y 6.9):

Experimento No.	Cantidad de sal agregada (gr)	MODELO					
		Tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos				Wolf y Resnick	
		Número de tanques en serie N	Fracción de zona muerta (1-M)	Fracción de corto circuito (1-n)	Error	%Pistón	M
1	3	3	23	0	0.020	67	0
	6	3	18	0	0.023	43	0
	9	4	0	0	0.011	65	0
	12	4	15	0	0.016	48	0
	15	4	7	0	0.016	61	0
	18	6	-10	0	0.010	56	0
2	3	3	40	0	0.018	2	16
	6	4	30	0	0.016	13	11
	9	4	10	0	0.016	33	0
	12	4	0	0	0.013	38	0
	15	4	5	0	0.015	37	0
	18	4	-5	0	0.015	42	0
3	3	4	15	0	0.020	55	0
	6	4	0	0	0.015	41	0
	9	5	0	0	0.014	44	0
	12	5	0	0	0.018	57	0
	15	5	0	0	0.019	50	0
	18	5	0	0	0.019	54	0
4	3	5	5	0	0.016	54	0
	6	6	5	0	0.020	51	0
	9	7	0	0	0.017	62	0
	12	6	0	0	0.019	56	0
	15	7	0	0	0.022	50	0
	18	6	0	0	0.022	46	0

**Tabla 6.8.** Resultados de los modelos de reactores en serie y de Wolf-Resnick, aplicados por los experimentos No. 1, 2, 3 y 4 para diferentes concentraciones de sal.

Experimento No.	Cantidad de sal agregada (gr)	MODELOS				
		Levespiel	Análisis de la curva			
		D/ $\mu$ L	$\mu/\tau$	$t_i/\tau$	$t_p/\tau$	$t_{90}/t_{10}$
1	3	0.20	1.0	0.3	0.4	4.6
	6	0.15	1.1	0.3	0.4	4.1
	9	0.11	1.1	0.3	0.5	3.9
	12	0.15	1.0	0.2	0.5	3.9
	15	0.15	1.2	0.2	0.5	4.0
	18	0.12	1.3	0.3	0.7	3.4
2	3	0.68	1.0	0.1	0.3	8.0
	6	0.39	1.0	0.2	0.5	5.6
	9	0.25	1.3	0.2	0.4	5.1
	12	0.23	1.3	0.3	0.5	4.8
	15	0.22	1.3	0.2	0.5	4.6
	18	0.17	1.4	0.2	0.5	4.1
3	3	0.14	1.0	0.2	0.6	3.8
	6	0.16	1.2	0.2	0.5	3.9
	9	0.15	1.2	0.2	0.5	3.8
	12	0.13	1.3	0.2	0.5	3.4
	15	0.15	1.4	0.2	0.6	3.4
	18	0.14	1.3	0.2	0.6	3.4
4	3	0.12	1.1	0.2	0.6	3.6
	6	0.11	1.1	0.2	0.7	3.2
	9	0.12	1.2	0.2	0.6	3.2
	12	0.13	1.3	0.2	0.6	3.3
	15	0.12	1.3	0.2	0.6	3.1
	18	0.13	1.3	0.2	0.6	3.3

**Tabla 6.9.** Resultados de los modelos de dispersión y del análisis de la curva, aplicados en los experimentos No. 1, 2, 3 y 4 para diferentes concentraciones de sal.

### 6.2.1. Modelo para reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos

Analizando los resultados del modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos se observa que los valores de  $N$  (ver tabla 6.8) son menores a 13 para todos los casos, lo que indica que el comportamiento del flujo tiende más a mezcla completa para todos los experimentos.

Como se observa en la tabla 6.8, los errores son menores al 2.3% lo que indica un buen ajuste de los datos experimentales con el modelo.

No existe la presencia de cortocircuito para ninguna de las calibraciones. Sin embargo, en los casos en que el modelo indica la presencia de zonas muertas en donde no hay cortocircuito, no es válido ya que el concepto de zona muerta es contrario al de cortocircuito, por lo tanto si existe zona muerta debe existir cortocircuito o viceversa. En los experimentos 1 y 2 para el caso de 18 gramos de sal agregada, se observa la existencia de zonas muertas negativas, parámetro que carece de sentido físico para este modelo.

**6.2.2. Modelo simplificado de Wolf y Resnick**

La calibración de este modelo representado en el anexo 4, muestra que para seleccionar la línea tangente a la curva experimental en las pruebas con sal, se puede obtener diferentes resultados (ver lámina 6.19 y tabla 6.10):

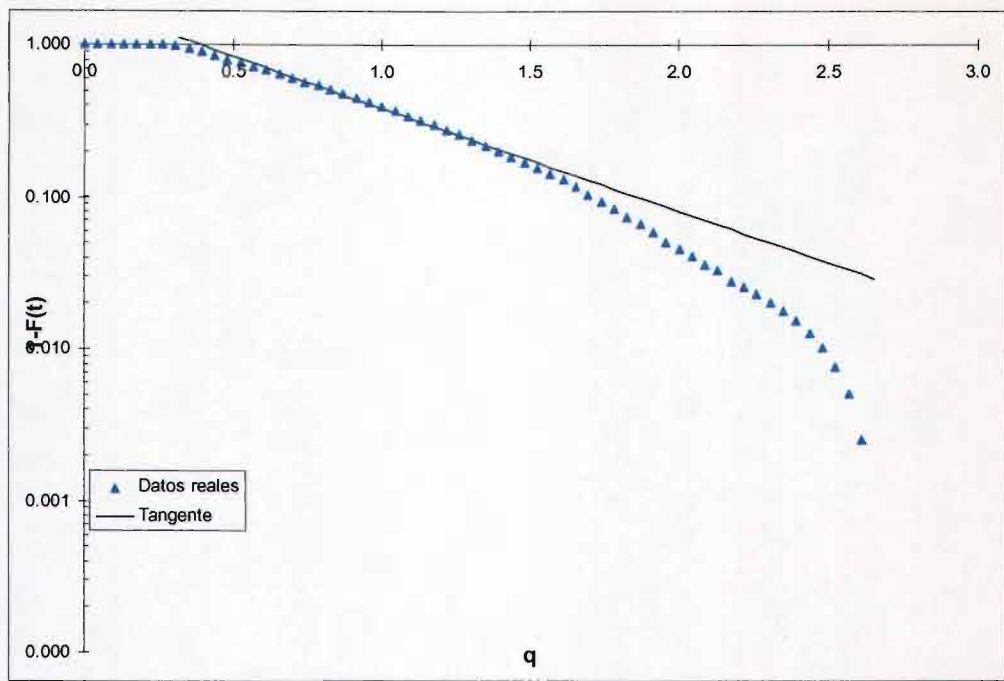
Experimento No.	Cantidad de sal agregada (gr)	Modelo de Wolf y Resnick	
		% Pistón	M
1 (Caso 1)	3	38	0
1 (Caso 2)	3	67	0

**Tabla 6.10.** Resultados del modelo de Wolf y Resnick, aplicado al experimento No. 1 para una cantidad de sal de 3 gr.

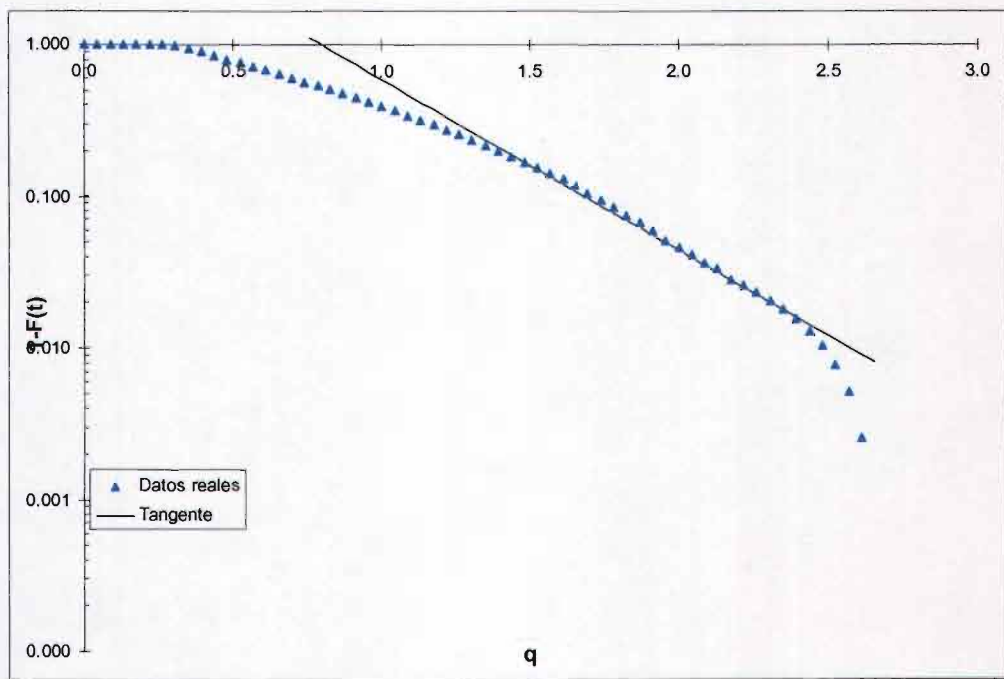
Como se observa en la lámina 6.19, puede existir el caso de dos líneas tangentes a la curva experimental, dando resultados diferentes en la calibración del modelo como se muestra en la tabla 6.10.

Analizando los resultados del modelo de Wolf y Resnick (ver tabla 6.8) se observa que los valores del porcentaje de flujo pistón varían de un 43% a un 67% para el experimento No. 1, que disminuye, para el experimento No. 2, a un porcentaje del 2% al 42% de flujo pistón. En el experimento No. 3, las variaciones de flujo pistón varía de un 41% aun 57% y el experimento No.4, de un 46% hasta un 56%. Esto indica que la unidad trabaja con dos tipos de flujo con tendencia a más mezcla completa para todos los experimentos.

Para la mayoría de los experimentos, no existe zona muerta al cambiar la concentración de sal. Solo en dos casos se observa la existencia de zona muerta (16% y 11% de zona muerta), para la prueba de 3 y 6 gr de sal del experimento No. 2, en donde el comportamiento del flujo tiende más a mezcla completa (sólo 2% y 13% de flujo pistón).



**Caso 1**



**Caso 2**

**Lámina 6.19.** Calibraciones del modelo de Wolf y Resnick del experimento No. 1 al agregar 3 gramos de sal.

### 6.2.3. Modelo de dispersión

El número adimensional  $D/uL$  es mucho mayor a 0.05 para todos los casos (ver tabla 6.9), lo que indica que el fenómeno de dispersión prevalece con respecto al fenómeno de transporte del fluido; es decir, que tiende más a mezcla completa.

Los valores de dispersión variaron de 0.11 a 0.25, pero para el caso del experimento No. 2 para 3 y 6 gramos de sal, el número de dispersión fue de 0.68 y 0.39, lo que indica más preferencia de mezcla completa que en los demás casos, como se puede observar en la lámina 6.15 de las curvas de respuesta *DTR*.

### 6.2.4. Modelo basado en el análisis de la curva

Analizando la tendencia de las curvas de concentración del trazador o curvas de respuesta *DTR* y relacionando sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo, se establece que:

- La relación  $t_i/\tau$  indica que hay preferencia de flujo en mezcla, ya que los valores son menores a uno acercándose más a cero, además del paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito), ya que los valores son menores e iguales a 0.3.
- La relación del tiempo medio calculado con los resultados de la curva de distribución y el tiempo de residencia teórico ( $\mu/\tau$ ) es mayor a uno en todos los experimentos (ver tabla 6.8), lo que comprueba la existencia de zonas en donde el trazador se queda retenido (zona muerta) y que luego va saliendo lentamente, como se observa por la forma alargada al final de la curva de respuesta.
- La relación  $t_p/\tau$  indica que existe predominio de mezcla completa ya que los valores están entre 0 y 1, además de que el valor  $t_i/\tau$  es menor a 0.5.
- Los resultados de las relaciones  $t_{90}/t_{10}$  indican que existen los dos tipos de flujo ya que los valores son mayores a 1, en la unidad de sedimentación para diferentes pruebas de trazadores con sal.

Este ha sido el único modelo que predice este fenómeno de acumulación observado en las pruebas con colorante.

En resumen, el modelo establece que existen los dos tipos de flujo con preferencia de flujo en mezcla, con zonas muertas y cortocircuitos y problemas de acumulación de trazador por la forma alargada al final de la curva de respuesta.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

---

La determinación de la proporción de flujo pistón en sedimentadores tiene una gran importancia, pues mide la fracción del volumen de agua que pasa por el reactor y que ha permanecido durante todo el tiempo de retención sometida al tratamiento deseado. Como describe Pérez (1981), un sedimentador debe tener por lo menos un 60% de flujo pistón y en este experimento se reportó que la unidad trabaja con tendencia de flujo mezclado. Al haber predominio de flujo mezclado, presencia de cortocircuitos y espacios muertos, la eficiencia del sedimentador es muy baja.

En las pruebas realizadas con azul de metileno se observa el comportamiento del flujo en la unidad de sedimentación, al identificarse las preferencias de flujo, mezclas, recirculaciones y líneas de corriente en flujo laminar, permitiendo establecer cualitativamente las posibles causas que afectan el funcionamiento hidrodinámico del sedimentador. Sin embargo, no es una herramienta de fácil aplicación para el caso de unidades de plantas de tratamiento reales ya que no es posible observar el colorante dentro de las unidades.

Se observó, en todos los registros fotográficos, preferencia de flujo mezclado en la unidad de sedimentación a excepción del flujo entre las placas. El colorante que se introdujo en la unidad interactúa con regiones de estancamiento, ya sea por turbulencias generadas o por fenómenos de gradientes de concentración, provocando que esa zona de estancamiento se convierta en una zona de acumulación de trazador.

No existe un diseño adecuado de la zona de entrada de la unidad lo que provoca mezcla del flujo y problemas de zonas muertas. El problema de mezcla de flujo es consecuencia de la mala distribución de flujo debajo de las placas. El problema de acumulación de trazador de colorante es consecuencia de una inadecuada distribución de los vertedores en toda el área superficial del sedimentador, lo que genera preferencias de flujo.

