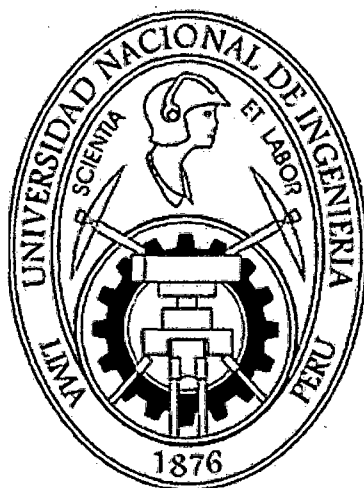


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“ENSAYOS DE TRAZADORES EN LA DETERMINACIÓN  
DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN REACTOR  
ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE  
LODO A NIVEL DE PLANTA PILOTO”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO SANITARIO**

**PRESENTADO POR:**

**ESPINOZA MEZA, JAKELIN VANESSA  
MORI ALVAREZ, FERNANDO**

**TOMO I**

**LIMA, PERÚ**

**AÑO 2011**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

**DEDICATORIA**

La presente investigación de tesis se la dedico a mi familia, mis padres y hermano, que gracias a su apoyo y exigencia constante por que sea mejor me sirvieron de impulso. Del mismo modo a mi amigo y compañero por la confianza que me tuvo para llevar a cabo la tesis juntos.

Jakelin Vanessa Espinoza Meza

Dedico esta investigación a mi madre y padre, que me enseñaron a "*creer en mí mismo*", a mi compañera, por su apoyo durante la investigación, y sobretodo les dedico esta investigación a aquellas personas que aprendieron de sus "*errores*" y ahora son capaces de llamarles "*experiencia*".

*"En todo cuanto he hecho en el curso de mi vida, bueno o malo, estoy seguro de haber merecido elogios y censuras, y que, por tanto, he de considerarme libre."*

*Giacomo Casanova*

Fernando Mori Alvarez

**AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a todas las personas que nos brindaron su apoyo para la realización de la investigación, especialmente a nuestro asesor de tesis el Ing. Otto Rosasco Gerkes que con sus conocimientos nos dio las pautas necesarias para encaminar la investigación, de igual manera al Ing. Juan Carlos Alarcón Córdor, compañero y amigo que nos brindó las facilidades del caso para la instalación de la planta piloto.

## RESUMEN EJECUTIVO

### A. GENERALIDADES

La presente tesis de investigación titulada **“ENSAYOS DE TRAZADORES EN LA DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE LODO A NIVEL DE PLANTA PILOTO”** tiene como objetivo general determinar el tiempo de retención hidráulico o tiempo medio de retención real en el reactor UASB-UNITRAR debido a las complicaciones que se pueden presentar en la evaluación de la unidad real se optó por realizar la investigación en un reactor piloto UASB (escala 7:100) bajo las mismas condiciones ambientales.

Para un adecuado entendimiento de la tesis de investigación el documento se encuentra dividido en VIII Capítulos.

En el 0 se describen los antecedentes de investigaciones precedentes de la misma índole en Latinoamérica y se plasma el planteamiento del problema, hipótesis, justificación y los objetivos.

En el 0 se describen las definiciones necesarias para comprender el comportamiento que se presenta en los reactores y escoger el método más adecuado acorde con los datos obtenidos experimentalmente con el nivel de precisión deseado. Por lo que describiremos el reactor UASB, el tiempo de retención hidráulico, los trazadores, su aplicación y limitaciones en los ensayos de determinación de tiempo de retención hidráulico, los tipos de flujos de reactores, comportamiento de los fluidos, distribución de la edad de flujo (Curva E), curva tendencia y los principales modelos y métodos matemáticos para determinar el tiempo de retención hidráulica y el flujo predominante.

En el CAPITULO III se describe la metodología de la investigación que se llevó a cabo en la realización del experimento. En la primera parte se describe la elección de cada componente de la planta piloto, las alternativas de diseño, las pruebas de calibración que se realizó por alternativa de componente, también se justifica la elección del trazador y su concentración en base a las curvas de

calibración de NaCl. Posteriormente se hace una descripción de las componentes de la planta piloto, indicando los materiales usados y sus dimensiones. Finalmente se indica la metodología de realización de los ensayos con lodo y sin lodo, especificando todas las tareas preliminares, previas, durante y después del ensayo, se indica también la frecuencia del muestreo y los parámetros a determinar.

En el CAPITULO IV se plasman los resultados obtenidas en todas las pruebas y ensayos. Primero se presenta la caracterización del agua potable y de los lodos utilizados en todos los ensayos, luego se describe el volumen útil del reactor piloto UASB, y se muestran los datos obtenidos en los ensayos con lodo y sin lodo, así como el procesamiento de los datos, la aplicación de los modelos matemáticos ya descritos en el CAPITULO III.

En el CAPITULO V se mencionan todas las conclusiones que se pueden extraer de la investigación y procesamiento de datos.

En el CAPITULO VI se mencionan todas las consideraciones que se debe tener presente para obtener datos representativos y precisos en los ensayos de trazadores, así como las recomendaciones que se deben tener para futuras investigaciones.

En el CAPITULO VII se mencionan la bibliografía que incluye libros, artículos, investigaciones y páginas web usadas para elaborar el fundamento teórico.

En el CAPITULO VIII, se incluye información adicional que complementa los diversos capítulos mencionados anteriormente.

## B. INVESTIGACIÓN

La investigación fue realizada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería – UNITRAR, aquí se instaló una Planta Piloto constituido por un tanque de almacenamiento, una caja repartidora de caudal y un reactor piloto UASB, reactor anaerobio de flujo ascendente. El reactor piloto UASB es un reactor a escala del UASB-UNITRAR de escala 7:100.

El fluido usado en los ensayos fue agua potable, ya que ,debido a las dimensiones del reactor piloto UASB, el uso de desagüe ocasionaría obstrucción de las mangueras y válvulas del sistema

El objetivo de la investigación, como ya se mencionó, fue la determinación del tiempo medio de retención, así como también el comportamiento del fluido en el interior del reactor piloto UASB, por lo cual se realizaron pruebas de ensayos de trazadores usando NaCl, para el TRH real y ensayos de trazadores de color para visualizar las corrientes que se forman en el reactor piloto UASB.

Previo a la realización de los ensayos con trazadores se realizó la caracterización del fluido, en nuestro caso del agua potable y, la caracterización del lodo, el lodo utilizado en los ensayos se obtuvo del UASB-UNITRAR de altura 1.5mt, obteniéndose los siguientes valores:

PARÁMETROS	VALORES
Cloruros	165 mg/L
Alcalinidad	172 mg/L
Dureza	520 mg/L
Sulfatos	180 mg/L
Conductividad	1157 uS
pH	8.28
Sólidos Disueltos	563 ppm

*Cuadro 0.1.- Caracterización del agua potable.*

PARÁMETROS	VALORES
Densidad	1.0474 g/ml
Sólidos Totales	1931.17 mg/L
Sólidos Disueltos Totales	1250.05 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	681.12 mg/L

Cuadro 0.2.- Caracterización del lodo.

Con respecto al agua concluimos que es agua muy dura, lo que puede generar incrustaciones en las tuberías y válvulas, ya que estas son de pequeñas dimensiones. En el lodo se observa que la densidad es cercana a uno, esto se debe al estado coloidal del lodo, semisólido.

Posteriormente se realizó una prueba con trazadores de color para determinar visualmente el volumen útil (que participa en el proceso) dentro del reactor piloto UASB. En el cual se observó que el volumen sobre los deflectores, correspondiente a la cámara separadora de gases no participa como volumen útil, ya que las líneas de flujo no ingresan a esta zona, sino que transitan directamente a la zona de recolección. Por lo que el volumen útil del reactor es de 96.7 litros.

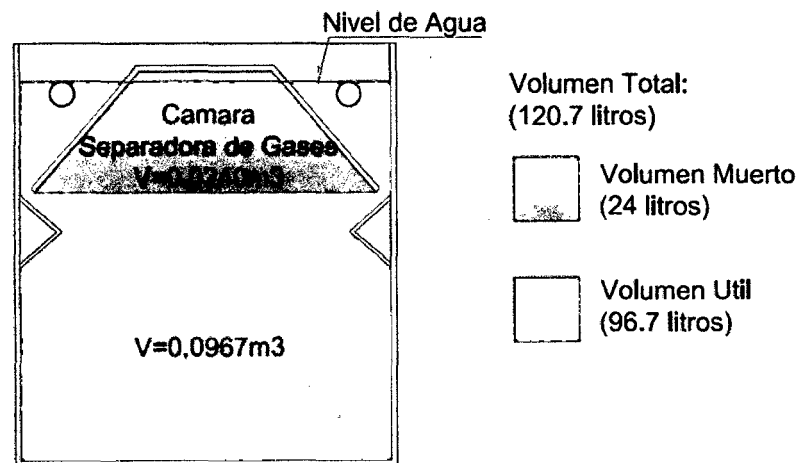


Figura 0.1.- Volumen del área útil y volumen de la zona muerta.

El ensayo de trazadores se dividió en dos grupos, en el primer grupo se realizó Ensayos de Trazadores con Color en ausencia de manto de lodos y en

## VIII

presencia de manto de lodo; en el segundo grupo se realizó Ensayos de Trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos y en presencia de manto de lodo.

Los ensayos del primer grupo tuvieron la finalidad de permitir observar el comportamiento hidráulico en el interior del reactor piloto UASB en ausencia y presencia de manto de lodos para entender de mejor manera el flujo y los tiempos de retención en cada zona del reactor, así como también los efectos de la presencia de manto de lodos.

En el Ensayo de Trazador con Color en ausencia de manto de lodos se observó una distribución homogénea del trazador en el fondo del reactor, lo que comprobó la elección adecuada del positivo de ingreso, además el ascenso de las líneas de flujo, representadas por un colchón de trazador (colchón de color verde), fue uniforme lo cual indicó que el flujo predominante es el régimen Flujo Pistón y que existe un fuerte fenómeno de difusión.

En el Ensayo de Trazador con Color en presencia de manto de lodos, el paso del fluido a través del manto de lodos no es uniforme, se genera canalizaciones no uniformes a través de él, ocasionando que el fluido recorra diferentes caminos dentro del manto de lodos y por ende el tiempo de permanencia en el manto de lodos de las diferentes fracciones del fluido son diferentes, originando aparición tempranas y tardías en la superficie del manto de lodos, lo que se ve traducido en una distribución no uniforme del trazador en dicha superficie.

Los ensayos del segundo grupo tuvieron la finalidad de permitir observar la influencia del manto de lodos en el comportamiento hidráulico en el interior del reactor piloto UASB para entender de mejor manera el flujo y el tiempo de retención.



## IX

Los Ensayos de Trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos se muestran a continuación, indicando los caudales promedios:

- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 01 con  $Q_p = 2.48$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 02 con  $Q_p = 2.58$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 03 con  $Q_p = 3.71$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 04 con  $Q_p = 3.57$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 05 con  $Q_p = 3.73$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 06 con  $Q_p = 3.56$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 07 con  $Q_p = 3.25$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 08 con  $Q_p = 3.61$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 09 con  $Q_p = 3.33$  ml/s

Para los Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos, la altura promedio del manto de lodos fue de 18cm con variación entre 17.5 y 19 cm. Se realizaron cinco (05) ensayos. El ensayo N°10 fue realizado con un manto de lodos, que luego fue removido y sustituido para realizar los ensayos N°11 y N°12 que al finalizados, se removió y sustituyo nuevamente el manto de lodos para los ensayos N°13 y N°14.

Los Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos se muestran a continuación, indicando los caudales promedios:

- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 10 con  $Q_p = 4.03$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 11 con  $Q_p = 3.46$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 12 con  $Q_p = 3.38$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 13 con  $Q_p = 3.53$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 14 con  $Q_p = 3.41$  ml/s

Para el análisis de los Ensayos de Trazadores con NaCl en ausencia y presencia de manto de lodos, se aplicaron el Análisis de la curva tendencia, el modelo simplificado de Wolf-Resnick, modelo de compartimentos, modelo de tanques en series y modelo de convección para flujo laminar.

El tiempo medio de residencia en el reactor piloto UASB (a escala 7:100) con un caudal promedio de 3.43ml/s (equivalente a 10l/s en el reactor UASB-UNITRAR) y una altura de manto de lodos equivalente a 2.50 metros en el reactor UASB-UNITRA (18 cm en el reactor piloto) es de 6 horas con 40 minutos.