La uniformidad con la cual las masas de agua ascienden por entre las placas, depende tanto del sistema de salida como del de entrada. Por eso debe ponerse gran cuidado en el proyecto en esta parte del sedimentador de alta tasa.

En las pruebas realizadas con sal, se observaron en las curvas de distribución de los tiempos de residencia *DTR* (láminas 6.14. a 6.17.), preferencias de flujo mezclado con colas largas al final de la curva que indican la existencia de zonas donde se acumula la salmuera en el volumen estancado, que sale de la unidad de sedimentación en un tiempo mayor al tiempo de retención hidráulico. Al sellar hidráulicamente las zonas de acumulación de trazador, las curvas de respuesta *DTR* tendieron a un mismo patrón o respuesta (lámina 6.17). La forma de la curva de los resultados de las pruebas con sal da una indicación del comportamiento del flujo en la unidad de tratamiento.

Para establecer si en una unidad de tratamiento está presente zonas de acumulación de trazador, se deben realizar pruebas de estímulo-respuesta para diferentes concentraciones de salmuera. Si las respuestas de las curvas de distribución de tiempos de residencia *DTR* son las mismas, el fenómeno de acumulación de trazador es insignificante con respecto a todo el volumen de la unidad.

Los modelos evaluados indicaron que el comportamiento del flujo en la unidad trabaja con los dos tipos de flujo con tendencia a más mezcla completa. Para el caso del modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos, los valores de  $N$  son menores a 13; para el modelo de Wolf y Resnick, el porcentaje de flujo pistón varió de un 2% a un 67%; para el modelo de dispersión, los valores de  $D/uL$  son menores a 0.05; y para el modelo basado en la tendencia de la curva, los valores del Índice de Morril  $t_{90}/t_{10}$  son mayores a 1, además de que los valores  $t_i/\tau < 1$ ,  $0 < t_p/\tau < 1$  y  $t_i/\tau < 0.5$ .

El modelo de tanques en serie con zonas muertas tiene un buen ajuste con los datos experimentales, sin embargo sus resultados carecen de sentido físico ya que indica la presencia de zonas muertas en donde no hay cortocircuito, concepto que no es válido ya que las zonas muertas se generan por los cortocircuitos presentes en la unidad.

El modelo de Wolf y Resnick, no indica la existencia de zonas muertas para la mayoría de los experimentos ni los problemas de cortocircuitos y recirculaciones, problemas que son observados con frecuencia en las unidades de potabilización. Solamente en el experimento No.2 (ver tabla 6.7.), para 3 y 6 gramos, se obtuvieron valores de zonas muertas (16% y 11%) cuando el flujo tuvo un comportamiento preponderante de mezcla (sólo con 2 y 13% de flujo pistón). En la calibración de este modelo se pueden obtener diferentes líneas tangentes a la curva, dando resultados diferentes en un mismo experimento.

Con lo observado en el modelo de Wolf y Resnick, cuanto mayor es la tendencia de flujo mezclado en la unidad de sedimentación se obtiene más fracción de volumen muerto, como menciona Morgan *et al*, (1997 y 1999).

El modelo de dispersión indica, en todos los casos, que el comportamiento del flujo tiende a mezcla completa, encontrándose mayores tendencias de mezcla o mayores valores de dispersión en el experimento No. 2, para el caso de 3 y 6 gr de sal agregada, mismos que fueron detectados, por el modelo de Wolf y Resnick.

El modelo basado en la tendencia de la curva es el que da más información de las condiciones del flujo, estableciendo problemas de acumulación de trazador en la zona muerta cuando los valores de  $\mu/\tau$  son mayores a 1 y cortocircuitos ya que todos los valores de  $t_i/\tau$  son menores e iguales a 0.3. La relación  $\mu/\tau$  es un parámetro que refleja el fenómeno de difusión cuando éste es mayor a uno, ya que la cola larga que se presenta en la curva de respuesta, hace que la media de los datos se desplace a la derecha. Por lo tanto se considera que éste parámetro es un indicador de la acumulación del trazador y por lo tanto, la salida lenta de este que se manifiesta en la forma alargada de la curva después de que se presenta el pico  $t_p$ .

El modelo basado en la tendencia de la curva es un método rápido de aplicar, que se basa en las características más importantes de la curva y sus resultados simples y fiables, representan una ventaja cuando el objetivo es determinar la tendencia del comportamiento del flujo.

En resumen, los modelos estudiados describieron el comportamiento del flujo en la unidad de sedimentación, con tendencia a más mezcla completa. El modelo de dispersión, el modelo de tanques en serie con zona muertas y cortocircuitos y el modelo de Wolf y Resnick no establecieron de manera confiable los problemas hidráulicos presentados en la unidad de sedimentación. El modelo basado en la tendencia de la curva es el que da mayor información ya que describió de mejor manera los problemas hidráulicos en la unidad de sedimentación como zonas muertas, cortocircuitos y acumulación de trazador, que son parámetros importantes en la eficiencia de tratamiento en la unidad de sedimentación; por lo tanto, se recomienda utilizar este modelo no sólo para evaluar el comportamiento hidráulico a un prototipo de sedimentador de alta tasa sino a unidades a escala real. Sin embargo, se debe continuar con el estudio de modelos simples y confiables que puedan representar el comportamiento hidrodinámico de una unidad de tratamiento para mejorar su funcionamiento y la eficiencia en plantas de tratamiento existentes.



## BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association (AWWA). May 1982. *Proceedings*. Seminar on design of pilot plant studies. Miami Beach, Florida, USA.
- American Water Works Association (AWWA). 1990. *Water Treatment Plant Design*. McGraw-Hill, second edition, USA.
- American Water Works Association (AWWA). 1997. *Water Treatment Plant Design*. McGraw-Hill, third edition, USA.
- American Water Works Association (AWWA). Letterman, R.D. 1999. *Water Quality and Treatment*. A handbook of community water supplies. McGraw-Hill, fifth edition edition, USA.
- Andía Y. Enero, 1992. *Tomo III: Tecnología importada*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual VI: Operación. CEPIS. 1-4 pp.
- Arboleda, Jorge. 1972. *Métodos de tratamiento de agua*. CEPIS, OPS. Memorias del simposio realizado en Asunción, Paraguay.
- Arboleda, Jorge. Junio 1974. *Métodos de evaluación de procesos de plantas de tratamiento de agua*. Manual del curso: Conceptos modernos sobre diseño y operación de plantas de tratamiento de agua en Monterrey, México, del 4-15 de noviembre de 1974. CEPIS. Lima, Perú. 232-248 pp.
- Arboleda, Jorge. 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. McGraw Hill. Colombia. 793 pp.
- Arenas Gomez, Albino. 1986. *Análisis dimensional*. Selecciones Científicas. Madrid, España.
- Aznar Carrasco, A. 1997. *Técnica de aguas*. Editorial Alción S.A., segunda edición. España. 185-190 pp.
- Cánepa de Vargas, L. Septiembre, 1993. *Tomo X: Caso práctico*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual IV: Evaluación. CEPIS. 18-42 pp.
- Clark, Mark M. 1996. *Transport Modeling for Enviromental Engineers and Scientists*. Wiley-Interscience publication. John Wiley & Sons.
- Comisión Nacional del Agua, CNA. 2001. Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento al 2000.
- Dean, John. 1992. *Lange's handbook of chemistry*. Graw-Hill. USA.

- Desjardins, R. 1997. *Le traitement des eaux*. Editions de l'École Polytechnique de Montréal. 2<sup>o</sup> édition. Canada.
- Echávez Aldape, Gabriel. 1996. *Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. UNAM. Asociación Mexicana de Hidráulica. México.
- Fair, G:M. Y Geyer J.C. 1996. *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales 2*. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales. Limusa. México.
- Fogler, H. Scott. 1992. *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Prentice hall international series, second edition. USA.
- French, Richard H. 1988. *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill, México.
- Fu Yen, T. 1999. *Environmental chemistry. Chemical principles for environmental processes*. Prentice-Hall. USA. 1389-1391 pp.
- Hudson, H.E. 1981. *Water clarification processes practical design and evaluation*. Van Nostrand Reinhold. USA.
- Kamamura, S. 1981. *Hydraulic scale-model simulation of the sedimentation process*. AWWA; vol.3 , no.5 ; july.
- King, Horace Williams. 1995. *Manual de Hidráulica*. Limusa. México.
- Johnson, P., Dawson, M., Barker, J. 1998. *Determining the optimal theoretical time distribution for chlorine contact tanks*. Aqua; vol. 47, no. 5.
- Levenspiel, Octave. 1997. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Editorial Reverté S.A., segunda edición, México.
- Martín Domínguez, A., Avilés Flores, M., Flores Ordeñana, L.M., González Herrera, A., Montellanos Palacios, L., Piña Soberanis, M., Rivera Huerta, M. de L., Sandoval Yoal, L., y Tirado Montiel, M.de L. 1998. *Evaluación de Plantas Potabilizadoras en la Frontera Norte*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Proyecto contratado por la Comisión Nacional del Agua CNA. Jiutepec, Morelos, México.
- Martín Domínguez, A., Avilés Flores, M., Flores Ordeñana, L.M., González Herrera, A., Montellanos Palacios, L., Piña Soberanis, M., Rivera Huerta, M. de L., Sandoval Yoal, L., y Tirado Montiel, M.de L. 1998. *Manual de Evaluación de Plantas Potabilizadoras*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Proyecto contratado por la Comisión Nacional del Agua CNA. Jiutepec, Morelos, México.
- Martín A., Flores L.M., Herrera A., Sandoval L., Sokolova E. y Avilés M. 1998. *Utilización de trazadores para analizar el comportamiento hidráulico en procesos de potabilización*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.

- Martín Domínguez, A., Tzatchkov, Veliycchko G. y Mercado Escalante, José R. 1999. *Modelación del flujo en unidades de tratamiento de agua potable*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.
- Maza Alvarez, J.A. y García Flores, M. Mayo 1994. *Hidrodinámica*. Bases para hidráulica fluvial. Series del Instituto de Ingeniería, II UNAM No. D-20. UNAM. México.
- Mendenhall W., Wackerly D. y Scheaffer R. 1994. *Estadística matemática con aplicaciones*. Editorial Iberoamericana. México. 772 pp.
- Montgomery, J.M. 1985. *Water treatment. Principles and design*. John Wiley & Sons. USA. 143-603 pp.
- Morgan J., Jiménez B. y Noyola A. Mar 1999. *Alternative index for interpretation of RTD curves*. Environmental Engineering. Vol 125, No. 3. 290-294 pp.
- Morgan J., Jiménez B. y Noyola A. 1997. *Tracer studies in a laboratory and pilot scale UASB reactor*. Environmental Technology. Vol 18. 817-825 pp.
- Ogata, Katsuhiko. 1993. *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall. Segunda edición. 1020 pp.
- Pérez, J. Octubre, 1977. *Eficiencia hidráulica de las unidades de tratamiento de agua*. Manual del curso sobre métodos modernos en el diseño de plantas de tratamiento. La Paz, Universidad Mayor de San Andrés. CEPIS. 64 pp.
- Pérez, J. Diciembre, 1977. *Factores que afectan el tiempo de retención*. Manual del curso sobre tecnología de tratamiento de agua en países en desarrollo. Lima, CEPIS. 72 pp.
- Pérez, J. Abril, 1981. *Caracterización de flujos y análisis de periodos de retención*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Manual de instrucción. CEPIS. Ciclo: Ciencias básicas de tratamiento de agua. Módulo: Hidráulica aplicada a plantas de tratamiento de agua. Submódulo: Caracterización de flujos y análisis de periodos de retención. 88 pp.
- Pérez Carrión, J., Di Bernardo, L. y Cánepa de Vargas, L. Mayo, 1992. *Tomo II: Sedimentación*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual III: Teoría. 51-90 pp.
- Pérez Carrión, J., Rodríguez, V. y Cánepa de Vargas, L. Mayo, 1992. *Guías para las prácticas de evaluación*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual IV: Evaluación. CEPIS. 12-30 pp.

- Pérez Carrión, J. Mayo, 1992. *Tomo IX: Problemas en plantas de tratamiento de agua*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: tratamiento. Serie: filtración rápida. Manual IV: Evaluación. . 1-38 pp.
- Pérez Carrión, J. Julio, 1992. *Tomo III: Procesos – tecnología convencional*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: tratamiento. Serie: filtración rápida. Manual IV: Evaluación. 29-117 pp.
- Pérez Carrión, J. y Galviz, G. Julio, 1992. *Tomo II: Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual IV: Evaluación. 1-64 pp.
- Probstein, Ronald F. 1989. *Physicochemical Hydrodynamics*. Ed. Butterworths, USA. 353 pp.
- Reynolds, Tom D. 1982. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Ed. PWS Publishing Company. Boston, USA.
- Richter, C. y Cánepa de Vargas, L. Mayo, 1992. *Tomo II: Criterios de diseño para floculadores y decantadores*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: tratamiento. Serie: filtración rápida. Manual V: Criterios de diseño. 61-96 pp.
- Romero Rojas, Jairo A. 1995. *Acuipurificación. Diseño de sistemas de purificación de aguas*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá, Colombia. 308 pp.
- Schulz C.R. y Okún D.A. 1990. *Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo*. Limusa, primera edición. México. 189-198 pp.
- Smethurst, G. 1988. *Basic water treatment for application word-wide*. Tomas Telford, second edition. London, England.
- Smith, C., y Corripio A. 1991. *Control automático de procesos*. Limusa, México. 717 pp.
- Sotelo Avila, Gilberto. 1982. *Hidráulica General - Fundamentos*. Limusa, México
- Vargas Jorge, O. Febrero, 1992. *Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano*. CEPIS. Ciclo: tratamiento. Serie: filtración rápida. Manual VI: Operación. Tomo II: Plantas de tecnología convencional. 62-82 pp.
- Vargas Jorge, O. y Pérez Carrión, J. Febrero, 1992. *Tomo II: Plantas de tecnología convencional*. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. CEPIS. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración rápida. Manual VI: Operación. 62-80 pp.
- Vergara, Miguel A. 1993. *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Alfaomega, México.

- Weber, W.J. 1972. Physicochemical processes for water quality control. John Wiley & sons. USA.
- Zojer, H. Mayo-agosto 1988. *Técnica de trazadores*. Ingeniería hidráulica en México. Vol III. Núm 2. SARH, IMTA. México.
- Zvirin Y. y Shinnar R. 1976 A comparison of lumped-parameter and diffusional models describing the effects of the outlet boundary conditions on the mixing in flow systems. Vol. 10. 765-779 pp.