De las comparaciones de los ensayos en ausencia y presencia de manto de lodos se concluyó:

1. Se observó que el tiempo medio de residencia en los ensayos en presencia del manto de lodos es en promedio 1.60 veces el tiempo de residencia hidráulico teórico.
2. De la investigación realizada se concluye que la presencia del manto de lodos reduce el tiempo medio de retención ( $t_m$ ) en 50%, siendo en promedio igual a 0.86 veces el tiempo de retención hidráulico teórico ( $t_o$ ), correspondiendo para el caudal de diseño de la unidad piloto (3.43 ml/s) un tiempo medio de retención ( $t_m$ ) promedio de 6 horas con 40 min para los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos y 12 horas con 8 minutos para los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos.
3. Los diferentes acomodamientos del manto de lodos influyen en la configuración de las canalizaciones dentro del manto de lodos, lo que se traduce en variaciones en los porcentajes de zonas muertas y en el tiempo medio de residencia.
4. De la comparación de los tipos de flujos que se desarrollan en el interior del reactor, se observó que el tipo de flujo predominante no cambia con

la presencia del manto de lodos, siendo este el flujo pistón con 60%, y además hay presencia de mezcla completa en el orden del 40% en ausencia de manto de lodos y entre 30 y 40% en presencia del manto de lodos. Por lo que se concluye que la presencia del manto de lodos no afecta en mayor medida al tipo de flujo predominante en el reactor.

5. De los ensayos de trazadores realizados en el reactor piloto UASB, en los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia del manto de lodos el 90% del fluido permanece dentro del reactor durante un tiempo mayor al tiempo de retención teórico, mientras que en los ensayos de trazadores con NaCl en presencia del manto de lodos se observó que más del 60% del fluido permanece en el reactor un tiempo menor al tiempo de retención teórico y solo una fracción del orden del 30% tiene una permanencia dentro del reactor de por lo menos el tiempo de retención teórico.
6. De los resultados obtenidos se observó que con caudales similares, el tiempo de retención teórico ( $t_0$ ) no tiene variaciones significativas, sin embargo el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) se ve reducido en aproximadamente 50% por la presencia del manto de lodos.
7. Se observó que el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) en ausencia del manto de lodos corresponde a 1.60 veces el tiempo de residencia teórico ( $t_0$ ), mientras que en presencia del manto de lodos el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) es del orden de 0.86 veces el tiempo de residencia teórico ( $t_0$ ).
8. Se observó que el tiempo modal ( $t_p$ ) se ve reducido en aproximadamente el 50% por la presencia del manto de lodos en el reactor y el tiempo en el que el trazador empieza a salir ( $t_i$ ) también se ve reducido, sin embargo el porcentaje de reducción depende del acomodamiento del manto de lodos.

9. De los modelos matemáticos utilizados en la investigación para el ajuste de la Curva E, experimental, se concluye que ningún modelo se ajusta a la perfección, sin embargo la curva E, experimental puede ser aproximado a los modelos por etapas, en una etapa temprana (región ascendente de la curva E) se asemeja a la Curva del modelo de Convección para Flujo Laminar y en una etapa tardía (región descendente de la curva E) se asemeja al Modelo de Tanques en Serie. En el modelo de Compartimentos la configuración que más se aproxima al comportamiento hidráulico del reactor objeto de esta investigación es el flujo pistón en serie con mezcla completa y presencia de zonas muertas. El modelo matemático de Dispersión Axial no pudo ser aplicado por no existir una expresión matemática para la construcción de la curva analítica para un grado de dispersión alto (valor de  $D/uL$  mayor de 0.01). Sin embargo encontrar un modelo matemático que se ajuste a la perfección a la curva E experimental y al comportamiento hidráulico del reactor en estudio no es un objetivo de esta investigación.
  
10. Se buscó desarrollar los ensayos de trazadores durante los meses de Diciembre y Enero, para realizarlos en un mismo clima, sin embargo la larga duración de los ensayos de trazadores, con duraciones de hasta 16 horas, hizo que el factor temperatura tuviera grandes fluctuaciones, llegando a temperaturas bajas de  $17^{\circ}\text{C}$  en las mañanas y en las noches hasta temperaturas de más de  $30^{\circ}\text{C}$  al medio día.

**ÍNDICE**

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
RESUMEN EJECUTIVO .....	IV
A. GENERALIDADES .....	IV
B. INVESTIGACIÓN.....	VI
ÍNDICE.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO, OBJETIVOS Y VARIABLES .....	2
A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1. ANTECEDENTE .....	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL HIPOTESIS .....	3
4. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION .....	3
B. OBJETIVOS.....	4
1. OBJETIVOS GENERALES.....	4
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
C. VARIABLES E INDICADORES .....	5
1. VARIABLES DEPENDIENTES.....	5

2. VARIABLES INDEPENDIENTES .....	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
A. REACTOR UASB.....	7
1. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA o UASB) ....	7
2. ZONAS DEL REACTOR UASB .....	7
3. PROCESOS ANAEROBIOS EN EL REACTOR UASB.....	8
4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL UASB .....	10
B. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y TRAZADORES.....	11
1. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.....	11
2. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO .....	11
3. TRAZADORES .....	12
4. PRUEBA DE TRAZADORES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RETENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE UN REACTOR .	13
5. DOSIFICACIÓN INSTANTÁNEA.....	13
6. MEDIDAS QUE SE DEBEN TOMAR PARA EL USO DE TRAZADORES .....	15
7. LIMITACIONES DE LA PRUEBA CON TRAZADORES:.....	15
C. MODELOS DE FLUJO DE CONTACTO .....	18
1. FLUJO INTERMITENTE.....	18
2. FLUJO CONTINUO .....	18
D. CONCEPTOS BÁSICOS DE FLUJO NO IDEAL.....	19
1. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO DE RESIDENCIA, DTR.....	20

2. ESTADO DE AGREGACIÓN DE LA CORRIENTE DEL FLUIDO .....	20
3. MEZCLADO INMEDIATO .....	21
E. CURVA E , DISTRIBUCIÓN DE EDAD DEL FLUIDO, .....	22
1. METODOS EXPERIMENTALES DE MEDIR LA CURVA E .....	24
F. CURVA F: FRACCIÓN ACUMULADA DE TRAZADOR DE SALIDA Y CURVA 1-F: FRACCIÓN DE TRAZADOR RETENIDO .....	27
G. ANÁLISIS DE LA CURVA TENDENCIA.....	30
H. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORÍA DE WOLF-RESNICK .....	32
I. MODELOS MATEMÁTICOS .....	34
1. MODELOS DE COMPARTIMIENTOS .....	35
CAPITULO III. METODOLOGÍA .....	38
A. METODOLOGÍA .....	39
1. UBICACIÓN DEL REACTOR MODELO.....	39
2. ELECCIÓN DEL REPARTIDOR DE CAUDAL .....	40
3. ELECCIÓN DEL TRAZADOR Y SU CONCENTRACIÓN .....	45
4. ELECCIÓN DEL CAUDAL .....	53
5. ELECCIÓN DEL MATERIAL Y ESCALA DEL REACTOR PILOTO UASB .....	57
6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO .....	60
7. ENSAYO DE TRAZADORES .....	73
CAPITULO IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	84
A. INTRODUCCION .....	84

B. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA Y LODO.....	87
1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE.....	87
2. CARACTERIZACIÓN DEL LODO.....	88
C. DETERMINACION DEL VOLUMEN ÚTIL EN EL REACTOR PILOTO UASB .....	89
D. PRIMER GRUPO: ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR.....	91
1. ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR EN AUSENCIA DE MANTO DE LODOS.....	92
2. ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR EN PRESENCIA DE MANTO DE LODOS.....	98
E. PRIMER GRUPO: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON COLOR.....	103
1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRAZADOR CON COLOR EN AUSENCIA DEL MANTO DE LODOS.....	103
2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRAZADOR CON COLOR EN PRESENCIA DEL MANTO DE LODOS.....	104
3. DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DEL MANTO DE LODOS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	105
F. SEGUNDO GRUPO: ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl.....	106
1. ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl EN AUSENCIA DE MANTO DE LODOS.....	107
2. ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl EN PRESENCIA DE MANTO DE LODOS.....	399
G. SEGUNDO GRUPO: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl .....	344



1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl EN AUSENCIA DEL MANTO DE LODOS .....	344
2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl EN PRESENCIA DEL MANTO DE LODOS...	353
3. ANALISIS DE LA CURVA F: TIEMPO DE CONTACTO .....	362
4. DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DEL MANTO DE LODOS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS. ....	364
CAPITULO V. CONCLUSIONES.....	369
CAPITULO VI. RECOMENDACIONES .....	374
CAPITULO VII. BIBLIOGRAFÍA.....	377
CAPITULO VIII. ANEXOS.....	380
A. ANEXO 1. MODELOS MATEMATICOS .....	382
1. MODELO DE DISPERSIÓN AXIAL.....	382
2. MODELO DE TANQUES EN SERIES.....	387
3. MODELO DE CONVECCIÓN PARA FLUJO LAMINAR.....	390
B. Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del Repartidor de Caudal Alternativa N°1 y Alternativa N°2 .....	394
C. Anexo N° 03: Esquema para la Construcción del Reactor Piloto UASB ..	408

**ÍNDICE DE FIGURAS:**

Figura 0.1.- Volumen del área útil y volumen de la zona muerta.....	VII
Figura II.1.- Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.....	8
Figura II.2.- Procesos Anaerobios .....	9
Figura II.3.- Aplicación del Trazador.....	13
Figura II.4.- Curvas Típicas de concentración del Trazador.....	14
Figura II.5.- Modelo de Flujo Intermitente .....	18
Figura II.6.- Modelos de Flujos Continuos .....	19
Figura II.7.- Ejemplos de Flujos no Ideales.....	20
Figura II.8.- Estados de Agregación .....	21
Figura II.9.- Mezclado inmediato y tardío de un fluido.....	22
Figura II.10.- Curva de Distribución de Edad o Curva E.....	23
Figura II.11.- Experimento con un Impulso de Rastreador .....	25
Figura II.12.- Transformación de la curva $C_{impulso}$ experimental en Curva E.....	26
Figura II.13.- Transformación de la curva E en la curva E Normalizada .....	26
Figura II.14.- Curva F: Análisis del Tiempo de Contacto .....	27
Figura II.15.- Relación entre las curvas E y F.....	28
Figura II.16.- Propiedades de las curvas de distribución de edad de salida (E) y fracción acumulada de trazador de salida (F), para varios patrones de flujo. ....	29
Figura II.17.- Concentración del trazador en el efluente de un reactor.....	30
Figura II.18.- Curva de 1-F(t) cantidad de trazador que pertenece en el reactor. .....	33

Figura II.19.- Algunos modelos de compartimentos, Curvas experimentales E.	36
Figura II.20.- Curvas de distribución más frecuentes.	37
Figura III.1.- Ubicación de la Planta UNITRAR.	39
Figura III.2.- Ubicación de la Planta Piloto dentro de la Planta UNITRAR.	39
Figura III.3.- Izquierda: Alternativa N°1, derecha: Alternativa N°2.	40
Figura III.4.- Bosquejo de Alternativa N°1	41
Figura III.5.- Dispositivo de carga constante.	43
Figura III.6.- Bosquejo de Alternativa N° 2	43
Figura III.7.- A la izquierda: Trazador con mayor densidad que el agua, se asienta en el fondo y la difusión en la masa de agua es lenta. A la Derecha: Trazador con densidad menor que del agua, asciende rápidamente generando cortocircuitos cinéticos.	46
Figura III.8.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N° 01.	47
Figura III.9.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°2.	48
Figura III.10.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°3.	49
Figura III.11.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°4.	50
Figura III.12.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°5.	51
Figura III.13.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°6.	52
Figura III.14.- Esquematación del ingreso del afluente	55
Figura III.15.- Sección transversal típica del reactor piloto UASB a escala 7:100	58
Figura III.16.- Detalles constructivos: Detalle de Estructura 01: Cámara separadora de gases, Detalle de Estructura 02: Deflector.	58