# ANEXOS

## Anexo 1. Calibración del rotámetro.

## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO

Q rotam (l/m)	Tiempo (min)	Tiempo prom (min)	Vol. Patrón (l)	Q medido (l/s)	Q prom (l/s)	Difer. Gasto (l/s)	Error %	Error prom %
8	11.397	11.378	98	0.143	0.144	-0.143	-6.97	-7.12
	11.353		98	0.144		-0.144	-7.33	
	11.384		98	0.143		-0.143	-7.07	
12	7.673	7.674	98	0.213	0.213	-0.213	-6.05	-6.03
	7.673		98	0.213		-0.213	-6.04	
	7.676		98	0.213		-0.213	-6.00	
16	5.942	5.949	98	0.275	0.275	-0.275	-2.99	-2.88
	5.952		98	0.274		-0.274	-2.82	
	5.953		98	0.274		-0.274	-2.82	
20	4.868	4.893	98	0.336	0.334	-0.336	-0.66	-0.33
	4.884		98	0.334		-0.334	-0.32	
	4.900		98	0.333		-0.333	0.00	
	4.922		98	0.332		-0.332	0.44	
24	4.112	4.115	98	0.397	0.397	-0.397	0.69	0.78
	4.114		98	0.397		-0.397	0.76	
	4.119		98	0.397		-0.397	0.88	
28	3.571	3.580	100	0.467	0.466	-0.467	0.00	0.25
	3.578		100	0.466		-0.466	0.19	
	3.591		100	0.464		-0.464	0.55	
32	3.218	3.219	100	0.518	0.518	-0.518	2.98	3.00
	3.216		100	0.518		-0.518	2.90	
	3.222		100	0.517		-0.517	3.11	

## **Anexo 2.** Pruebas de repetitividad.



**RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE REPETITIVIDAD**

Tiempo (min)	SDT (mg/l)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
0	123	123	124	123
0.5	123	123	124	123
1	123	123	124	123
1.5	123	123	124	123
2	123	123	124	123
2.5	123	123	124	123
3	124	123	124	123
3.5	124	124	125	123
4	126	125	126	125
4.5	129	127	128	127
5	134	130	131	131
5.5	136	136	137	141
6	144	139	143	145
6.5	149	148	151	155
7	154	151	153	156
7.5	160	161	155	152
8	168	162	157	157
8.5	172	169	166	160
9	174	173	172	167
9.5	175	175	173	170
10	173	169	173	171
10.5	172	168	169	169
11	172	169	170	170
11.5	170	169	169	168
12	169	166	167	165
12.5	168	163	166	163
13	166	161	161	161
13.5	164	158	160	159
14	161	158	158	156
14.5	159	156	158	153
15	158	154	154	153
15.5	155	152	152	152
16	153	151	150	152
16.5	152	149	148	148
17	151	147	147	147
17.5	147	146	145	147
18	146	146	142	145
18.5	146	146	142	142
19	143	143	141	141
19.5	143	143	140	140
20	140	143	136	139
20.5	138	141	137	139
21	136	141	136	138
21.5	134	139	136	138
22	133	138	136	136
22.5	133	137	135	134
23	131	136	133	133
23.5	130	135	133	131
24	129	135	134	131
24.5	128	133	133	130
25	127	133	134	130
25.5	127	133	134	129
26	127	132	133	129
26.5	126	131	133	129
27	127	131	132	128
27.5	126	131	132	128
28	126	130	131	128
28.5	126	131	131	128
29	125	130	131	127
29.5	125	129	130	127
30	125	127	130	127
30.5	125	127	130	127
31	124	127	129	127
31.5	124	127	130	127
32	124	127	129	127
32.5	124	127	129	126
33	124	127	128	127
33.5	124	125	127	127
34	124	125	127	126

**Anexo 3.** Resultados experimentales de las pruebas con sal.

**EXPERIMENTO No. 1**

Tiempo (min)	Sólidos Disueltos Totales (mg/l)					
	Para 3 gr	Para 6 gr	Para 9 gr	Para 12 gr	Para 15 gr	Para 18 gr
0.0	116	115	169	115	166	114
0.5	116	115	169	115	166	114
1.0	116	115	169	115	166	114
1.5	116	115	169	115	166	114
2.0	116	115	169	116	166	114
2.5	116	115	169	116	167	114
3.0	116	115	169	116	167	114
3.5	119	115	170	118	169	115
4.0	124	117	172	122	171	115
4.5	124	123	177	129	178	118
5.0	124	129	183	135	186	121
5.5	124	129	188	146	201	126
6.0	123	129	190	145	204	135
6.5	123	129	187	146	205	140
7.0	123	129	188	145	203	143
7.5	123	129	187	142	199	141
8.0	123	128	187	142	199	144
8.5	123	126	188	143	203	150
9.0	122	127	188	144	200	155
9.5	122	127	189	140	197	157
10.0	122	126	188	140	198	155
10.5	121	125	188	139	197	155
11.0	121	125	187	138	196	155
11.5	121	125	186	137	195	154
12.0	121	124	186	136	193	154
12.5	121	123	185	137	192	151
13.0	120	123	184	134	191	149
13.5	120	123	184	133	191	147
14.0	120	123	182	132	189	144
14.5	120	122	182	130	187	143
15.0	120	122	181	129	187	139
15.5	119	121	179	127	185	138
16.0	119	121	180	126	184	139
16.5	119	120	180	125	182	135
17.0	119	120	179	125	183	133
17.5	119	120	179	124	182	133
18.0	118	120	178	123	181	133
18.5	118	119	178	123	179	130
19.0	118	119	178	122	180	129
19.5	118	119	176	121	180	127
20.0	118	119	175	121	178	129
20.5	118	119	175	121	178	127
21.0	118	118	175	120	176	128
21.5	117	119	175	120	175	126
22.0	117	118	173	121	176	125
22.5	117	118	174	120	175	124
23.0	117	118	174	120	173	124
23.5	117	117	173	120	173	122
24.0	117	117	173	119	173	122
24.5	116	118	173	119	172	121
25.0	117	117	173	119	172	120
25.5	116	117	172	119	172	120
26.0	116	117	172	118	172	120
26.5	116	116	172	118	172	121
27.0	116	116	172	118	171	121
27.5	116	116	172	118	172	120
28.0	116	116	172	117	170	121
28.5	116	116	171	117	170	119
29.0	116	116	171	117	170	120
29.5	116	115	171	117	170	120
30.0	116	115	170	117	170	118
30.5	116	115	170	117	169	119
31.0	116	115	171	116	169	118
31.5	116	115	170	116	169	119
32.0	116	115	170	116	169	119
32.5	116	115	170	116	169	119
33.0	116	115	170	116	168	118
33.5	116	115	170	116	168	118
34.0	116	115	170	116	168	118

**EXPERIMENTO No. 2**

Tiempo (min)	Sólidos Disueltos Totales (mg/l)					
	Para 3 gr	Para 6 gr	Para 9 gr	Para 12 gr	Para 15 gr	Para 18 gr
0.0	192	193	193	194	195	195
0.5	192	193	193	194	195	195
1.0	192	193	193	194	195	195
1.5	193	193	193	194	195	195
2.0	197	194	193	194	195	196
2.5	202	196	194	194	196	196
3.0	204	204	195	196	198	197
3.5	203	212	199	198	201	197
4.0	202	217	208	211	208	202
4.5	202	217	216	219	224	206
5.0	201	216	221	223	231	219
5.5	200	215	216	227	231	227
6.0	199	212	216	223	237	230
6.5	198	211	214	223	234	242
7.0	197	209	214	223	235	243
7.5	196	207	214	221	234	237
8.0	196	207	213	220	230	240
8.5	196	204	211	220	227	240
9.0	195	203	209	218	225	235
9.5	195	202	209	216	222	234
10.0	195	201	207	215	222	230
10.5	195	200	206	214	219	228
11.0	195	199	206	211	218	227
11.5	194	199	206	211	217	223
12.0	195	198	204	209	214	223
12.5	194	197	202	209	211	218
13.0	194	197	202	207	213	218
13.5	194	196	202	206	210	216
14.0	194	196	201	205	210	216
14.5	193	196	200	205	209	214
15.0	193	196	199	204	207	213
15.5	193	196	199	203	207	213
16.0	193	196	199	202	206	210
16.5	193	196	199	203	205	209
17.0	193	195	198	202	205	209
17.5	193	195	198	202	204	209
18.0	193	195	198	201	204	209
18.5	193	195	197	200	204	207
19.0	193	195	197	200	202	206
19.5	193	195	197	199	203	206
20.0	193	195	197	200	202	206
20.5	193	195	196	200	202	206
21.0	192	195	196	199	201	204
21.5	193	195	196	199	201	204
22.0	193	194	196	198	201	204
22.5	193	195	196	197	200	203
23.0	193	195	196	198	200	203
23.5	193	194	196	199	200	203
24.0	193	194	196	198	200	202
24.5	192	194	196	197	199	202
25.0	192	194	196	197	199	202
25.5	192	194	196	197	199	201
26.0	192	194	196	197	199	201
26.5	192	194	196	196	199	201
27.0	192	194	195	196	199	200
27.5	192	194	195	196	198	201
28.0	192	194	195	196	198	200
28.5	192	194	196	196	198	200
29.0	192	194	195	196	198	200
29.5	192	194	195	196	197	199
30.0	192	194	195	196	197	199
30.5	192	194	195	196	197	199
31.0	192	194	195	196	197	198
31.5	192	194	195	196	197	198
32.0	192	194	195	196	197	199
32.5	192	194	195	196	197	198
33.0	192	194	195	196	197	198
33.5	192	194	195	196	197	198
34.0	192	194	195	196	197	197

**EXPERIMENTO No. 3**

Tiempo (min)	Sólidos Disueltos Totales (mg/l)					
	Para 3 gr	Para 6 gr	Para 9 gr	Para 12 gr	Para 15 gr	Para 18 gr
0.0	184	183	190	189	185	186
0.5	184	183	190	189	185	186
1.0	184	183	190	189	185	186
1.5	184	183	190	189	185	186
2.0	184	183	190	189	185	186
2.5	187	185	193	190	186	187
3.0	192	190	197	192	188	189
3.5	196	198	211	198	194	193
4.0	198	204	223	210	199	205
4.5	196	208	228	224	216	221
5.0	196	207	225	238	237	238
5.5	195	205	223	235	243	246
6.0	194	204	222	232	243	246
6.5	193	203	221	232	241	246
7.0	193	201	218	228	237	239
7.5	192	201	214	224	231	237
8.0	191	199	213	219	227	231
8.5	190	197	213	219	225	226
9.0	190	196	209	216	221	223
9.5	189	195	207	213	219	219
10.0	189	194	207	212	217	218
10.5	188	192	204	211	213	217
11.0	188	192	203	207	209	212
11.5	188	192	203	206	208	210
12.0	187	190	202	205	205	209
12.5	187	190	199	205	206	206
13.0	187	189	199	203	203	205
13.5	186	189	198	201	202	202
14.0	186	188	197	201	200	201
14.5	186	187	197	198	199	201
15.0	185	187	196	199	198	202
15.5	185	186	195	197	196	199
16.0	185	187	196	196	196	196
16.5	185	186	195	196	194	196
17.0	185	186	194	195	194	195
17.5	185	186	194	194	194	194
18.0	185	185	194	194	192	194
18.5	185	185	193	194	191	193
19.0	185	185	193	193	190	192
19.5	185	185	193	192	190	192
20.0	184	185	193	192	190	192
20.5	--	184	192	192	190	190
21.0	--	184	192	192	190	190
21.5	--	184	192	191	189	189
22.0	--	184	192	191	188	189
22.5	--	184	191	191	188	189
23.0	--	184	191	190	188	189
23.5	--	--	191	190	188	188
24.0	--	--	191	190	188	189
24.5	--	--	--	190	188	188
25.0	--	--	--	190	187	188
25.5	--	--	--	190	187	188
26.0	--	--	--	189	187	188
26.5	--	--	--	189	187	187
27.0	--	--	--	--	187	187
27.5	--	--	--	--	186	187
28.0	--	--	--	--	186	187
28.5	--	--	--	--	186	187
29.0	--	--	--	--	186	187
29.5	--	--	--	--	186	187
30.0	--	--	--	--	--	187

**EXPERIMENTO No. 4**

Tiempo (min)	Sólidos Disueltos Totales (mg/l)					
	Para 3 gr	Para 6 gr	Para 9 gr	Para 12 gr	Para 15 gr	Para 18 gr
0.0	158	157	173	157	156	154
0.5	158	157	173	157	156	154
1.0	158	157	173	157	156	154
1.5	158	157	173	157	156	154
2.0	158	157	173	157	156	154
2.5	160	158	174	158	157	155
3.0	165	162	178	160	158	158
3.5	169	170	179	167	163	165
4.0	170	181	201	185	173	177
4.5	171	184	211	202	204	207
5.0	171	185	215	213	224	238
5.5	170	183	214	209	226	235
6.0	168	179	210	205	217	228
6.5	167	178	206	200	213	221
7.0	167	176	203	197	208	213
7.5	166	174	201	193	200	209
8.0	166	174	198	190	197	205
8.5	165	171	196	188	193	197
9.0	164	170	193	184	189	198
9.5	163	169	191	185	188	191
10.0	163	166	190	180	184	188
10.5	162	167	187	177	180	185
11.0	162	165	185	175	179	185
11.5	162	165	185	174	177	180
12.0	161	163	184	172	176	178
12.5	161	162	183	172	173	175
13.0	160	162	182	169	171	173
13.5	160	161	181	167	170	172
14.0	160	160	179	166	168	169
14.5	160	160	179	166	166	168
15.0	160	160	178	165	165	166
15.5	159	160	178	163	165	166
16.0	159	160	177	163	163	164
16.5	159	159	177	162	162	164
17.0	159	159	176	161	162	164
17.5	159	158	176	161	162	162
18.0	159	158	175	161	161	161
18.5	158	158	175	160	160	161
19.0	--	158	175	160	160	160
19.5	--	158	175	160	159	159
20.0	--	--	174	159	158	158
20.5	--	--	174	159	158	158
21.0	--	--	174	159	158	158
21.5	--	--	174	159	158	158
22.0	--	--	174	158	158	157
22.5	--	--	174	158	158	157
23.0	--	--	174	158	157	157
23.5	--	--	174	158	157	157
24.0	--	--	174	158	157	156
24.5	--	--	--	158	--	156
25.0	--	--	--	--	--	155

**Anexo 4.** Calibración del modelo de dispersión, del modelo de tanques en serie con zonas muertas y cortocircuitos y del modelo de Wolf-Resnick.