Figura III.17.- Ubicación de los deflectores.....	59
Figura III.18.- Distribución de las estructuras en la plancha de acrílico de 1.20mx1.80mx6mm. ....	59
Figura III.19.- Planta Piloto .....	60
Figura III.20.- Tanque de Almacenamiento.....	61
Figura III.21.- A la izquierda la fotografía y a la derecha el bosquejo del Dispositivo de Carga Constante .....	62
Figura III.22.- A la izquierda la fotografía y a la derecha el bosquejo de la Caja Repartidora de Caudal.....	62
Figura III.23.- Flotador y soporte para los 12 dispositivos de carga constante...	63
Figura III.24.- Dispositivo de carga constante.....	63
Figura III.25.- Ubicación del flotador y soporte dentro del repartidor de caudal. ....	63
Figura III.26.- Fotografía del Reactor piloto UASB de acrílico a escala 7:100 del reactor UASB-UNITRAR.....	64
Figura III.27: Sección transversal típica del reactor piloto UASB. ....	65
Figura III.28.- Diferentes configuraciones probadas para el ingreso en el fondo del reactor.....	65
Figura III.29.- Diferentes configuraciones probadas para el ingreso en el fondo del reactor. (Continuación).....	66
Figura III.30.- Esquema de la configuración de la estructura de Ingreso. ....	67
Figura III.31.- Vista de la tapa del reactor piloto UASB, se aprecian las válvulas para eliminar las burbujas de aire en el fluido y mantener la presión a niveles atmosféricos en la entrada al reactor.....	67

Figura III.32.- Ingresos en el fondo del reactor.....	68
Figura III.33.- Distribución de los 24 ingresos en el fondo del reactor piloto UASB.....	68
Figura III.34.- Distribución de las Canaletas de Recolección: se muestra la ubicación de las tuberías de recolección y la distribución de los orificios. ....	69
Figura III.35.- Sistema de recolección: Se observan las dos tuberías que trabajan como canales recolectando el afluente y juntando los caudales recolectados para luego liberarlos en un solo chorro (parte izquierda de la foto) .....	69
Figura III.36.- Orificio en la tubería de recolección. En la figura se observa como el trazador es recolectado hacia el orificio.....	70
Figura III.37.- Bosquejo del Inyector de Trazador.....	70
Figura III.38.- Ubicación del Inyección de Trazador en la Planta Piloto .....	71
Figura III.39.- Al finalizar el armado se forro el UASB para evitar la formación de algas por efecto de fotosíntesis, también se colocaron soportes de madera para evitar deformaciones en la estructura del reactor.....	72
Figura III.40.- Soporte en la base del reactor, con pata niveladoras por tornillos para asegurar que el reactor este nivelado en todo momento. ....	72
Figura III.41.- Preparación de la solución salina para saturar el manto de lodo. ....	74
Figura III.42.- Regulando caudales de salida del balde repartidor. ....	75
Figura III.43.- Mediciones de caudal durante la madrugada para verificar la continuidad en la aplicación de la solución saturadora.....	76
Figura III.44.- Concentración del trazador antes, durante y después del ensayo. ....	76

Figura III.45.- Medición de la conductividad.....	78
Figura III.46.- Medición del caudal de salida.....	79
Figura III.47.- Inyección de trazador.....	80
Figura III.48.- Verificación de paso de trazador a través de las válvulas y de los conductos.....	80
Figura III.49.- Determinación de cloruros.....	82
Figura IV.1.- Grupo N°01: Ensayos de Trazadores con Color: Ensayo de Trazador con Color en ausencia de manto de lodo y Ensayo de Trazador con Color en presencia de manto de lodos.....	85
Figura IV.2.- Grupo N°02: Ensayos de trazadores con NaCl: Ensayo de Trazador con NaCl en ausencia de manto de lodo y Ensayo de Trazador con NaCl en presencia de manto de lodos.....	86
Figura IV.3.- En la izquierda: resultado de la titulación del Análisis de Cloruros, en la derecha: resultado de la titulación del Análisis de Dureza.....	87
Figura IV.4.- En la foto se observa los materiales y equipos usados en la Determinación de dureza.....	88
Figura IV.5.- Visualización del Volumen Útil.....	89
Figura IV.6.- Esquema de las líneas de flujo observadas: El área verde representa el volumen que no interfiere como volumen útil.....	90
Figura IV.7.- Volumen del área útil y volumen de la zona muerta.....	90
Figura IV.8.- Distribución del volumen en el interior del reactor piloto UASB.....	91
Figura IV.9.- Formación de canalización en el manto de lodos.....	105
Figura IV.10.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos.....	347

Figura IV.11.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos .....	349
Figura IV.12.- Curvas de distribución típicas del Modelo de Compartimentos .	350
Figura IV.13.- Curva E para reactor de modelo de compartimentos de flujos pistón y mezcla completa con zonas muertas .....	351
Figura IV.14.- Comparación de la Curva Experimental con los Modelos Matemáticos: Ensayo de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodo. ....	352
Figura IV.15.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos .....	355
Figura IV.16.- Esquema de corrientes paralelas.....	356
Figura IV.17.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos .....	358
Figura IV.18.- Curva E para reactor de modelo de compartimentos de flujos pistón y mezcla completa con zonas muertas .....	359
Figura IV.19.- Curvas de distribución típicas del Modelo de Compartimentos .	360
Figura IV.20.- Comparación de la Curva Experimental con los Modelos Matemáticos: Ensayo de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodo. ....	361
Figura IV.21.- Vista lateral del reactor piloto UASB: Se observan las canalizaciones .....	366
Figura IV.22.- Esquema de la parte sólida y floculenta del manto de lodos. ....	367
Figura IV.23.- Curvas E experimental de los ensayos de trazadores con NaCl con ausencia y presencia de manto de lodos.....	367
Figura VIII.1.- Dispersión del rastreador en el Modelo de Dispersión .....	382

Figura VIII.2.- Varianza del rastreador en el Modelo de Dispersión .....	384
Figura VIII.3.- Representación del Modelo de Dispersión .....	384
Figura VIII.4 .- Relación entre $D/uL$ y la curva adimensional E estándar.....	386
Figura VIII.5.- Modelo de Tanques en Serie.....	388
Figura VIII.6.- Propiedades de la curva DTR.....	389
Figura VIII.7.- Concentración del trazador en el efluente de un reactor. ....	390
Figura VIII.8. .- Diferentes formas de introducir y medir el rastreador.....	391
Figura VIII.9.- Diferentes combinaciones de los métodos de entrada-salida....	391
Figura VIII.10.- Observar lo diferente que son las curvas de salida, dependiendo de cómo se introduce y mide el rastreador.....	392



**ÍNDICE DE CUADROS:**

Cuadro 0.1.- Caracterización del agua potable. ....	VI
Cuadro 0.2.- Caracterización del lodo. ....	VII
Cuadro III.1.- Resumen de las Pruebas de Calibración de la Alternativa N°1 para la elección del repartidor de caudal. ....	41
Cuadro III.2.- Resumen de las Pruebas de Calibración de la Alternativa N°2 para la elección del repartidor de caudal. ....	44
Cuadro III.3.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 01 .....	47
Cuadro III.4.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 02 .....	48
Cuadro III.5.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 03 .....	49
Cuadro III.6.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 04 .....	50
Cuadro III.7.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 05 .....	51
Cuadro III.8.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 06 .....	52
Cuadro III.9.- Datos del caudal afluente promedio (Qp) al reactor piloto UASB. ....	56
Cuadro III.10: Frecuencias de muestreo.....	81
Cuadro IV.1.- Caracterización del agua potable. ....	87
Cuadro IV.2.- Caracterización del lodo. ....	89
Cuadro IV.3.- Cuadro resumen de parámetros obtenidos para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos .....	344
Cuadro IV.4.- Cuadro resumen de las relaciones de los parámetros para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos .....	346

Cuadro IV.5.- Cuadro resumen de porcentajes de flujos de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos .....	348
Cuadro IV.6.- Cuadro resumen de los parámetros obtenidos para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos .....	353
Cuadro IV.7.- Cuadro resumen de las relaciones de parámetros para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos .....	354
Cuadro IV.8.- Cuadro resumen de porcentajes de flujos existentes de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos.....	357
Cuadro IV.9.- Cuadro resumen de los tiempos de permanencia en el reactor, Ensayo de Trazadores con NaCl en Ausencia de manto de lodos.....	362
Cuadro IV.10.- Cuadro resumen de los tiempos de permanencia en el reactor, Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos.....	363
Cuadro IV.11.- Cuadro resumen de los tiempos característicos para el análisis de la Curva Tendencia de los Ensayos de Trazadores con NaCl .....	364
Cuadro IV.12.- Cuadro resumen de las relaciones para el Análisis de la Curva Tendencia de los Ensayos de Trazadores con NaCl.....	365
Cuadro IV.13.- Cuadro resumen de los porcentajes de flujo obtenido por el Modelo Simplificado de Wolf y Resnick de los Ensayos de Trazadores con NaCl. ....	365

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas anaerobios están siendo ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. En estos procesos se pueden encontrar los tres estados de la materia (sólidos, líquido y gas) y la interacción entre estos está relacionada directamente con procesos de tratamiento que se pueden optimizar si se le procuran las condiciones hidrodinámicas más adecuadas. Sin embargo, no existen muchas investigaciones referidas al comportamiento hidrodinámico.

Las condiciones hidrodinámicas son las características de flujo, régimen de mezcla, tiempo medio de residencia, geometría del reactor, estado de agregación de elementos del fluido, etc.

El comportamiento hidrodinámico de reactores puede evaluarse siguiendo el método experimental estímulo-respuesta, en el que se inyecta en el afluente un trazador de concentración conocida, fácilmente detectable y que no participe en ninguno de los procesos físicos y químicos que puedan alterar la hidrodinámica real del fluido.

Generalmente este comportamiento se evalúa mediante pruebas de trazadores, con la cual se halla una curva de concentración de trazador, la forma que toma la curva da una primera indicación del comportamiento hidrodinámico del reactor. A partir de esta curva puede obtenerse la función de distribución del tiempo de residencia conocida como Curva  $E(t)$  o DTR que a su vez permite determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) real y la aplicación de diferentes modelos matemáticos para analizar el comportamiento del reactor.

Entre los modelos matemáticos más conocidos se encuentran el Método de Wolf-Resnick, el Modelo de Compartimentos, el Modelo de Dispersión Axial, el Modelo de Tanques en Serie, y el Modelo de Convección para Flujo Laminar.

## CAPITULO I. PLANTEAMIENTO, OBJETIVOS Y VARIABLES

### A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1. ANTECEDENTE

En el Perú existen pocos Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente y los estudios que existen han sido orientados a la observación y mejoramiento en la eficiencia de las reacciones bioquímicas dejando el comportamiento hidráulico de lado, en un papel poco protagónico, y aunque a nivel de Latinoamérica se han realizado investigaciones orientados a la observación y estudio del comportamiento hidráulico, estas han sido pocas y con resultados antagónicos, como por ejemplo:

- En una investigación realizada por Diana Arroyave, Maribel Gonzales y Dario Gallego se observó que existen grandes porcentajes de zonas muertas que disminuyen la eficiencia del reactor y el volumen útil es reducido en más de 50%.
- En lo pertinente al tipo de flujo que se desarrolla en el interior del reactor se encontró que flujo predominante es de mezcla completa (66%), también se recalca la importancia de las zonas muertas en los problemas hidráulicos de la unidad (*D. Gallego y J. Montoya*), sin embargo en otra investigación se observó un flujo dual (32% flujo pistón y 37% mezcla completa), zonas muertas (20%) y ausencia de cortos circuitos; adicionalmente, la modelación del reactor indicó un grado de dispersión elevado (*Andrea Pérez, Facultad De Ingeniería, Escuela Eidenar, Colombia, Mayo De 2008*).
- En una investigación sobre los modelos matemáticos se encontró que el comportamiento hidráulico real se desarrolló en modelos compartimentados (*Matilde López, Mercedes Rodríguez, Rigoberto Escobedo, María Espinosa.*).

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El proyecto de tesis **“DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE EN LA PLANTA UNITRAR”** busca responder a las preguntas:

¿Cuál es el tiempo de retención hidráulico real en un Reactor con características geométricas similares al UASB- UNITRAR? y ¿Qué tipos de flujo predomina en el interior de un reactor piloto UASB con características geométricas similares al reactor UASB – UNITRAR?

## **3. PLANTEAMIENTO DEL HIPOTESIS**

El tiempo de retención hidráulico real en el Reactor UASB- UNITRAR es de 8 horas con un caudal promedio de 10 litros por segundo y el tipo de flujo que predomina en el UASB – UNITRAR es el flujo Pistón.

## **4. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION**

En los últimos años con la creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente, ha existido una gran evolución en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo el diseño de las plantas de tratamiento ha estado centrado principalmente en la reacción química o bioquímica donde los aspectos de hidrodinámica no tenían mayor importancia. Con base en el conocimiento alcanzado sobre los procesos que tienen lugar durante el tratamiento se ha demostrado la importancia de la hidrodinámica en la mejora de la eficiencia de estos sistemas.