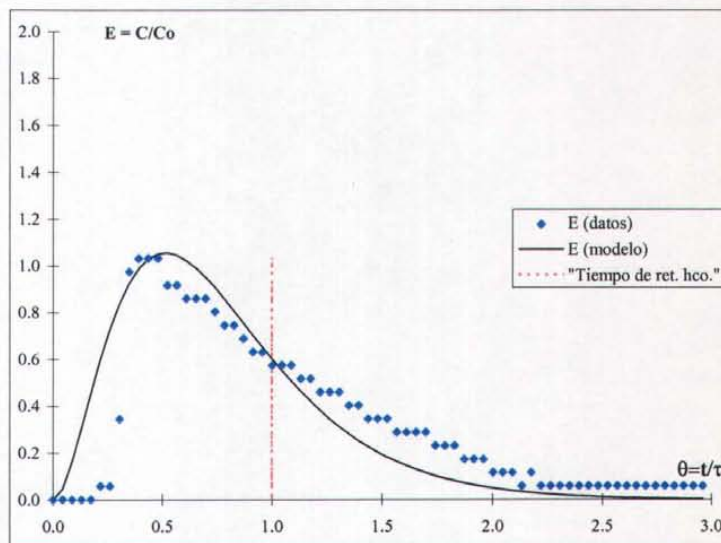
### Experimento No. 1

Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.357	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	11.49	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	11.59	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0030	kg
Cantidad de sal medida	0.0031	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.200$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.009$	No hay zonas muertas ni cortocircuitos
$t_p/\tau = 0.388$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 4.630$	Existen los dos tipos de flujos

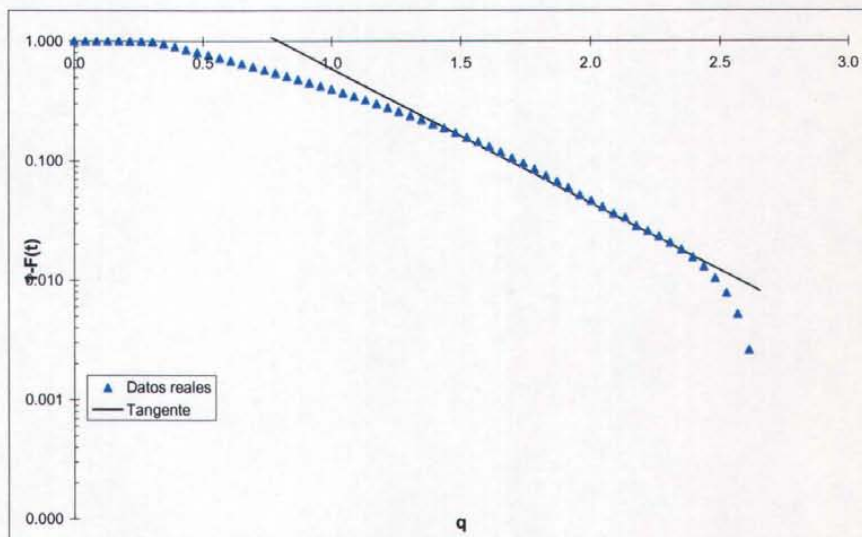
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		
Zona Muerta	Corto Circuito	Número de reactores en serie
23	0	3



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	67



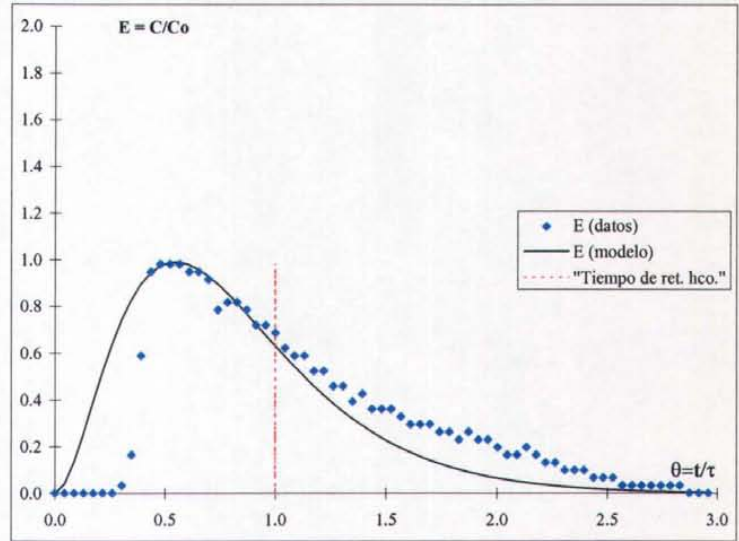


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.357	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	11.49	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	12.33	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0060	kg
Cantidad de sal medida	0.0054	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.150$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.074$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.446$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 4.072$	Existen los dos tipos de flujos

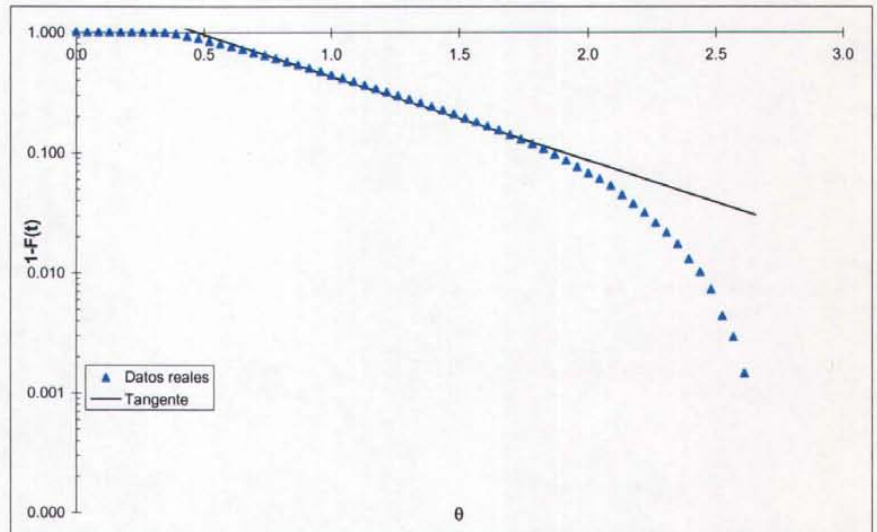
MODELO DE TANQUES EN SERIE

% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
18	0	3



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	43



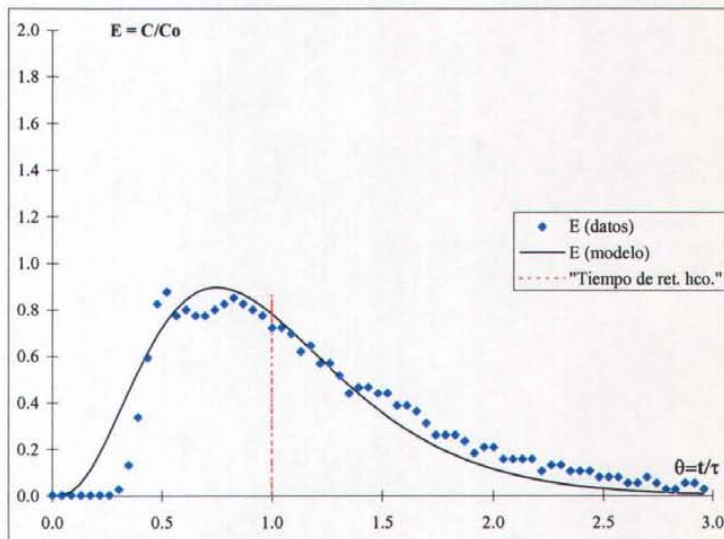
Gasto (l/s) 0.518  
 Volumen (m<sup>3</sup>) 0.357

Tiempo de residencia hidráulico  $\tau$  11.49 min  
 Tiempo medio de residencia  $\mu$  13.11 min  
 Tiempo de la concentración máxima  $t_p$  6.00 min  
 Cantidad de sal agregada 0.0090 kg  
 Cantidad de sal medida 0.0083 kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.136$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.141$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.458$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.859$	Existen los dos tipos de flujos

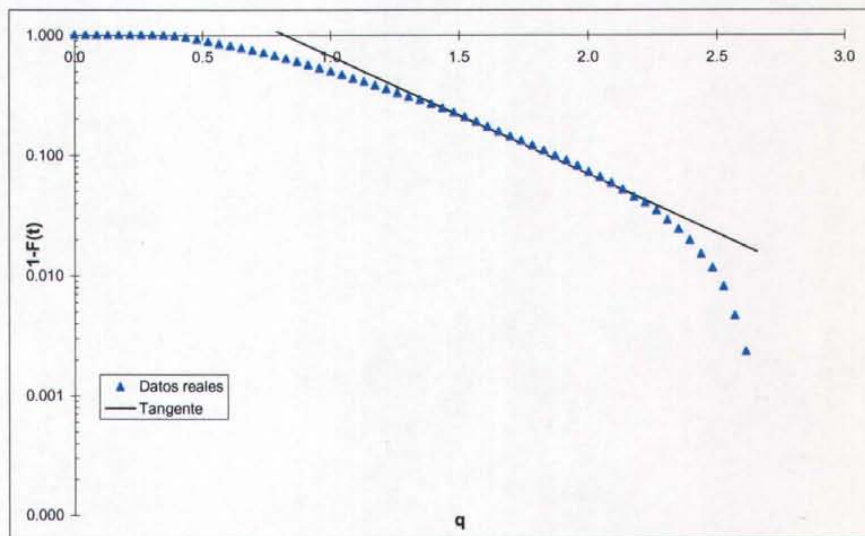
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	4



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	65

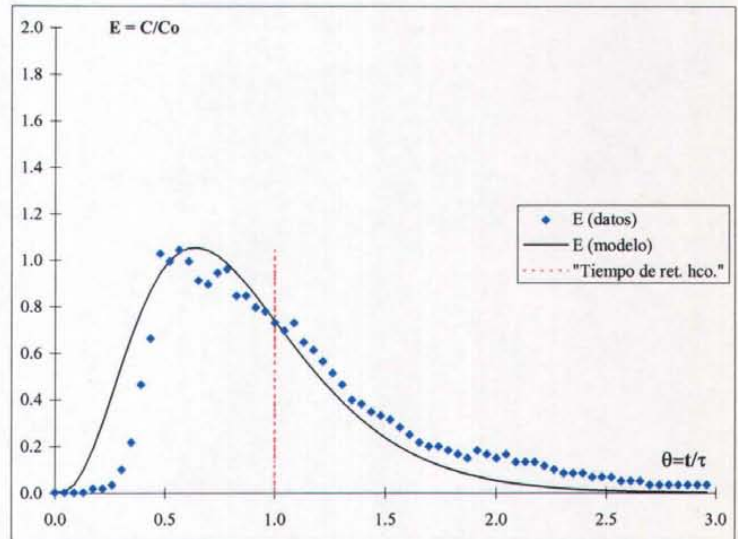


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.357	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	11.49	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	12.03	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	6.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0120	kg
Cantidad de sal medida	0.0106	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.153$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.048$	No hay zonas muertas ni cortocircuitos
$t_p/\tau = 0.540$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.872$	Existen los dos tipos de flujos

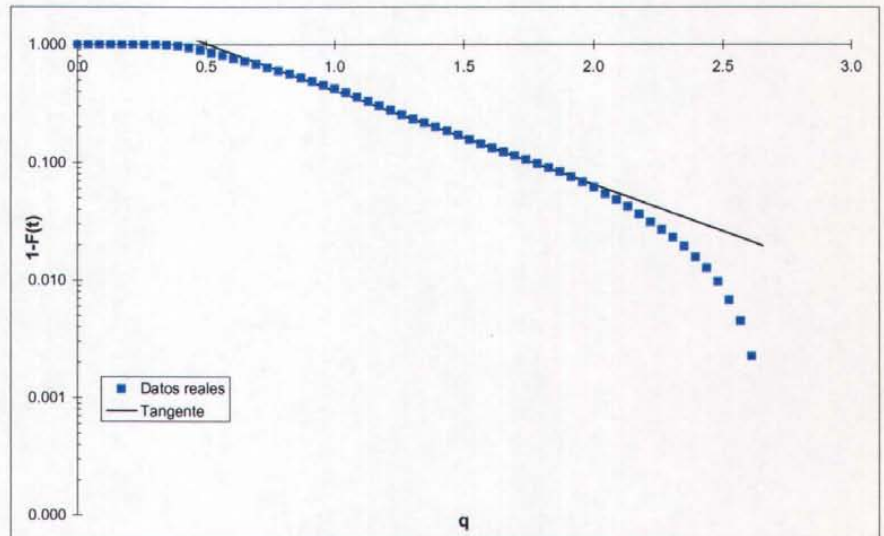
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
15	0	4



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	48

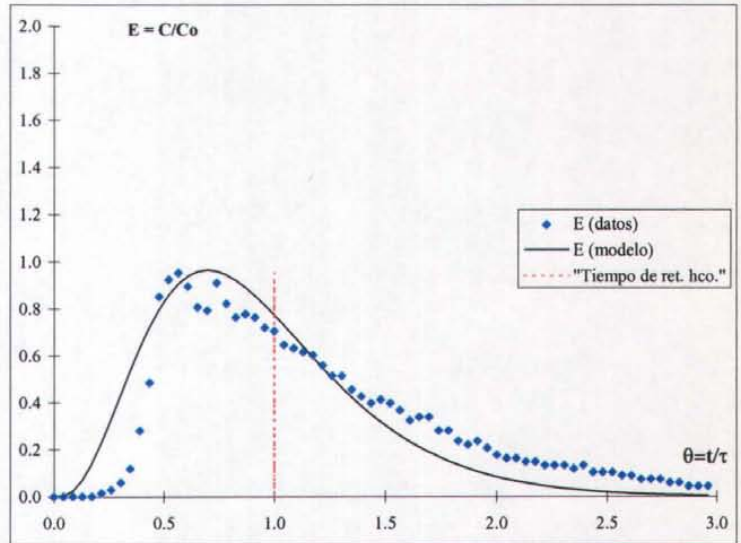


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.357	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	11.49	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	13.21	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	6.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0150	kg
Cantidad de sal medida	0.0146	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.149$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.150$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.492$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.954$	Existen los dos tipos de flujos

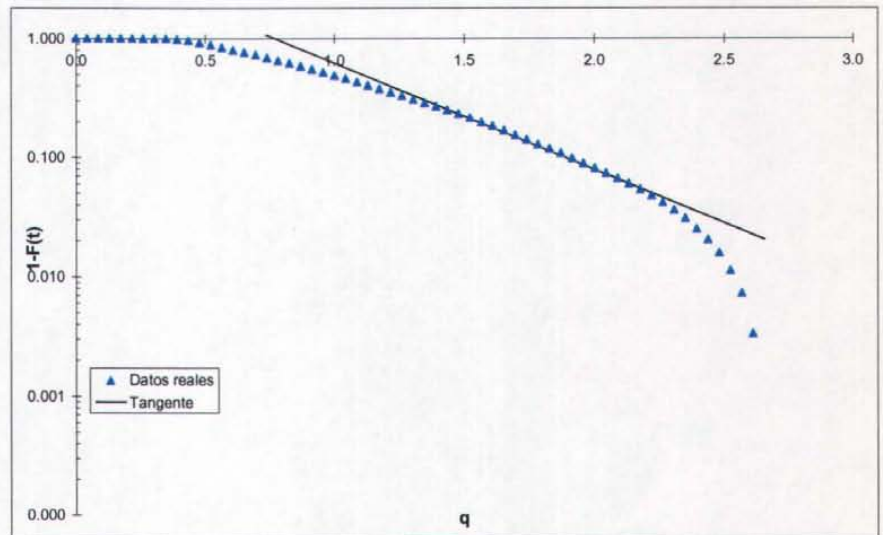
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
7	0	4



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	61

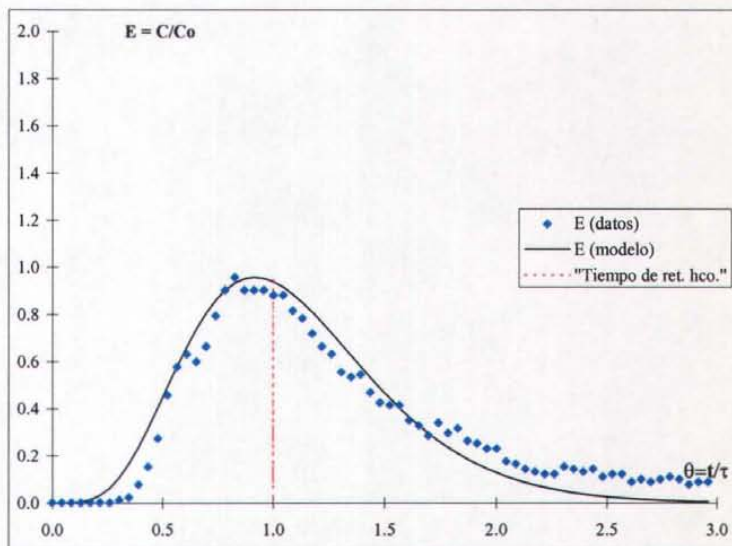


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.357	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	11.49	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	14.42	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	9.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0180	kg
Cantidad de sal medida	0.0161	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.117$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.256$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.659$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.366$	Existen los dos tipos de flujos

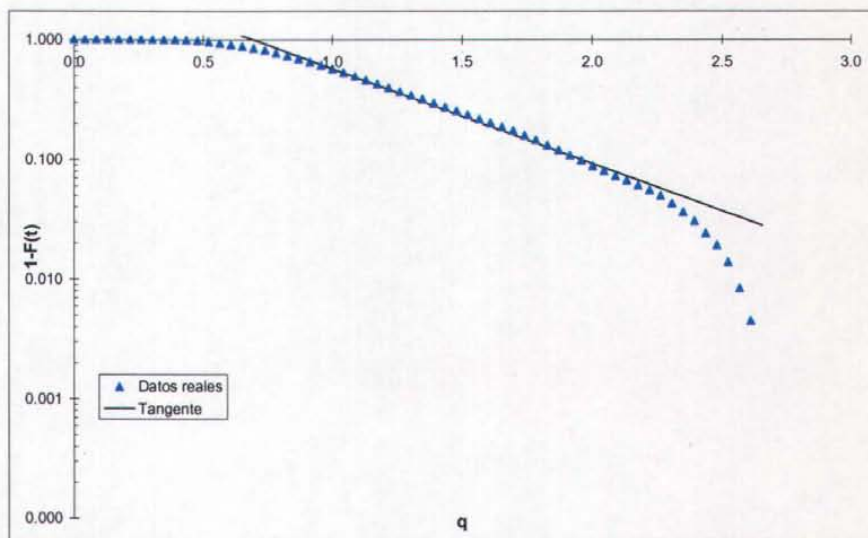
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
-10	0	6



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	56



## Experimento No. 2

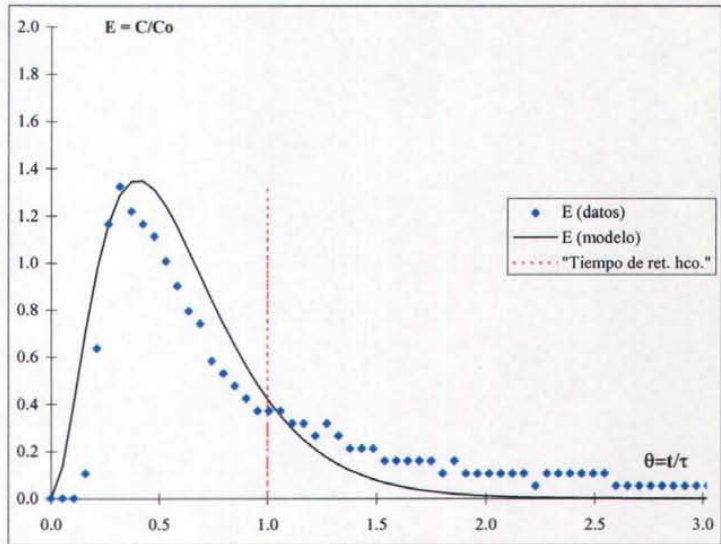
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.97	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	3.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0030	kg
Cantidad de sal medida	0.0027	kg

### Análisis cualitativo

$D/uL = 0.675$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 0.951$	No hay zonas muertas ni cortocircuitos
$t_p/\tau = 0.334$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 7.969$	Existen los dos tipos de flujos

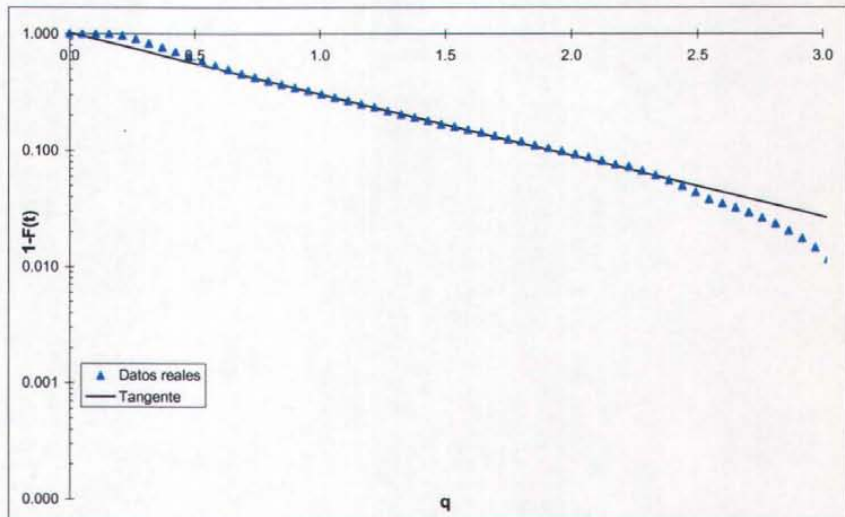
### MODELO DE TANQUES EN SERIE

%a		
Zona Muerta	Corto Circuito	Número de reactores en serie
40	0	3



### MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
16	2



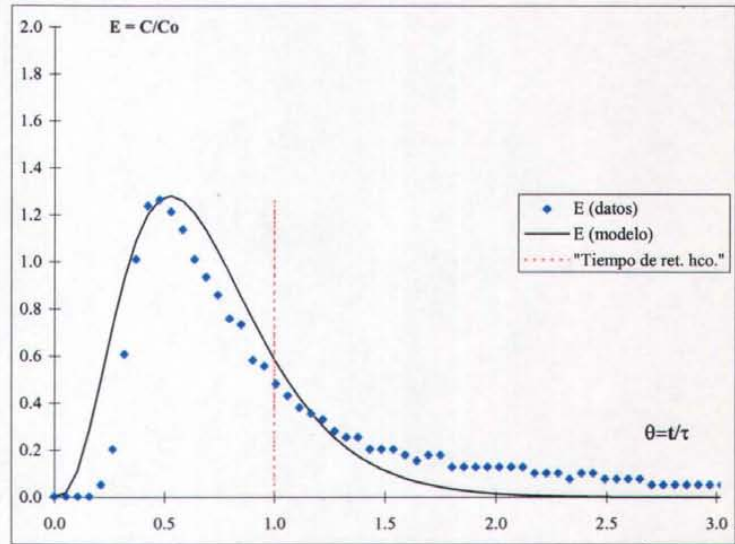
Gasto (l/s)	0.518
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43 min
Tiempo medio de residencia $\mu$	9.62 min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.50 min
Cantidad de sal agregada	0.0060 kg
Cantidad de sal medida	0.0057 kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.391$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.020$	No hay zonas muertas ni cortocircuitos
$t_p/\tau = 0.468$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 5.597$	Existen los dos tipos de flujos

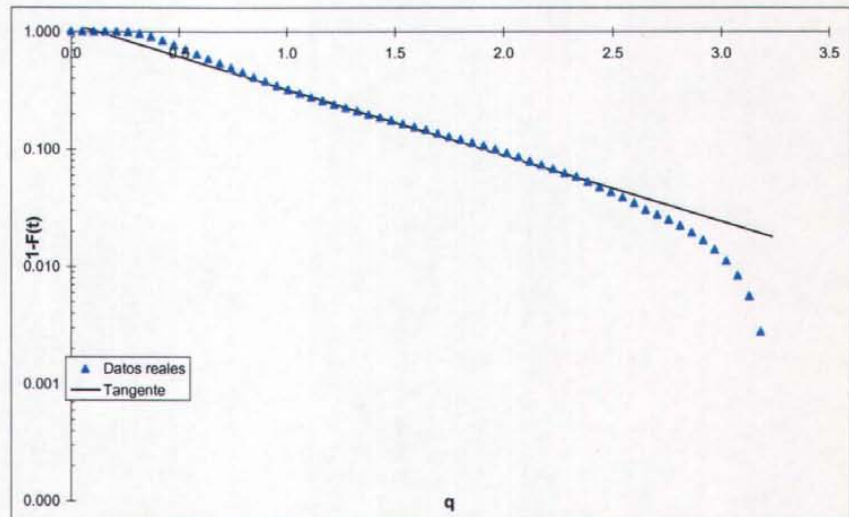
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
30	0	4



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
11	13



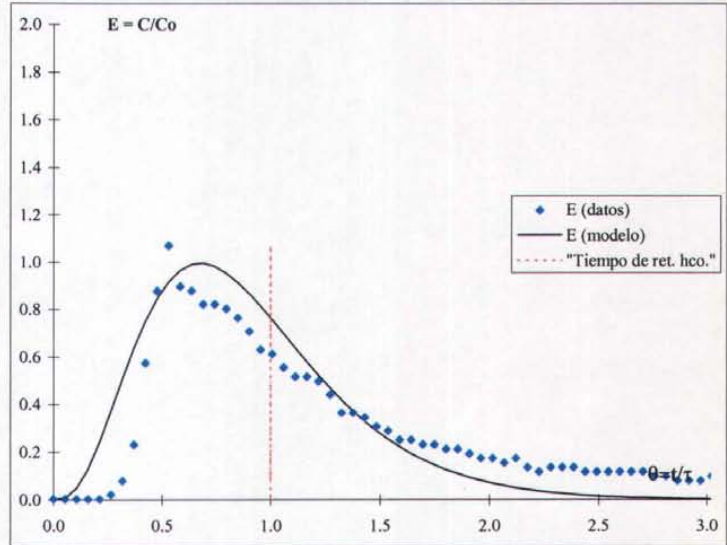
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	11.82	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0090	kg
Cantidad de sal medida	0.0075	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.253$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.254$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.423$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 5.090$	Existen los dos tipos de flujos

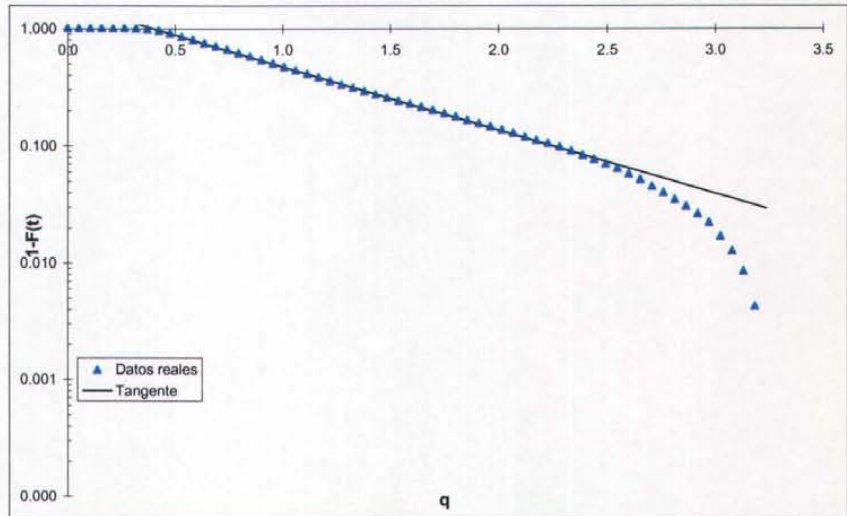
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
10	0	4