La mayor parte de los procesos de tratamiento biológico se caracterizan por la presencia de varias fases y además por la interacción entre las mismas, en estos sistemas la principal variable a ser cuantificada para la evaluación de los aspectos hidráulicos, es la característica de tiempo de residencia hidráulico que

está definida como la distribución de los tiempos de residencia de los elementos de un fluido dentro del sistema (Curva de Distribución de Edades del Fluido o Curva E). La característica de tiempo de residencia hidráulico se cuantificará a través de la curva de distribución que se obtiene de medir el cambio en la conductividad del fluido a causa de un trazador salino que será inyectado en forma puntual al sistema, de esta manera se pretende encontrar el tiempo medio de residencia y el tipo de flujo predominante en un modelo de reactor piloto UASB de características geométricas similares al existente en UNITRAR.

## **B. OBJETIVOS**

### **1. OBJETIVOS GENERALES**

“El objetivo principal del presente proyecto de tesis es la determinación del tiempo de retención hidráulico real en un reactor piloto UASB modelo a escala 7:100 del reactor UASB-UNITRAR”.

### **2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Determinación de la relación entre el tiempo de retención teórico y el tiempo de retención real (tiempo medio de residencia).
- Determinación del Volumen útil dentro del reactor piloto UASB.
- Determinación del tipo de flujo dominante en el interior del reactor piloto UASB.
- Determinación de los porcentajes de zonas muertas y cortocircuitos presentes en el interior del reactor piloto UASB.
- Encontrar la configuración que mejor se ajuste al comportamiento hidráulico del reactor piloto UASB, según el Modelo de Compartimentos.

- Comparación de la curva experimental con los modelos matemáticos de Dispersión Axial, Tanques en Serie y Conexión para Flujo Laminar.

## **C. VARIABLES E INDICADORES**

### **1. VARIABLES DEPENDIENTES**

- Caudal afluente
- Tiempo de Retención hidráulico
- Tipo de Trazador
- Concentración de trazador NaCl
- Presencia o Ausencia del manto de lodos
- Altura del manto de lodos

### **2. VARIABLES INDEPENDIENTES**

- Características físico químicas del agua
- Temperatura del agua
- Temperatura ambiental
- pH
- Concentración del lodo.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo contiene las definiciones necesarias para poder comprender la investigación. Por lo tanto iniciaremos definiendo que es un reactor UASB, las partes que lo componen, así como las reacciones que ocurren en este.

Posteriormente definiremos algunas condiciones hidrodinámicas básicas para el desarrollo de esta investigación como son los tiempos de retención hidráulica y los tipos de flujos que se desarrollan en un reactor en general. Además de la influencia de uno con el otro.

Más adelante definiremos los trazadores, así como los ensayos de trazadores para la determinación del tiempo de retención hidráulico real en un reactor. Se explicará los tipos de dosificación más usados en estos ensayos, y se explicará aún más en la dosificación instantánea que es la que se usó en el desarrollo de la investigación. Indicando también las consideraciones que se deben tener presente para obtener resultados confiables.

Finalmente nos enfocaremos ampliamente en los modelos matemáticos para la determinación del tiempo de retención hidráulico y el predominio del tipo de fluidos presentes en un reactor piloto UASB con datos experimentales. Los modelos son: Modelo de Dispersión, Modelo de Tanques en Serie, Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick, Modelo de Compartimentos y Modelo de Convección para Flujo Laminar. Estos cuatro modelos son los usados para en el análisis de los datos experimentales de las pruebas de trazadores, que serán desarrollados en el CAPITULO IV. (pág. 84).



## A. REACTOR UASB

### 1. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA o UASB)

El Reactor UASB consiste en un tanque dentro del cual se acumula por sedimentación biomasa en forma de lodo. El substrato orgánico a degradar, se introduce a través de un sistema de distribución localizado en el fondo donde se pone en contacto con la biomasa, por acción del flujo ascendente. Esta biomasa, compuesta por microorganismos anaeróbicos, estabiliza el substrato produciendo biogás y más biomasa. El biogás está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

El movimiento hacia arriba de las burbujas de gas liberado causa turbulencias hidráulicas que proporcionan al reactor una mezcla sin necesidad de partes mecánicas. Una estructura especial, deflectores, localizada en la parte superior separa el biogás, el fluido y la biomasa. El biogás es acumulado en el centro superior por variación de densidad. El lodo por sedimentación, es confinado en la parte inferior del tanque formando un manto.

### 2. ZONAS DEL REACTOR UASB

Los reactores UASB constan de tres zonas bien diferenciadas:

- a) **Manto de lodos anaeróbico.** Esta sección del tanque es ocupada por una biomasa altamente activa con concentraciones alrededor de 100 gr/lit en forma de gránulos de 0.5 a 2 mm de diámetro, de densidad 1.0 a 2.0 g/ml <sup>(1)</sup> que tienen una alta velocidad de sedimentación de esa manera resiste el flujo ascendente. En el manto de lodos queda retenida la

---

<sup>(1)</sup> Página web [http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101\\_tubo.htm](http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101_tubo.htm)

materia orgánica suspendida y soluble, la cual es fermentada y convertida básicamente en biogás.

- b) **Sedimentador.** Se debe proveer condiciones de flujo tranquilo para que la materia supra-coloidal sedimente y regrese a la cámara de digestión.
- c) **Separador gas-líquido.** En la parte superior del reactor se proveen colectores para atrapar el biogás producido y utilizarlo como un sustituto energético cuando esto sea económicamente posible.

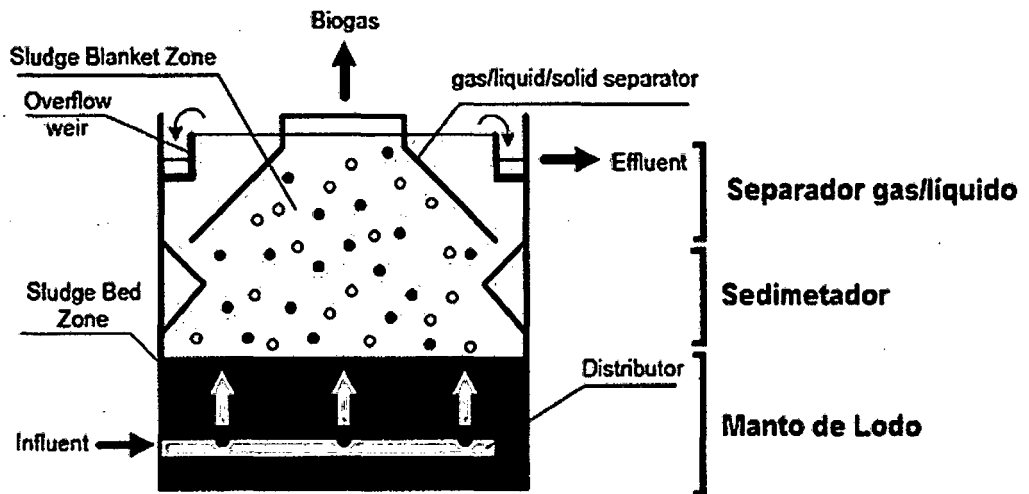


Figura II.1.- Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

### 3. PROCESOS ANAEROBIOS EN EL REACTOR UASB

La digestión anaerobia de la materia orgánica, produce biogás y un pequeño exceso de lodos. De manera cualitativa tenemos:

DBO (100%) ——— DBO (5-15%) + Biomasa (5-10%) + Biogás (75-80%)

### Procesos Anaerobios:

1. **Hidrólisis:** Los compuestos orgánicos (proteínas, carbohidratos y lípidos) se convierten en compuestos orgánicos simples (azúcares, aminoácidos, etc).
2. **Acidogénesis:** Los compuestos orgánicos simples (azúcares, aminoácidos, etc) se convierten en ácidos orgánicos, ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y nuevas células.
3. **Acetogénesis:** Los ácidos orgánicos se convierten en acetato,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y nuevas células.
4. **Metanogénesis:** Donde el acetato, el hidrógeno y carbonato, se convierten en el  $\text{CH}_4$ , el  $\text{CO}_2$  y nuevas células asunto.

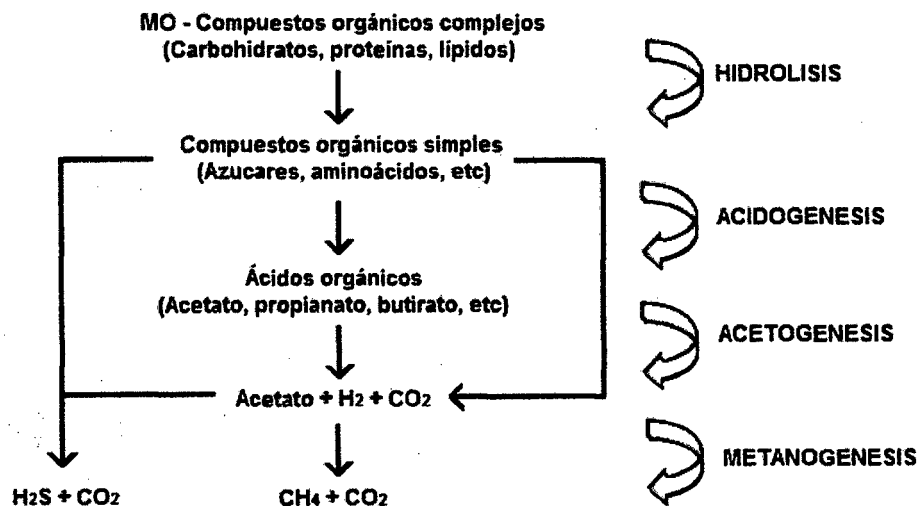


Figura II.2.- Procesos Anaerobios

#### **4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL UASB**

##### **a) VENTAJAS:**

- Construcción de bajo costo, no requiere de suministro de energía eléctrica, en comparación con tratamientos convencionales. No requiere de ningún tipo de soporte para la retención de biomasa, ni agitación mecánica. Puede aplicarse en pequeña y gran escala.
- Con un inóculo apropiado se reduce el tiempo de letargo, este sistema puede soportar periodos sin alimentación (semanas y meses).
- Conserva los nutrientes en el efluente (N y P), de gran beneficio para el reuso en riego. El sistema tiene buenas eficiencias de remoción de huevos de helmintos (alrededor de 90%). La producción de lodos en exceso es baja y tiene muy buenas características de compactación. Además el biogás producido puede ser un subproducto energético valioso.
- El proceso en sí es simple y económico en operación y mantenimiento.

##### **b) DESVENTAJAS:**

- No es un tratamiento completo, se requiere de un postratamiento para remover en mayor grado la materia orgánica.
- Arranque lento si no se cuenta con el inóculo adecuado.
- Como todo proceso biológico es sensible a la temperatura y a cambios bruscos de pH fuera del intervalo de 6.5 a 7.5.
- El reactor UASB es un proceso relativamente sencillo de operar con desagüe de tipo doméstico, esto no implica que no se requiera de atención y cuidado en el diseño y operación. No puede esperarse que un reactor con fallas en el diseño hidráulico tenga un buen desempeño. Un buen diseño debe de partir de la carga hidráulica y la carga orgánica como parámetros de diseño fundamental.

## B. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y TRAZADORES

### 1. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

#### a) TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO REAL

Denominado también tiempo medio de residencia o permanencia. Es el tiempo promedio ( $t_m$ ) en el que el fluido de caudal ( $Q$ ) pasa a través del reactor del volumen ( $V$ ). Este tiempo medio de residencia depende directamente del tipo de flujo que existe en el reactor.

#### b) TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO TEÓRICO

Es el tiempo que teóricamente debe transcurrir para que el efluente pase a través del reactor, suponiendo que todo el fluido se mueva a una velocidad uniforme; matemáticamente es igual al volumen del reactor dividido entre el caudal:

$$t_0 = \frac{V}{Q} \quad \text{Ec. II.1}$$

Dónde:

- $t_0$ : Tiempo de retención hidráulico teórico
- $V$ : Volumen total
- $Q$ : Caudal

### 2. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

En los reactores el tiempo de retención hidráulico ( $t_0$ ) es distinto para las diferentes fracciones del volumen ( $V$ ) que entra en el tiempo  $t = 0$ . Es necesario, por tanto, estudiar la distribución del tiempo de retención hidráulico en el reactor, para poder conocer la forma como ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento.

La importancia de la influencia del tiempo de retención hidráulico queda demostrada en la eficiencia del reactor. La variación del tiempo de retención hidráulico real en menos tiempo con respecto al tiempo de retención hidráulico teórico (cortocircuito hidráulico) o en más tiempo (espacios muertos) produce apreciables disminuciones en la eficiencia.

### 3. TRAZADORES

Los trazadores son sustancias que se usan para la evaluación de la operación de las unidades de plantas de tratamiento que cumplen las siguientes características: no debe ser degradable, al menos durante su utilización, no debe alterar las propiedades físico químicas del agua al ser añadido, además de no tóxico ni nocivo.

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- Colorantes como fluoresceína o rodamina.
- Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros o nitratos.
- Elementos radiactivos como isótopos.

Los trazadores se utilizan principalmente para determinar los tiempos de retención hidráulico reales y sus principales características concomitantes como: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción.

#### 4. PRUEBA DE TRAZADORES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RETENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE UN REACTOR

La sustancia trazadora es aplicada en la entrada del reactor a evaluar, simultáneamente se comienza a registrar la concentración del trazador a la salida del reactor. Ver Figura II.3.

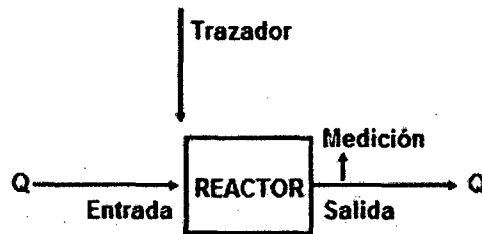


Figura II.3- Aplicación del Trazador

La aplicación del trazador puede hacerse en forma continua o instantánea. La aplicación instantánea resulta ser el método más usado en las evaluaciones de plantas.

#### 5. DOSIFICACIÓN INSTANTÁNEA

Se aplica una concentración ( $C_0$ ) a la entrada de la unidad en evaluación en un tiempo muy corto, inferior a  $1/30$  del tiempo de retención hidráulico teórico ( $t_0$ ) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa del afluente de la unidad que se piensa analizar.

En la dosificación instantánea, la concentración ( $C_0$ ) que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el afluente. Para el caso del uso del ion cloruro como trazador, es común usar concentraciones de entre 30 y 50 mg/L.

La cantidad de trazador  $P$  (kg) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \times K \times Co}{I \times 10^3} \quad \text{Ec. II.2}$$

Donde:

- $P$  = peso del trazador por añadir al reactor, kg
- $V$  = volumen útil del reactor, m<sup>3</sup>
- $K$  = constante de corrección
- $Co$  = concentración, mg/L o g/m<sup>3</sup>
- $I$  = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

$$K = \frac{\text{Peso de NaCl}}{\text{PesoCl}} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65 \quad \text{Ec. II.3}$$

La representación de la variación de la concentración del trazador en función del tiempo y el flujo predominante, se representa en la Figura II.4 .

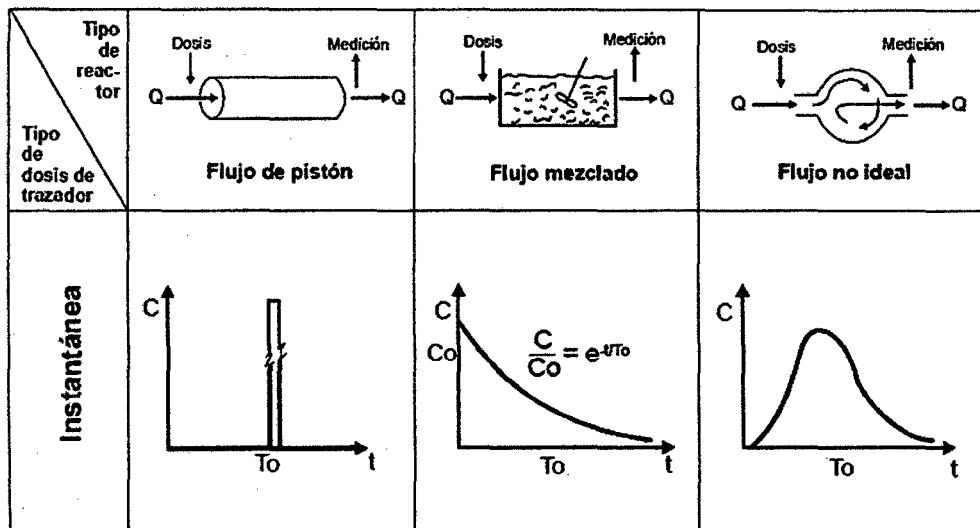


Figura II.4.- Curvas Típicas de concentración del Trazador



## **6. MEDIDAS QUE SE DEBEN TOMAR PARA EL USO DE TRAZADORES**

Un ensayo de trazadores consiste en agregar la sustancia trazadora en el afluente del reactor que se quiere analizar, con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo.

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el fluido y seleccionar aquella que se presente en concentración constante o muy baja.

Es conveniente, además, escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el afluente. Por tanto, la concentración total que se determine a la salida será sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada. Esta es la razón por la cual elementos como el cloro son malos trazadores. Por supuesto, en todos los casos hay que esperar que se pierda algo de trazador.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas, resulta muy común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de plantas de tratamiento el ion cloruro obtenido de la aplicación del cloruro de sodio. El cloruro de sodio es de fácil obtención y bajo costo. Asimismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad.

## **7. LIMITACIONES DE LA PRUEBA CON TRAZADORES:**

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

Por otra parte, los datos tampoco dicen nada sobre la eficiencia de los reactores, pues estos procesos dependen no solo de las características hidráulicas de los reactores sino también de factores de tipo químico y biológico.

Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina tampoco las trayectorias de las partículas, del flujo o de cómo éste se distribuye en el reactor. Por lo que indica el tiempo medio de residencia pero no su trayectoria.

Además, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones para obtener resultados significativos:

- El flujo debe ser constante durante la realización del ensayo.
- De preferencia conviene estabilizar el reactor para evitar interferencias, para lo cual es apropiado dosificar continuamente pequeñas dosis de trazador por un periodo de tiempo igual al del ensayo, antes de la evaluación.
- El uso de altas concentraciones de trazador podría producir corrientes cinéticas por variación de densidad, lo que daría resultados erróneos, por lo cual es preferible el uso de métodos de dosificación continua o con bajas concentraciones.
- La variación de la temperatura del medio ambiente o del afluente ocasiona alteraciones en los resultados al producir corrientes térmicas, cuyos efectos se deben considerar.
- El trazador debe aplicarse completamente disuelto en el afluente. Aplicar parte del trazador en sólido induce a error en el ensayo: el trazador demorará en salir del reactor, pero esta demora no será por la existencia de espacios muertos sino porque al trazador le toma un mayor tiempo disolverse y salir de la unidad.
- Las mediciones de la concentración del trazador a la salida del reactor se realizan a través de la medición de la conductividad. Existe una relación directa entre la concentración del ion cloruro en el agua y la conductividad. Las mediciones de conductividad son fáciles y rápidas en comparación con las mediciones del ion cloruro.

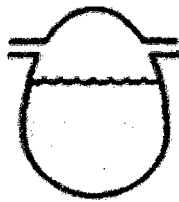
- Solo se recomienda realizar las mediciones de la concentración del trazador en términos del ion cloruro cuando se miden caudales. La determinación de caudales a través de un ensayo de trazadores demanda mediciones más precisas.
- Las curvas resultantes del ensayo de trazadores en el mismo reactor deben tener igualdad de resultados, especialmente en lo relacionado con el tiempo inicial de presentación del trazador y el de máxima concentración, los valores de concentración máxima y las áreas bajo la curva.
- Considerando que las mediciones de la concentración del trazador se realizarán a través de la conductividad, se deben realizar continuas mediciones de este parámetro en el afluente durante el ensayo. Esta información es útil para estar seguros de que la conductividad no ha variado o, en el caso de que exista variación, tener en cuenta este nuevo valor para decidir en qué momento se debe concluir el ensayo.
- La toma de muestras en la salida del reactor en evaluación debe extenderse hasta obtener por lo menos en tres mediciones consecutivas el valor de concentración inicial ( $C_0$ ) del trazador.

## C. MODELOS DE FLUJO DE CONTACTO

### 1. FLUJO INTERMITENTE

Cuando hablamos de un flujo intermitente nos referimos a un volumen estático durante el proceso de tratamiento, no hay ingreso ni salida de fluido. La composición es uniforme en cualquier punto del reactor, pero evidentemente la composición cambia con el tiempo. Este flujo es usual en pruebas de laboratorio.

### Flujo Intermitente



*Figura II.5.- Modelo de Flujo Intermitente*

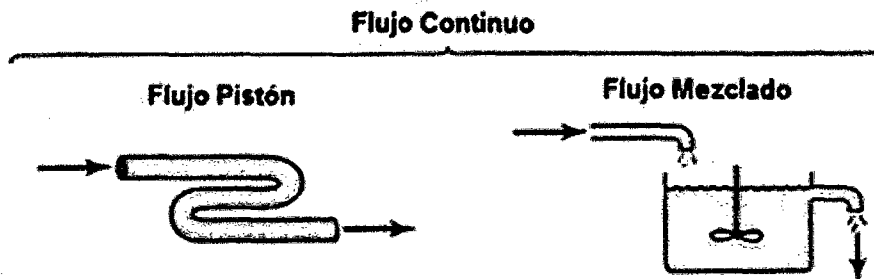
### 2. FLUJO CONTINUO

#### a) FLUJO PISTÓN

Se considera que todas las partículas del fluido permanecen en la unidad el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos, además no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad.

### b) FLUJO MEZCLADO

Todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida del reactor es igual a la existente en todo el reactor.



*Figura II.6.- Modelos de Flujos Continuos*

### c) FLUJOS NO IDEALES

Corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo pistón y flujo mezclado (mezcla completa) con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Este flujo es usual en las unidades de tratamiento en las plantas.

### D. CONCEPTOS BÁSICOS DE FLUJO NO IDEAL

Los patrones de flujo pistón y de flujo mezclado, son los que se prefieren para la mayoría de los diseños de reactores, claro que no se cumplen en su totalidad, pero si se acercan mucho. Existen tres factores interrelacionados que configuran el comportamiento real del fluido:

- La distribución de tiempos de residencia (DTR) de la corriente que fluye a través del reactor.
- El estado de agregación del material que fluye, su tendencia a formar grupos de moléculas que se mueven juntas.

- El mezclado inmediato o tardío del material del reactor

### 1. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO DE RESIDENCIA, DTR

Las desviaciones con respecto a los dos patrones ideales de flujo son causadas por la canalización o la recirculación del fluido o por zonas estancadas o muertas en el reactor, estas características del comportamiento hidráulico disminuye el rendimiento del reactor. Ver Figura II.7.

Necesitamos conocer cuánto tiempo permanece cada una de las moléculas en el recipiente, ósea, la distribución de los tiempos de residencia de la corriente de flujo. Esta información se puede determinar con el método de concentración de trazador.

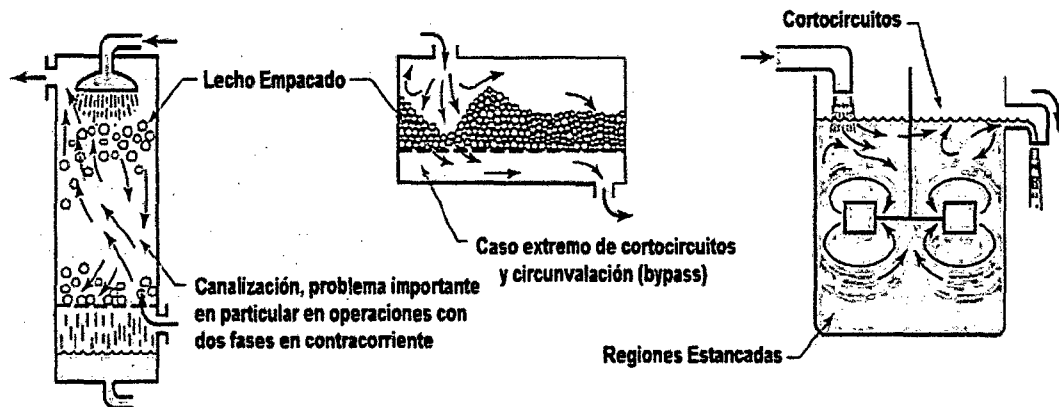


Figura II.7.- Ejemplos de Flujos no Ideales

### 2. ESTADO DE AGREGACIÓN DE LA CORRIENTE DEL FLUIDO

El material que fluye está en un determinado estado de agregación, dependiendo de su naturaleza. En los extremos, estos estados pueden llamarse microfluidos y macrofluidos, tal como se esquematiza en la Figura II.8.