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	33



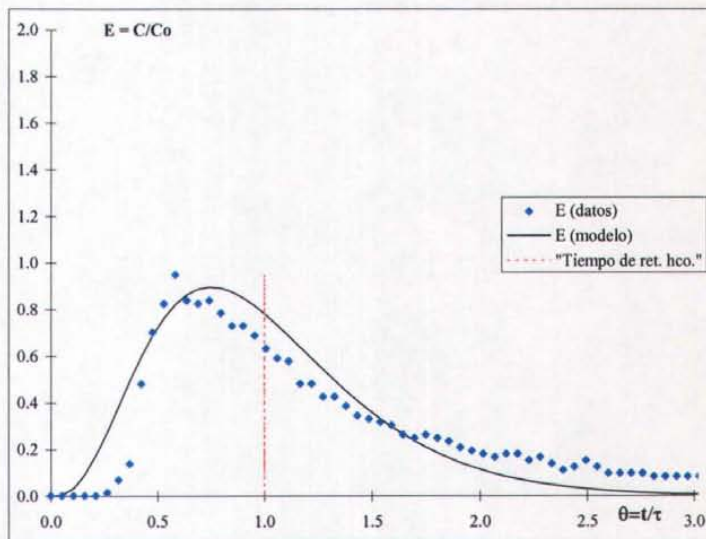


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	12.20	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0120	kg
Cantidad de sal medida	0.0105	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.230$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.294$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.451$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 4.848$	Existen los dos tipos de flujos

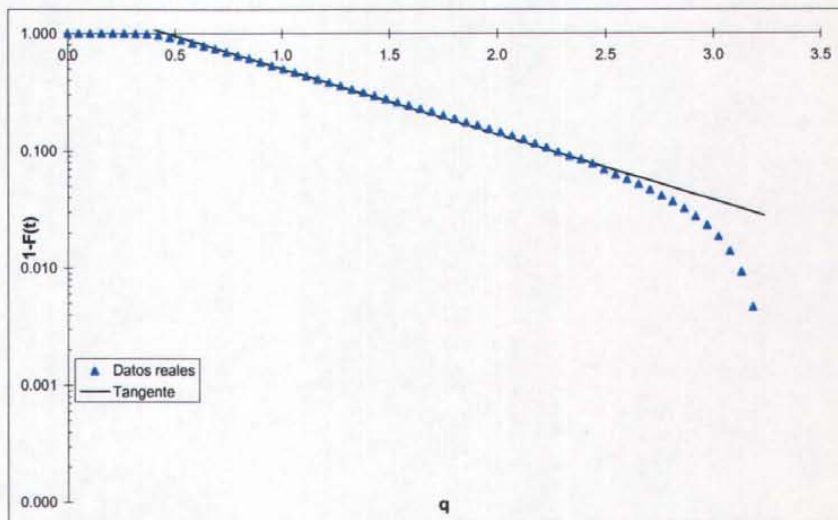
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	4



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	38



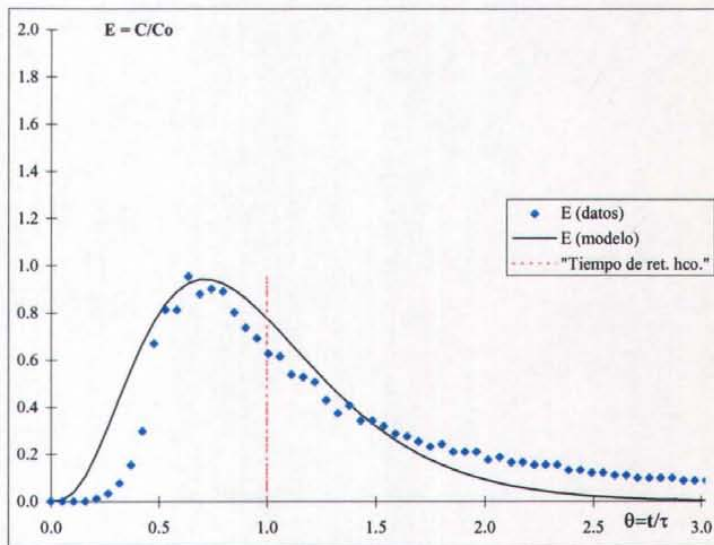
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	12.05	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	6.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0150	kg
Cantidad de sal medida	0.0131	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.217$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.278$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.498$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 4.644$	Existen los dos tipos de flujos

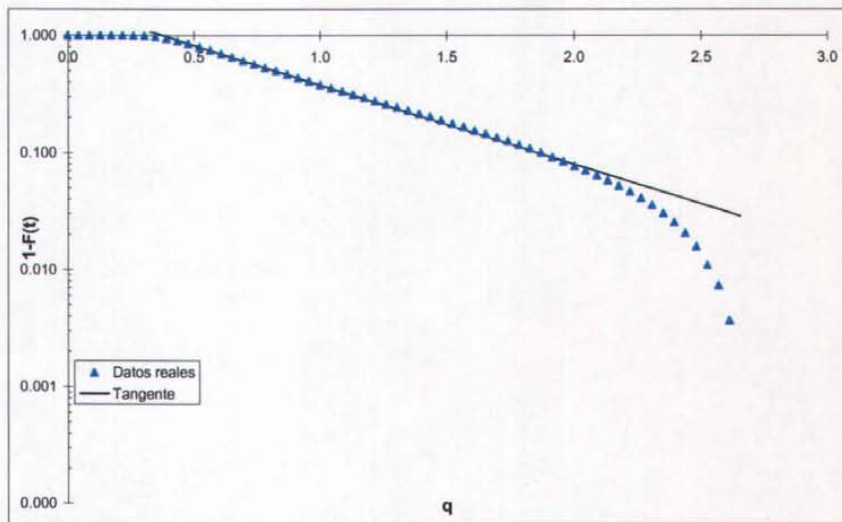
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
5	0	4



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	37



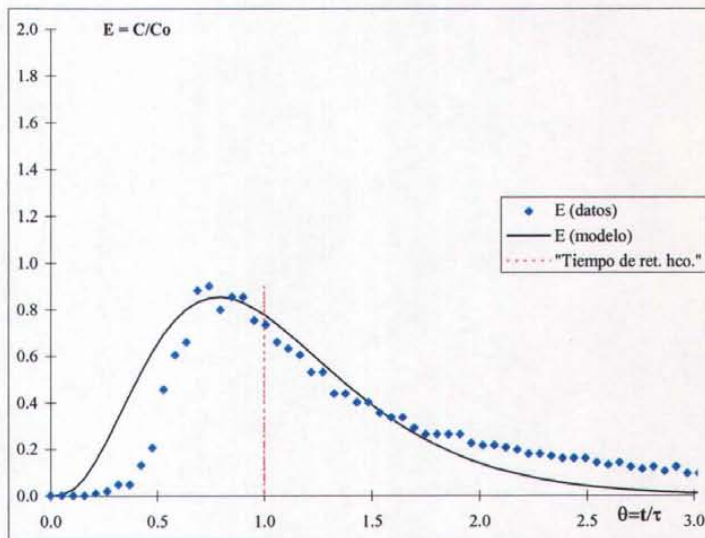
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.293	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	9.43	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	13.03	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	7.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0180	kg
Cantidad de sal medida	0.0155	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.172$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.383$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.537$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 4.088$	Existen los dos tipos de flujos

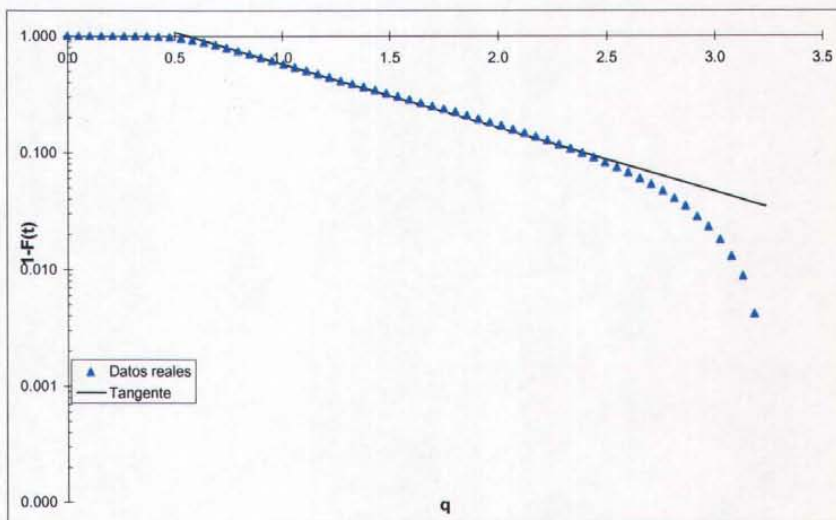
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Corto Circuito		Número de reactores en serie
Zona Muerta		
-5	0	4



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	42



### Experimento No. 3

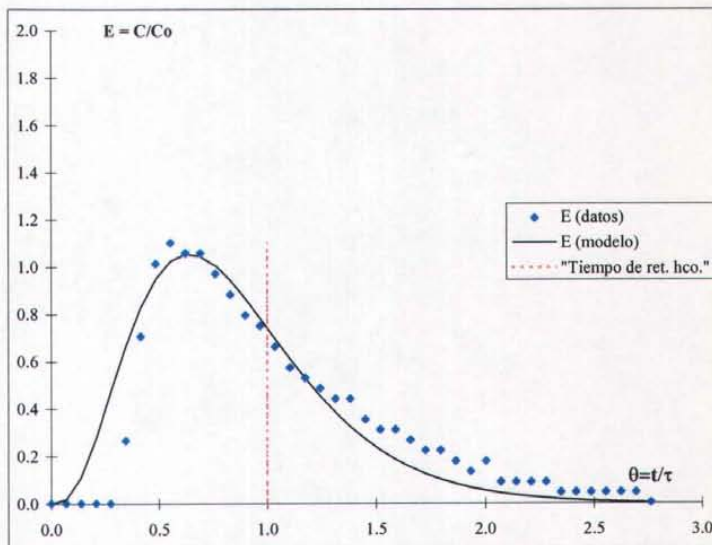
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	7.27	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0030	kg
Cantidad de sal medida	0.0025	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.139$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.004$	No hay zonas muertas ni cortocircuitos
$t_p/\tau = 0.550$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.772$	Existen los dos tipos de flujos

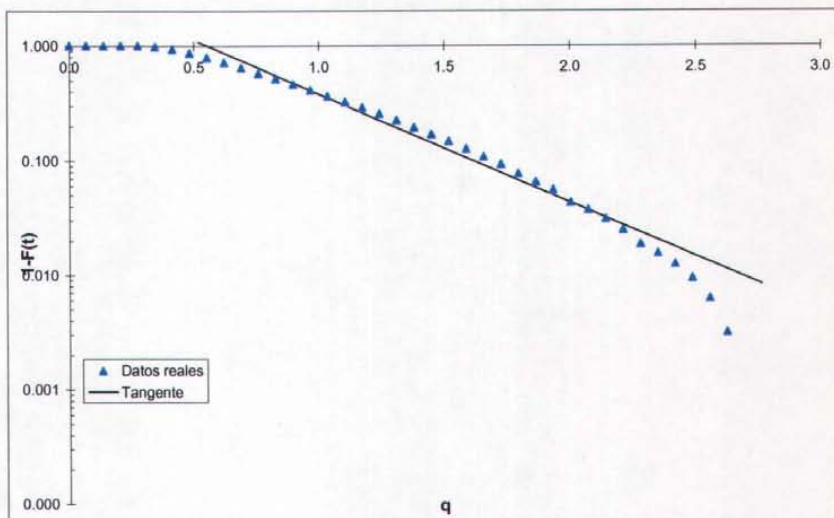
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
15	0	4



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	55



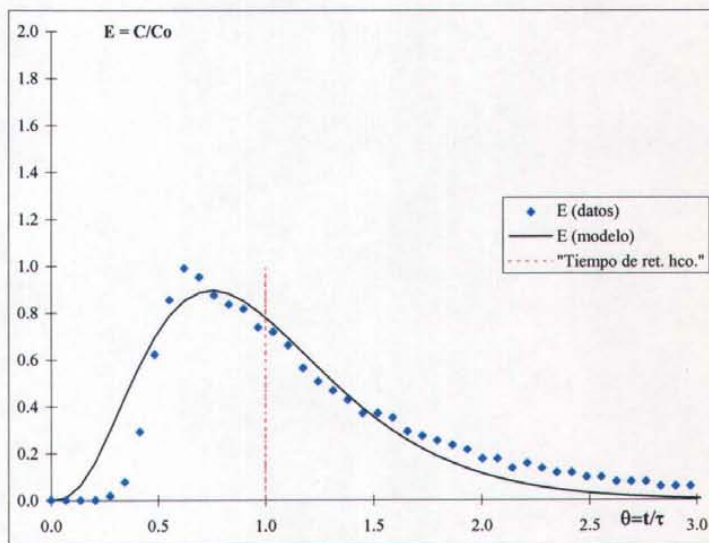
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.53	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0060	kg
Cantidad de sal medida	0.0057	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.156$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.178$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.528$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.940$	Existen los dos tipos de flujos

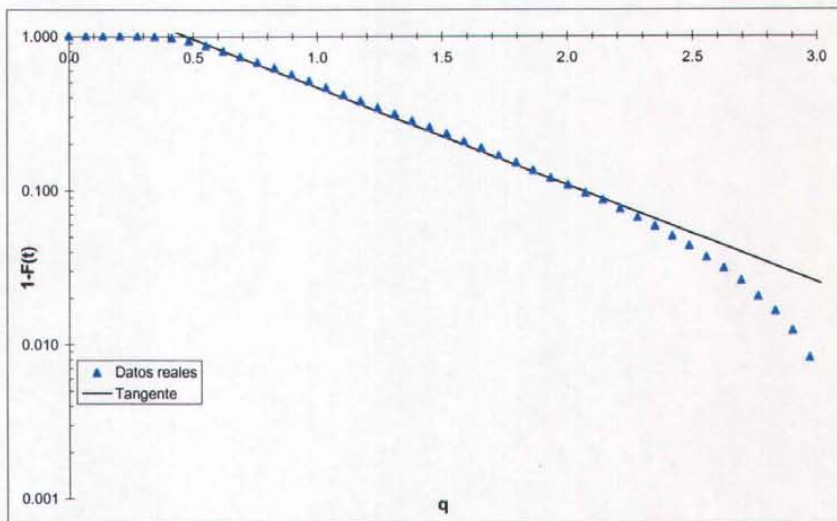
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	4



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	41



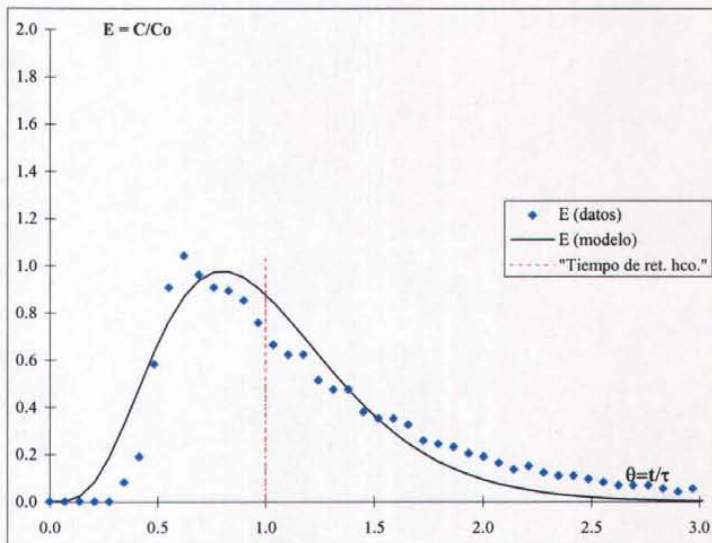
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.45	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0090	kg
Cantidad de sal medida	0.0082	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.149$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.168$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.532$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.767$	Existen los dos tipos de flujos

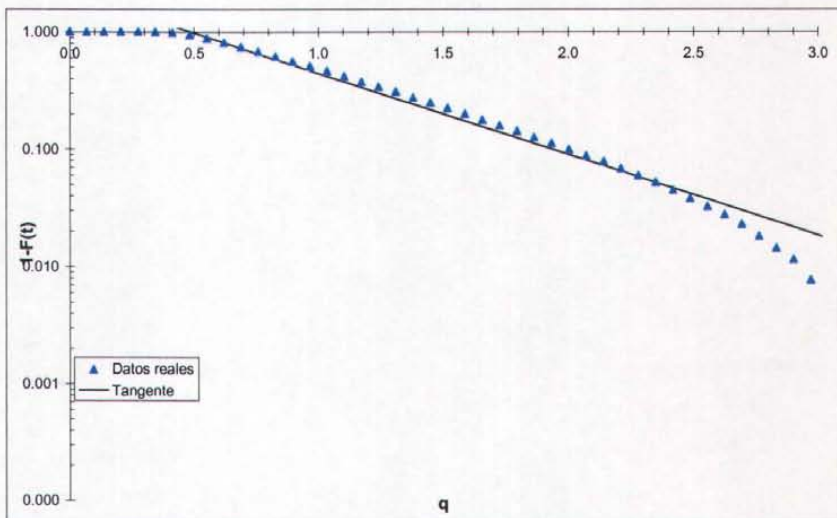
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	5



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	44



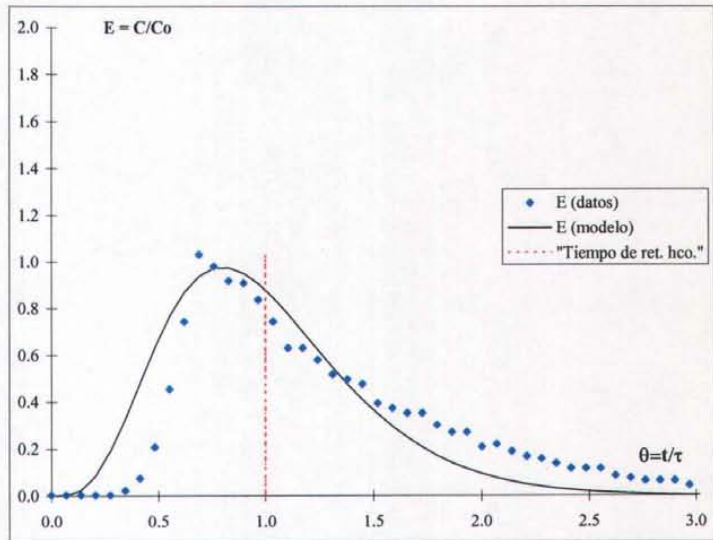
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	9.22	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0120	kg
Cantidad de sal medida	0.0107	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.132$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.274$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.542$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.435$	Existen los dos tipos de flujos

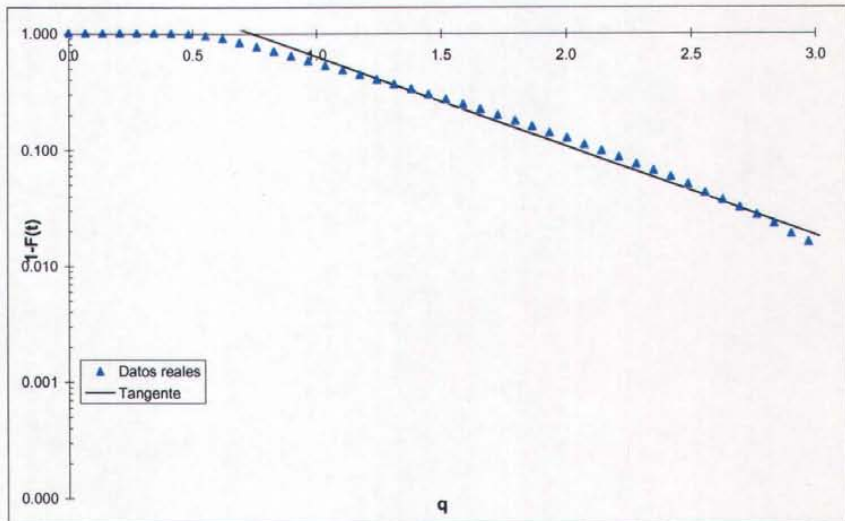
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Corto Circuito		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	5



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	57



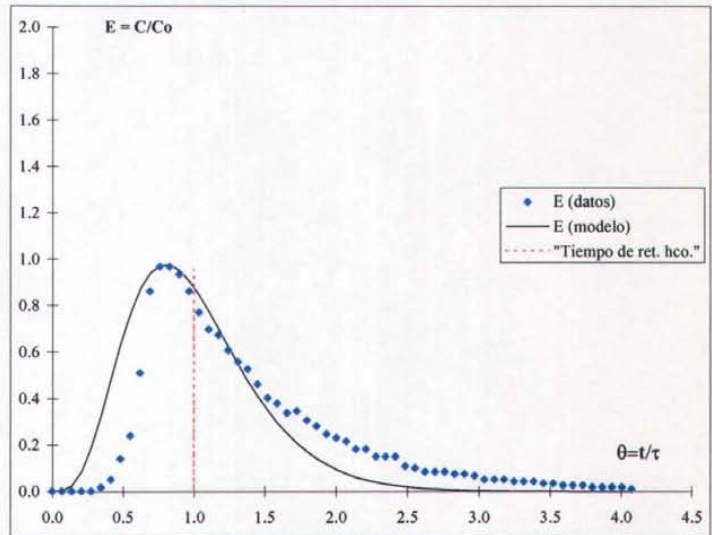
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	9.81	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0150	kg
Cantidad de sal medida	0.0135	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.145$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.355$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.561$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.439$	Existen los dos tipos de flujos

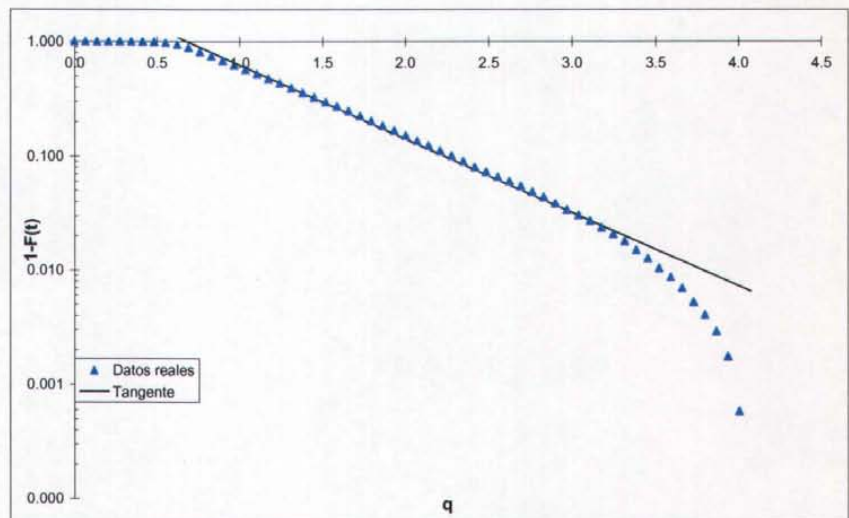
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	5



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	50



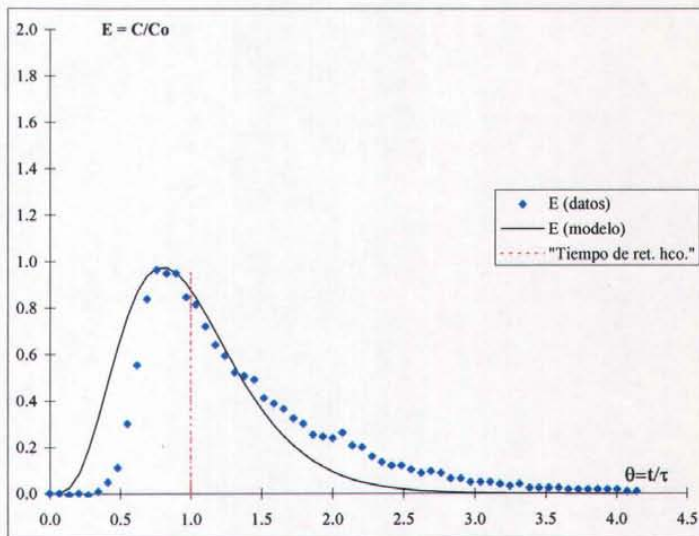


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.225	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	7.24	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	9.74	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0180	kg
Cantidad de sal medida	0.0140	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.139$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.345$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.565$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.380$	Existen los dos tipos de flujos

MODELO DE TANQUES EN SERIE

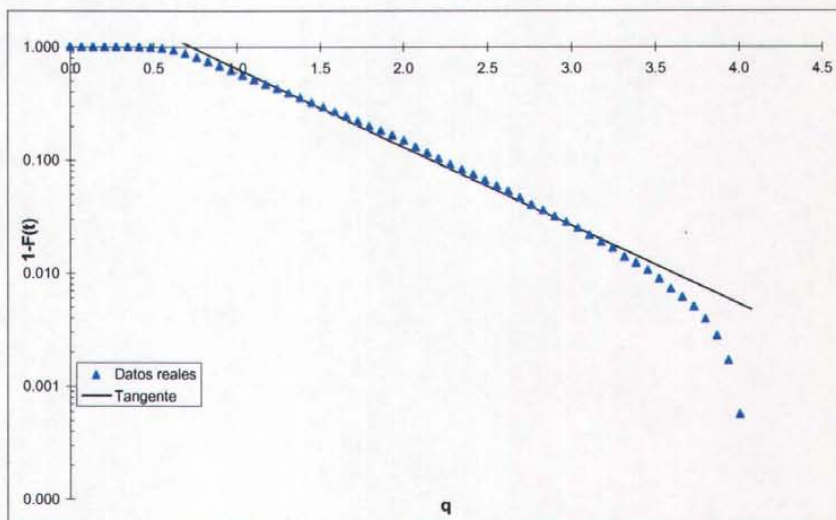
% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Corto	Circuito	
0	0	5



MODELO WOLF RESNICK

MODELO REBHUN Y ARGAMAN

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	54



### Experimento No. 4

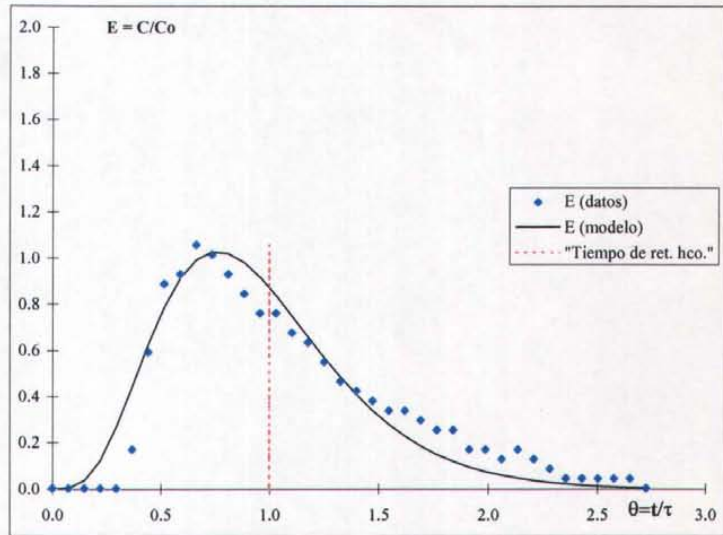
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	7.24	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	4.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0030	kg
Cantidad de sal medida	0.0026	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.119$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.066$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.622$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.565$	Existen los dos tipos de flujos

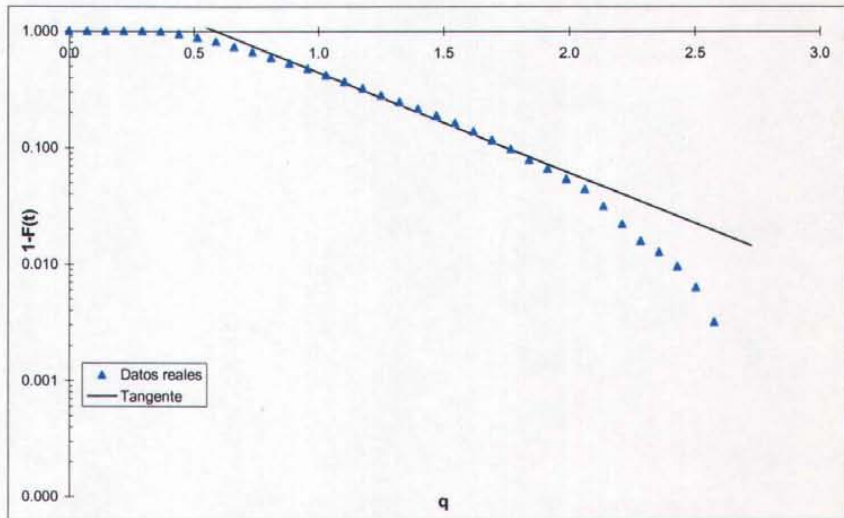
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Zona Muerta		% Corto Circuito		Número de reactores en serie
5		0		