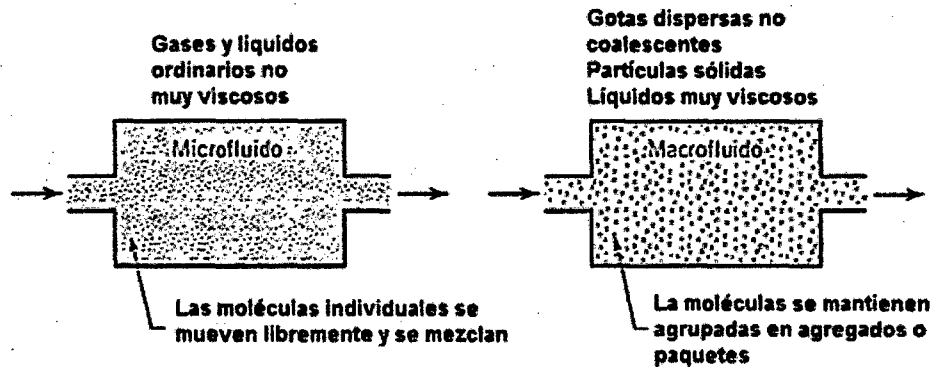


Figura II.8.- Estados de Agregación

**Sistema de una Fase.** Estos sistemas se encuentran en algún punto entre los dos extremos de macrofluidos y microfluidos.

**Sistema de dos Fases.** Una corriente de sólidos siempre se comporta como un macrofluido, pero para un gas que reacciona con un líquido puede ser cualquiera de las fases, dependiendo del modelo de contacto que se esté utilizando.

### 3. MEZCLADO INMEDIATO

Los elementos de fluido de una sola corriente pueden mezclarse entre sí cuando fluyen a través del recipiente, ya sea de inmediato o tardío. Este factor no tiene un gran efecto sobre el comportamiento general de una sola corriente de fluido. Sin embargo resulta muy importante para un sistema de dos corrientes entrantes de reactivas. Ver Figura II.9.

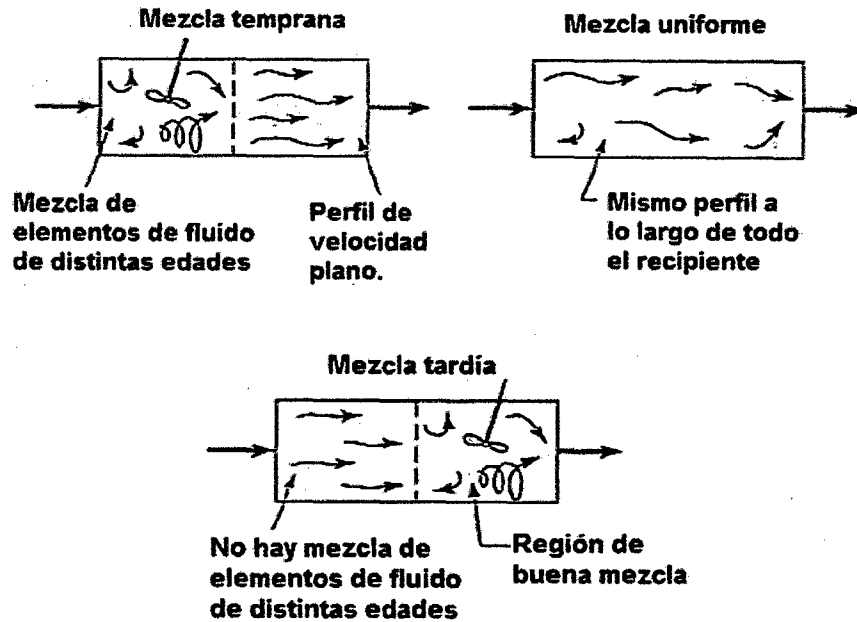


Figura II.9.- Mezclado inmediato y tardío de un fluido

En algunas situaciones uno de estos tres factores puede ignorarse; en otras, puede llegar a ser crucial. Frecuentemente, mucho depende del tiempo de reacción  $\bar{t}_{rx}$ , del tiempo de mezclado  $\bar{t}_{mix}$  y del tiempo de residencia en el recipiente  $\bar{t}_{stay}$ . En muchos casos,  $\bar{t}_{stay}$  tiene un significado algo parecido a  $\bar{t}_{mix}$ , pero más amplio.

#### E. CURVA E , DISTRIBUCIÓN DE EDAD DEL FLUIDO,

Se denomina distribución de la edad a la salida (*curva E*) o distribución de tiempos de residencia (DTR) del fluido a la distribución de los tiempos que le toma a cada elemento de un fluido, que siguen diferentes caminos a lo largo del reactor, para pasar a través de él. Esta curva nos da una idea clara de la fracción del fluido que tiene un tiempo de residencia determinado. La función E tiene unidades de tiempo elevado al menos uno (ejemplo:  $s^{-1}$  o  $min^{-1}$ ).



Para la comparación con los modelos matemáticos es conveniente representar la DTR de tal manera que el área bajo la curva sea la unidad, o sea:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad \text{Ec. II.4}$$

Este proceso se denomina normalización de la distribución y la curva resultante se denominara Curva E Normalizada o Curva  $E_0$ , Figura II.10.

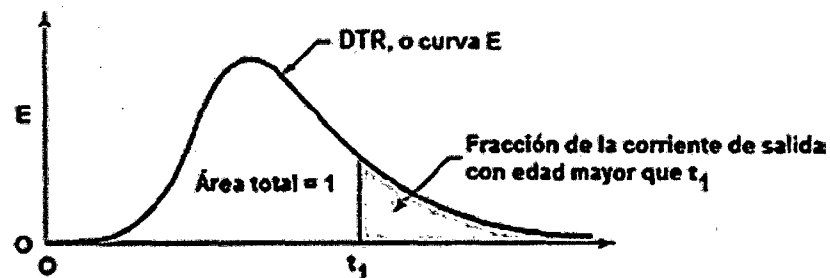


Figura II.10.- Curva de Distribución de Edad o Curva E

En la *curva E*, el fluido sólo entra y sale una vez del recipiente. Esto significa que no debe haber flujo, difusión o remolinos en la dirección contraria al flujo en la entrada o a la salida del recipiente. Esto es lo que se denomina condiciones de frontera de recipiente cerrado.

Cuando los elementos del fluido cruzan los límites del sistema más de una vez se le conoce como condiciones de frontera de recipiente abierto.

De acuerdo con esta representación, la fracción de corriente de salida cuya edad está comprendida entre  $t$  y  $t + dt$  es:

$$E dt \quad \text{Ec. II.5}$$

La fracción con edad menor ("más joven") a  $t_1$ , es:

$$\int_0^{t_1} E dt \quad \text{Ec. II.6}$$

Mientras que la fracción de material con edad superior a  $t_1$  ("más vieja"), representada por el área sombreada en la Figura II.10, es:

$$\int_{t_1}^{\infty} E dt = 1 - \int_0^{t_1} E dt \quad \text{Ec. II.7}$$

La *curva E* es la distribución que se necesita para tener en cuenta el flujo no ideal.

## 1. METODOS EXPERIMENTALES DE MEDIR LA CURVA E

El método más simple y directo de encontrar la curva E utiliza un rastreador físico que no reacciona. Sin embargo, para propósitos especiales se podría querer utilizar un rastreador reactivo.

### a) EXPERIMENTO CON IMPULSO

Encontrar la *curva E* para un recipiente de volumen  $V \text{ m}^3$  a través del cual fluyen  $v \text{ m}^3/\text{s}$  del fluido. Se introducen instantáneamente  $M$  unidades de rastreo (kg o moles) en la corriente de entrada al recipiente y se mide la concentración-tiempo del rastreador que abandona el recipiente. Esta es la curva  $C_{\text{impulso}}$ . A partir del balance de material se encuentra las siguientes formulas:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Área bajo la} \\ \text{curva } C_{\text{impulso}} \end{array} \right): A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M}{v} \quad \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Ec. II.8}$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Media de la} \\ \text{curva } C_{\text{impulso}} \end{array} \right): \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{v} \quad [\text{s}] \quad \text{Ec. II.9}$$

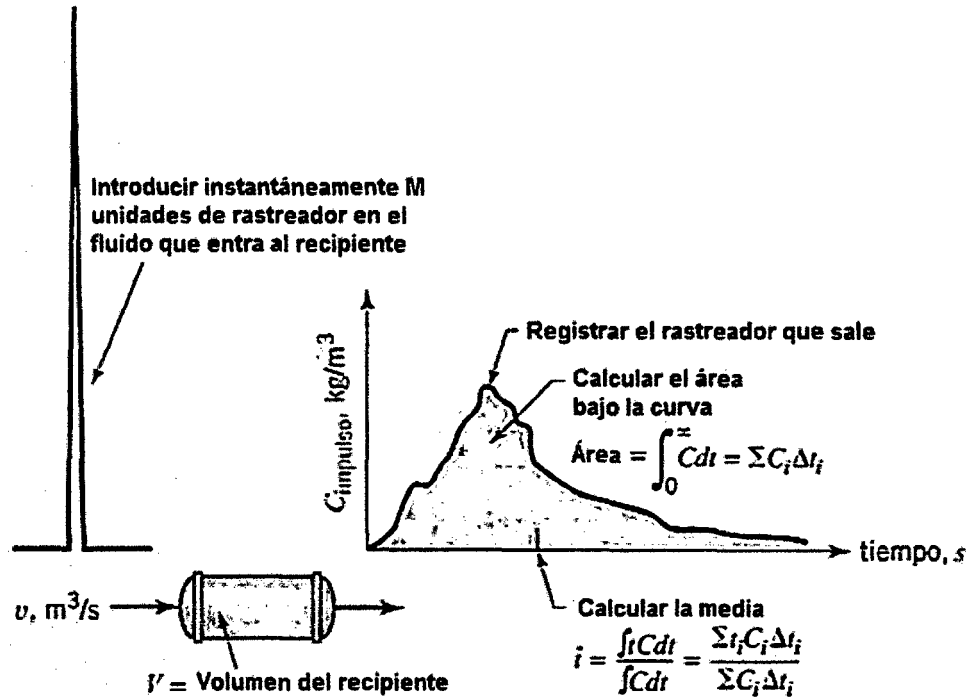


Figura II.11.- Experimento con un Impulso de Rastreador

Para encontrar la *curva E* a partir de la *curva C<sub>impulso</sub>* se ha de cambiar simplemente la escala de concentración, de forma que el área bajo la curva sea la unidad. Así simplemente dividir las lecturas de concentración por  $M/v$ , como se muestra en la Figura II.12.

$$E = \frac{C_{\text{impulso}}}{M/v} \quad \text{Ec. II.10}$$

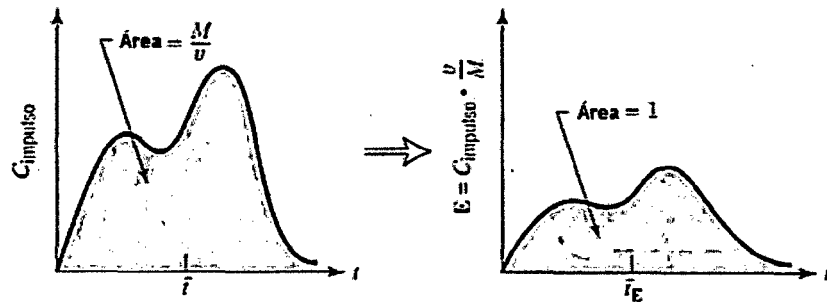


Figura II.12.- Transformación de la curva  $C_{impulso}$  experimental en Curva  $E$

Se tiene otra función DTR, la  $E_{\theta}$ . Aquí el tiempo se mide en función del tiempo medio de residencia  $\theta = t/\bar{t}$ . Así:

$$E_{\theta} = \bar{t} E = \frac{v}{v} \cdot \frac{C_{impulso}}{M/v} = \frac{v}{M} C_{impulso} \quad \text{Ec. II.11}$$

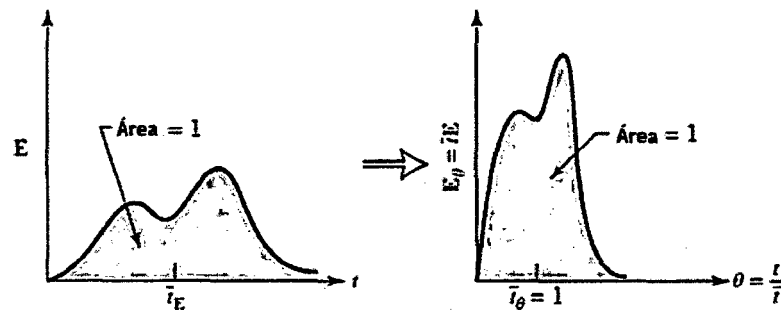
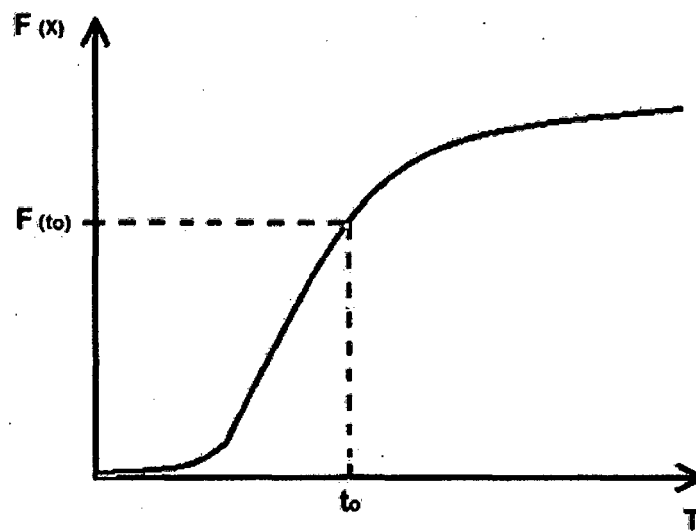


Figura II.13.- Transformación de la curva  $E$  en la curva  $E$  Normalizada

La relación entre  $C_{impulso}$  y las curvas  $E$  sólo se cumple con exactitud para condiciones frontera de recipientes cerrados.

**F. CURVA F: FRACCIÓN ACUMULADA DE TRAZADOR DE SALIDA Y  
CURVA 1-F: FRACCIÓN DE TRAZADOR RETENIDO**

La fracción acumulada de trazador a la salida o también llamada Curva F, representa la fracción del trazador que fue inyectado que ha salido del reactor hasta un tiempo determinado, que sirve entre otras cosas para tener una idea de la distribución del tiempo de contacto de las diferentes fracciones del fluido.



*Figura II.14.- Curva F: Análisis del Tiempo de Contacto*

De la Figura II.14:

- $F(t_0)$  = Representa la fracción del fluido con tiempo de retención menor al tiempo de retención hidráulico teórico.
- $1 - F(t_0)$  = Representa la fracción del fluido con tiempo de retención mayor al tiempo de retención hidráulico teórico.
- $t_0$  = Tiempo de retención hidráulico teórico.

Las curvas de Distribución de Edad de Salida (E) y Fracción Acumulada de Trazador de Salida (F), cumplen la siguiente relación:

$$F = \int_0^t E dt \quad \text{Ec. II.12}$$

O en forma diferencial

$$\frac{dF}{dt} = E \quad \text{Ec. II.13}$$

En la Figura II.15, se muestra esta relación gráfica, siendo la Curva F, el acumulado de la Curva E.

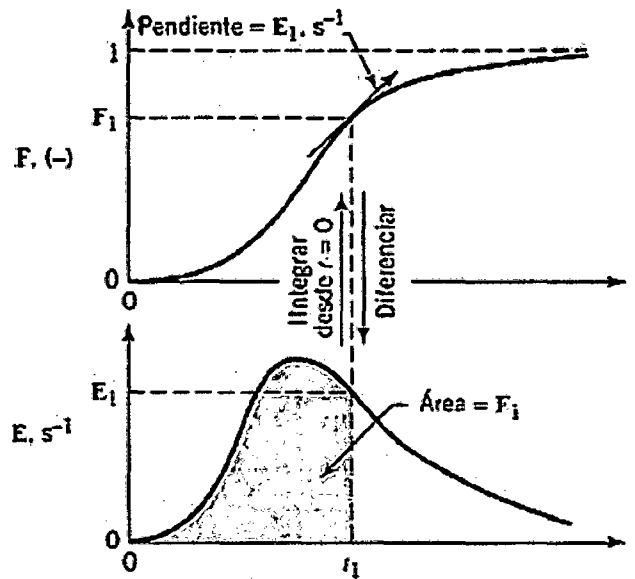


Figura II.15.- Relación entre las curvas E y F

Estas relaciones muestran cómo los experimentos de estímulo-respuesta, proporciona de forma cómoda la DTR y la velocidad media del fluido en el recipiente. Estas relaciones se cumplen únicamente para recipientes cerrados.

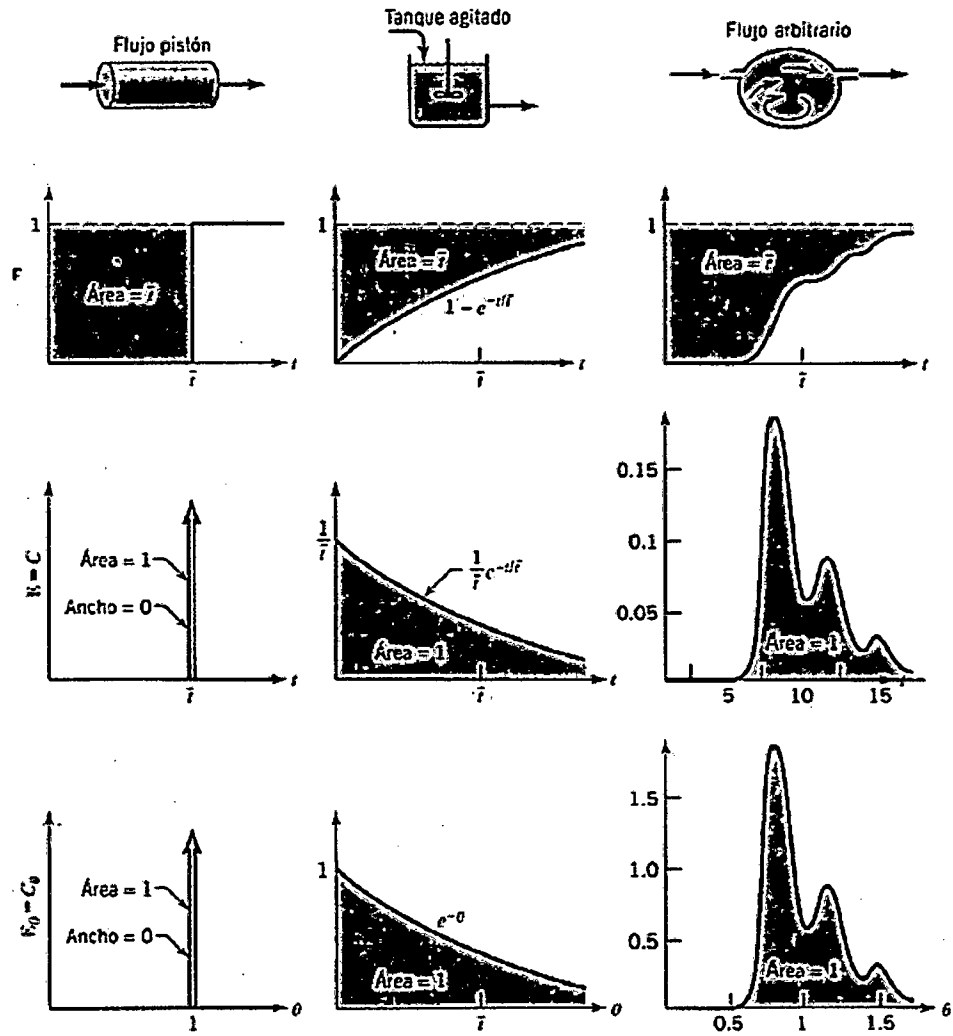


Figura II.16.- Propiedades de las curvas de distribución de edad de salida (E) y fracción acumulada de trazador de salida (F), para varios patrones de flujo.

La curva 1-F, Fracción del trazador que permanece en el interior del reactor o fracción del trazador retenido, nos indica la cantidad de trazador que aún no sale del reactor a un tiempo determinado. La relación con la Curva F es la siguiente:

$$1 - F = 1 - \int_0^t E dt \quad \text{Ec. II.14}$$

### G. ANÁLISIS DE LA CURVA TENDENCIA

El análisis de la curva tendencia consiste en analizar los valores de concentración respecto al tiempo, esta es una práctica común para establecer la eficiencia hidráulica de un reactor y relacionar diferentes parámetros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la Figura II.17.

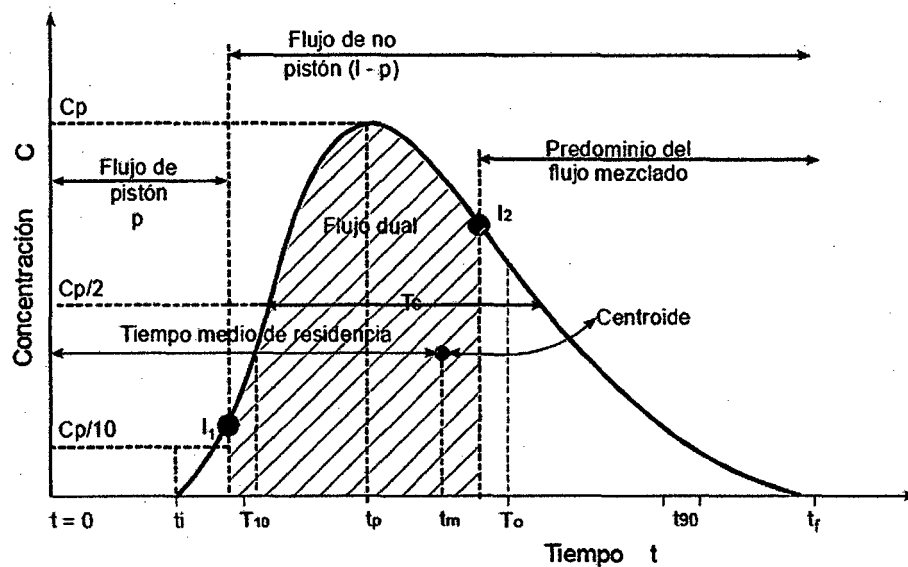


Figura II.17.- Concentración del trazador en el efluente de un reactor.

Existen los siguientes parámetros principales:

- $t_i$  = Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- $t_{10}$  = Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador



- $t_p$  = Tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
- $t_m$  = Tiempo medio de residencia, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
- $t_o$  = Tiempo de retención teórico =  $V/Q$ .
- $t_{90}$  = Tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
- $t_f$  = Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
- $t_c$  = Tiempo durante el cual la concentración en el efluente es mayor al 50% de la máxima concentración
- $C_o$  = Concentración inicial.
- $C_p$  = Concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios:

EXPRESIONES	INTERPRETACIÓN
$R = \frac{t_i}{t_o}$	<p>R: Relación tiempo inicial y tiempo de retención teórico, mide los cortocircuitos grandes.</p> <p>R = 1 para flujo de pistón</p> <p>R = 0 para el flujo mezclado.</p> <p>R &lt; 0,3, puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).</p>
$R = \frac{t_m}{t_o}$	<p>R: Relación tiempo medio de residencia y tiempo de residencia teórico.</p> <p>R &lt; 1, existen cortocircuitos hidráulicos.</p> <p>R &gt; 1, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo, para luego salir lentamente, con lo que la región descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área, haciendo <math>t_m &gt; t_o</math>.</p>

$R = \frac{t_p}{t_o}$	<p>R: Relación tiempo modal y tiempo de residencia teórico, indica la presencia de flujo de pistón y flujo mezclado.</p> <p>R = 1, existe únicamente flujo de pistón.</p> <p>R = 0, existe flujo mezclado.</p> <p>R <math>\cong</math> 1 y <math>t_i/t_o &gt; 0,5</math>, se concluye que existe predominio de flujo de pistón.</p> <p>R <math>\cong</math> 0, existe predominio de flujo mezclado.</p>
$R = \frac{t_c}{t_o}$	<p>La expresión relaciona, en general, la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia).</p> <p>R = <math>\Delta t_o/t_o</math> (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal.</p> <p>R <math>\cong</math> 0,7 para flujo mezclado.</p>

#### H. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORÍA DE WOLF-RESNICK

El modelo de Wolf-Resnick permite determinar mediante relaciones de parámetros el flujo predominante en un reactor, así como los porcentajes de flujos existentes y los espacios muertos. Para la aplicación de este modelo en el reactor no deben existir corrientes de recirculación.