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	54

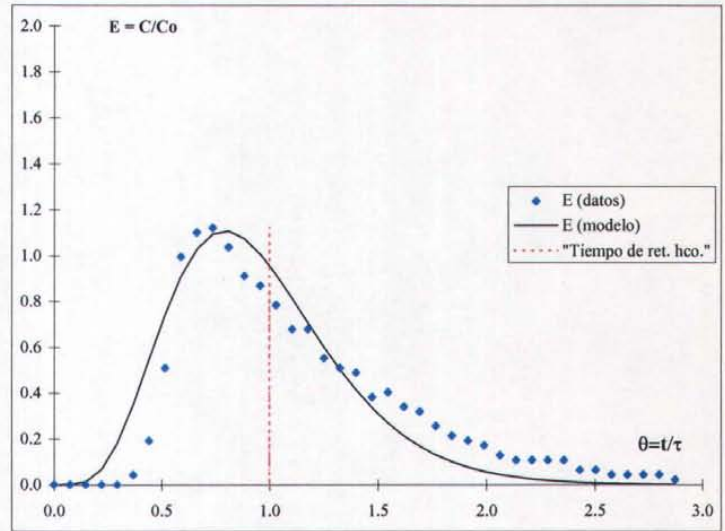


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	7.61	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0060	kg
Cantidad de sal medida	0.0052	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.111$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.121$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.657$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.199$	Existen los dos tipos de flujos

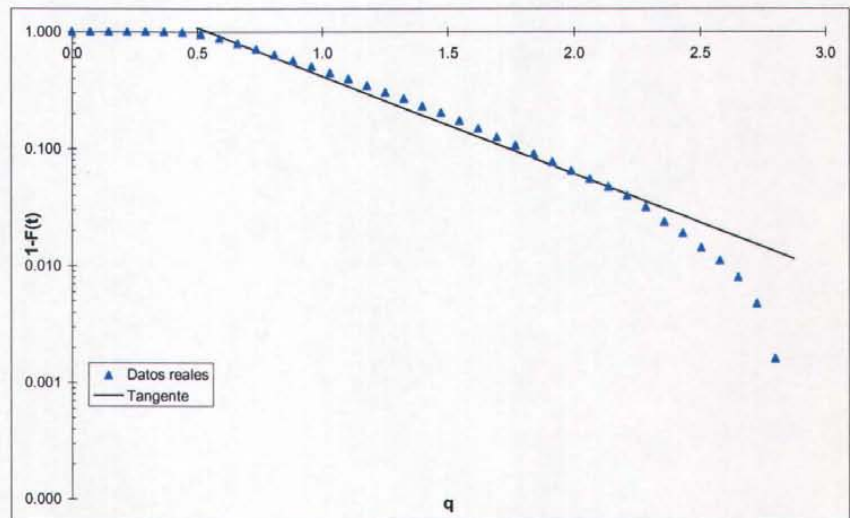
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
5	0	6



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	51



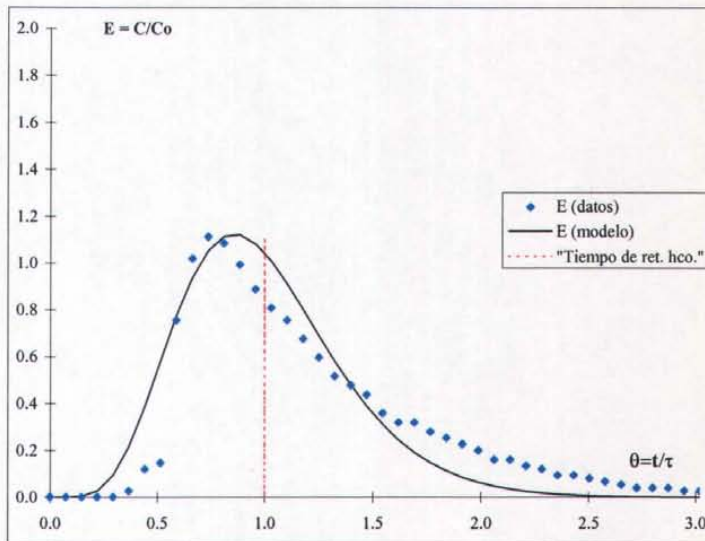
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.15	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0090	kg
Cantidad de sal medida	0.0078	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.119$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.200$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.614$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.173$	Existen los dos tipos de flujos

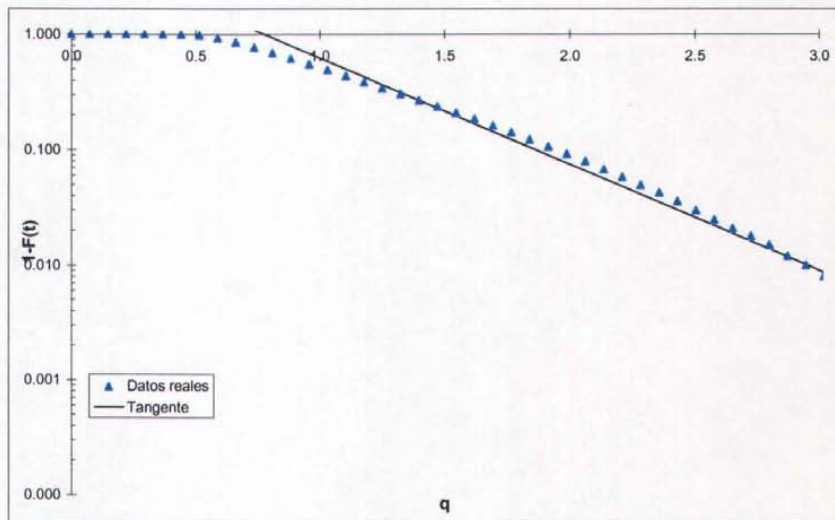
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Zona Muerta		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	7



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	62

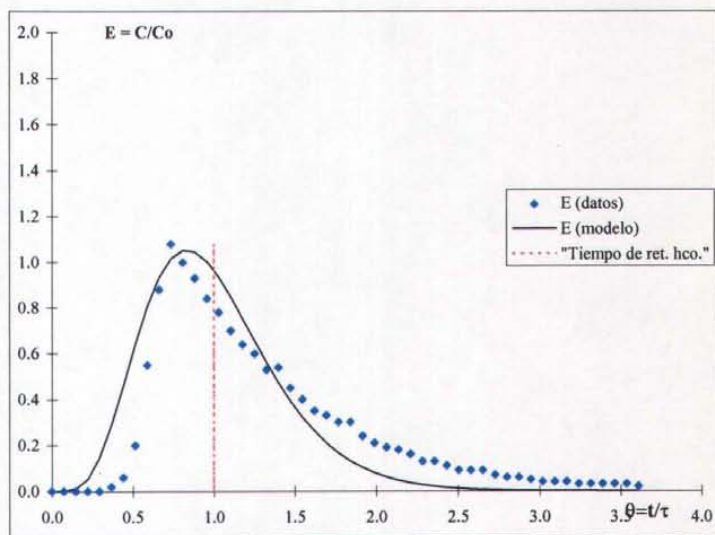


Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.72	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0120	kg
Cantidad de sal medida	0.0110	kg

Análisis cualitativo	
$D/uL = 0.132$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.285$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.573$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.349$	Existen los dos tipos de flujos

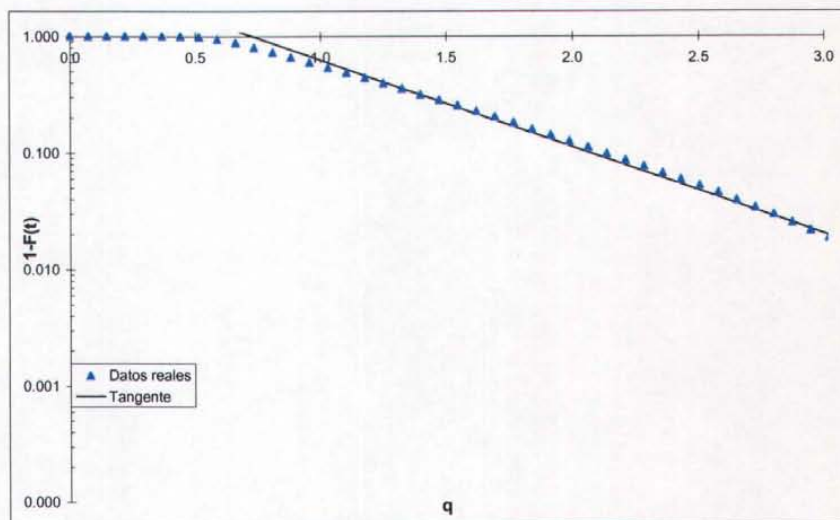
MODELO DE TANQUES EN SERIE

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	6



MODELO WOLF RESNICK

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	56



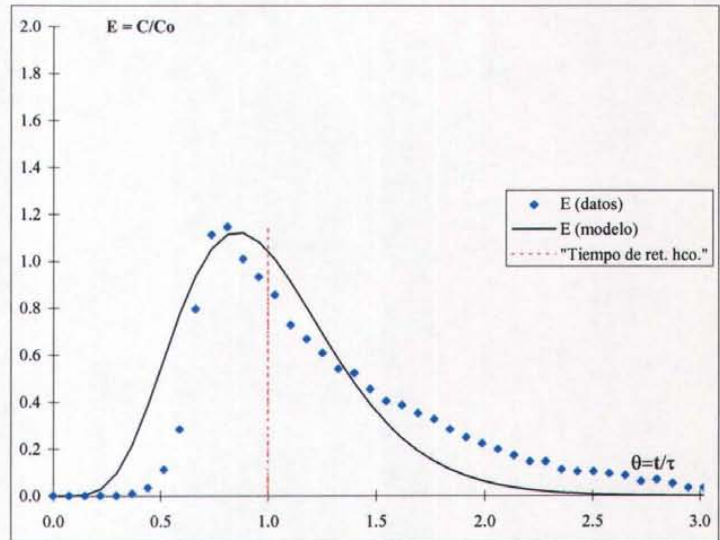
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	8.70	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.50	min
Cantidad de sal agregada	0.0150	kg
Cantidad de sal medida	0.0128	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.115$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.282$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.632$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.084$	Existen los dos tipos de flujos

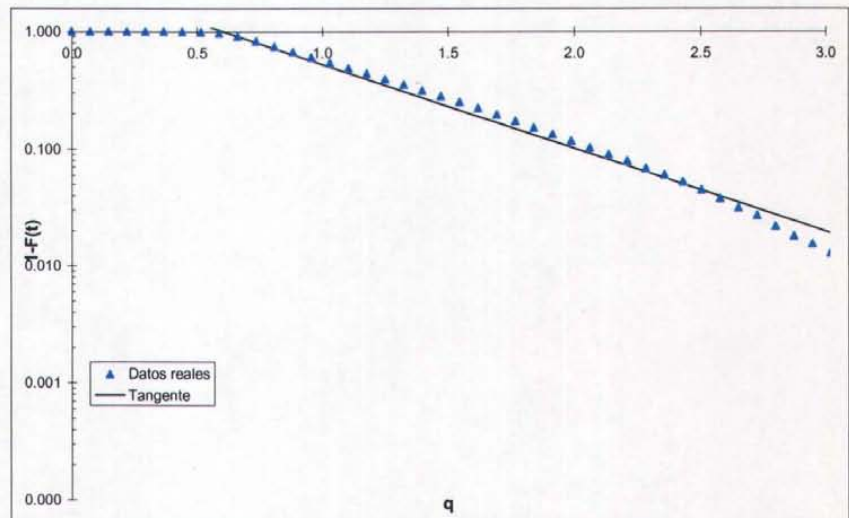
**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

% Corto Circuito		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	7



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	50



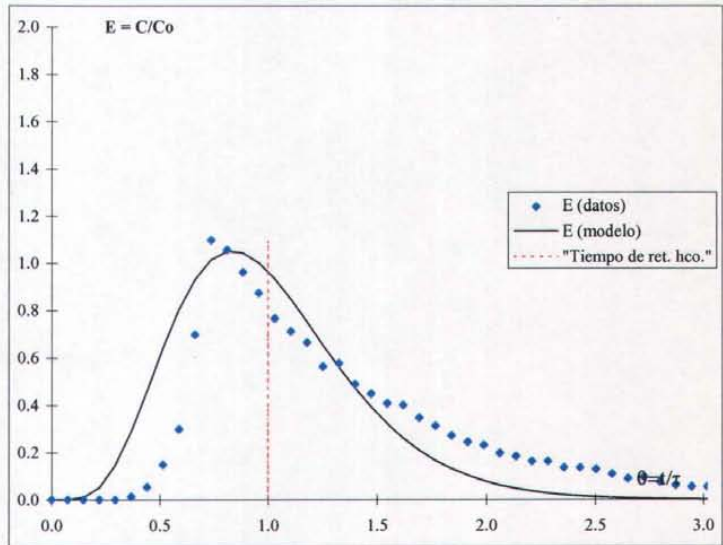
Gasto (l/s)	0.518	
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.211	
Tiempo de residencia hidráulico $\tau$	6.79	min
Tiempo medio de residencia $\mu$	9.07	min
Tiempo de la concentración máxima $t_p$	5.00	min
Cantidad de sal agregada	0.0180	kg
Cantidad de sal medida	0.0162	kg

**Análisis cualitativo**

$D/uL = 0.132$	Tiende más a mezcla completa
$\mu/\tau = 1.336$	Errores en el cálculo de gasto o volumen
$t_p/\tau = 0.551$	Tiende más a mezcla completa
$t_{90}/t_{10} = 3.328$	Existen los dos tipos de flujos

**MODELO DE TANQUES EN SERIE**

%		Número de reactores en serie
Zona Muerta	Corto Circuito	
0	0	6



**MODELO WOLF RESNICK**

% volumen de la unidad	
Zona Muerta	Flujo Pistón
0	46