Para reactores sin espacios muertos, se cumple las siguientes fracciones de flujo:

$$\text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} = 1$$

$$p + (1 - p) = 1 \quad \text{Ec. II.15}$$

Para reactores con espacios muertos,  $m$  es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción que no tiene espacios muertos será igual a  $1 - m$  y por lo tanto:

$$\text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} + \text{espacios muertos} = 1$$

$$[p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m = 1 \quad \text{Ec. II.16}$$

Ahora bien, se establece que el flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad \text{Ec. II.17}$$

Considerando flujo pistón y mezclado, así como también espacios muertos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{\frac{1}{(1-p)(1-m)} \left[ \frac{t}{t_0} - p(1-m) \right]} \quad \text{Ec. II.18}$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha salido del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad \text{Ec. II.19}$$

Reemplazando el valor de  $C/C_0$ , se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{\frac{-1}{(1-p)(1-m)} \left[ \frac{t}{t_0} - p(1-m) \right]} \quad \text{Ec. II.20}$$

Reordenando términos y tomando los logaritmos de ambos términos, se llega a:

$$\text{Log} [1 - F(t)] = \frac{\text{Log } e}{(1-p)(1-m)} \left[ \frac{t}{t_0} - p(1-m) \right] \quad \text{Ec. II.21}$$

Que corresponde a la ecuación de una línea recta (ver Figura II.18) cuya pendiente está dada por:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\text{Log } e}{(1-p)(1-m)} \quad \text{Ec. II.22}$$

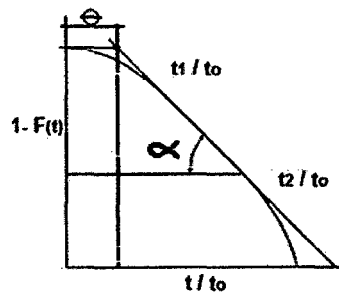


Figura II.18.- Curva de  $1-F(t)$  cantidad de trazador que pertenece en el reactor.

Multiplicando y dividiendo para "p" y sustituyendo el valor de "Log e = 0,435", se obtiene:

$$\tan \alpha = \frac{0.435 p}{p(1-p)(1-m)} \quad \text{Ec. II.23}$$

Lo que hace:  $\theta = p(1 - m)$

Reemplazando  $\theta$  en la ecuación anterior y reordenando, tenemos:

$$p = \frac{\tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad \text{Ec. II.24}$$

Deducimos que el volumen de espacios muertos será igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad \text{Ec. II.25}$$

y el flujo mezclado  $M$  será igual a:

$$M = 1 - p \quad \text{Ec. II.26}$$

Los valores de las incógnitas  $\theta$  y  $\tan \alpha$  se obtienen al trazar la curva de  $\text{Log}1-F(t)$ , Figura II.18, donde:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad \text{y} \quad \tan \alpha = \frac{1}{t_1/t_0 - t_2/t_0} \quad \text{Ec. II.27}$$

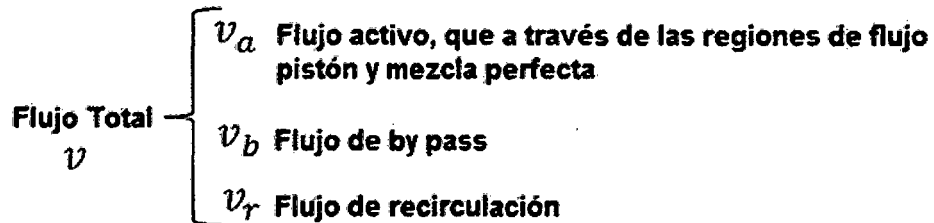
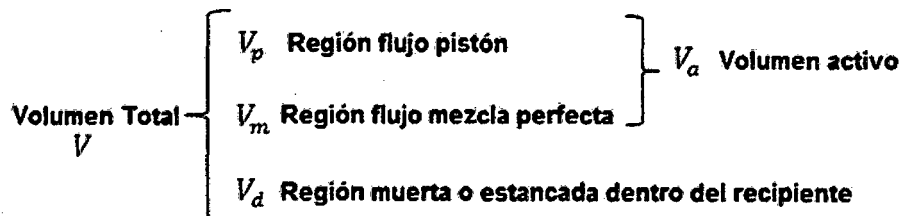
## I. MODELOS MATEMÁTICOS

Para el análisis y procesamiento de los datos experimentales existen diversos métodos matemáticos, solo el Modelo de Compartimentos se definen en este ítem y los métodos de Modelo de Dispersión Axial, Modelo de Tanques en Serie y Modelo de Convección para Flujo Laminar son definidos en el Anexo N° 01: Modelos Matemáticos.

## 1. MODELOS DE COMPARTIMIENTOS

Este modelo supone que los volúmenes del fluido que ingresa y el fluido del recipiente no se mezclan entre sí, sino que se comportan como compartimentos que trabajan en su respectivo régimen, pudiendo presentar configuraciones en serie o paralelo, en una innumerable cantidad de combinaciones posibles.

En los modelos de compartimento se consideran el recipiente y el flujo a través de él como sigue:



Para averiguar qué modelo se ajusta mejor al recipiente real se logra comparando la curva E del recipiente real con las curvas teóricas para varias combinaciones de compartimentos y flujos. Por supuesto, el ajuste no será perfecto; sin embargo, los modelos de este tipo son a menudo una aproximación razonable al recipiente real

Los modelos combinados son muy útiles para propósitos de diagnóstico, precisar flujos defectuosos y sugerir las causas.

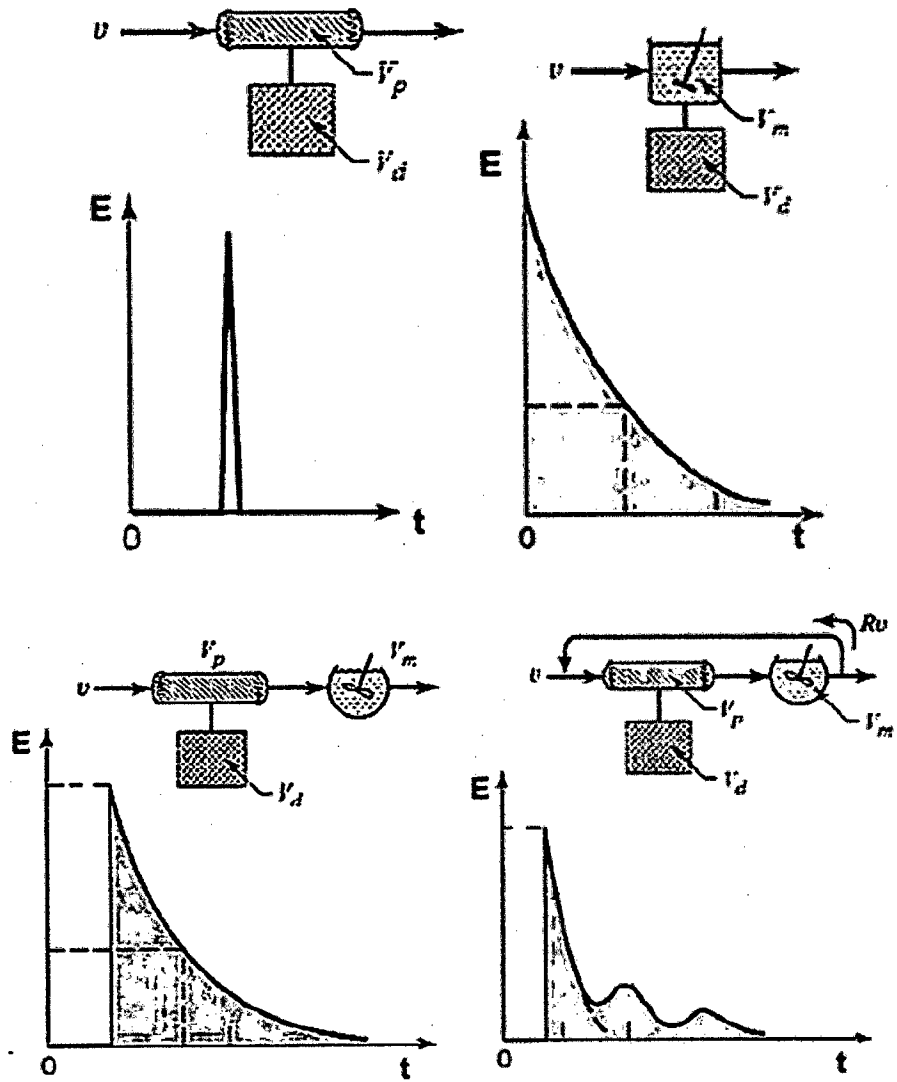
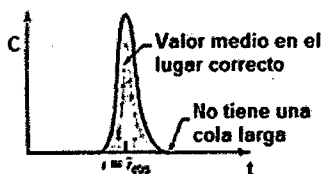
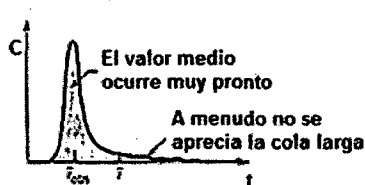


Figura II.19.- Algunos modelos de compartimentos, Curvas experimentales  $E$ .

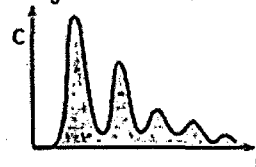
A) Una curva alargada y simétrica indica un flujo razonablemente bueno



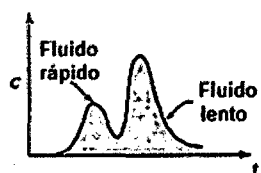
B) Una curva temprana es una prueba segura de aguas estancadas



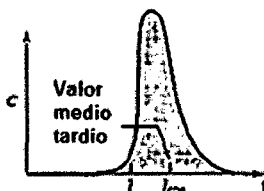
C) Múltiples picos que van disminuyendo su altura a intervalos regulares indica una gran recirculación interna



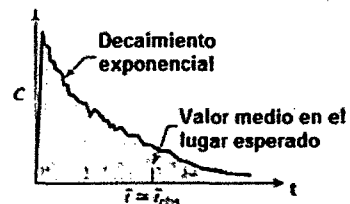
D) Los picos dobles se deben a un flujo en caminos paralelos, canalización



E) Curva tardía



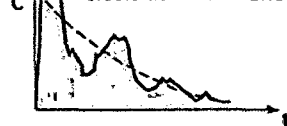
F) Flujo razonablemente bueno



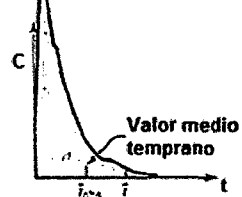
G) Un retraso en el tiempo indica un flujo pistón en serie con tanque agitado (¿tubo de entrada demasiado largo?, ¿líneas hacia el registrador demasiado largas?)



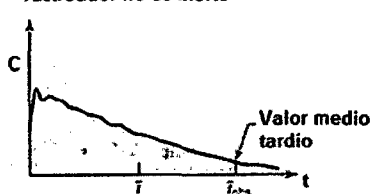
H) Una circulación interna lenta sugiere:  
- movimiento lento del fluido  
- mezclado no adecuado  
- efecto de tubo de arrastre



I) Una curva temprana indica fluido estancado



J) Una curva tardía indica que  $v$  o  $V$  se han medido incorrectamente o que el rastreador no es inerte



K) Un pico temprano puntiagudo indica cortocircuito de la entrada a la salida



Figura II.20.- Curvas de distribución más frecuentes.

### CAPITULO III. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se basa principalmente en la descripción de la realización de la investigación, tanto de la planta piloto como de las consideraciones que se tomaran en pruebas realizadas, para obtener resultados confiables.

Primero indicaremos la ubicación de la planta piloto donde se desarrolla la investigación.

Posteriormente se describirá las consideraciones tomadas para la elección del diseño del Repartidor de Caudal, también se explicará la elección del trazador y la concentración mínima de este, tal que sea representativa en el agua. Para nuestros ensayos no se usó desagüe como afluente debido a que el objetivo de la investigación es conocer sus condiciones hidrodinámicas y no la eficiencia de remoción, por lo que se usó agua potable.

Se detallara sobre la construcción de cada una de las unidades que conforman la planta piloto, teniendo mayor énfasis en el diseño de la unidad en estudio, el reactor piloto UASB, que es un modelo a escala del Reactor UASB-UNITRAR (factor de escala 7:100).

Posteriormente se describirá el armado de cada unidad, así como las pruebas realizadas para verificar el óptimo funcionamiento del sistema y el análisis de los posibles problemas o inconvenientes que se podrían presentar en la ejecución del ensayo en el reactor piloto UASB.

Finalmente se describe la metodología para el desarrollo de los ensayos de trazadores, indicando las consideraciones a tener presente, así como la frecuencia de muestro y los parámetros a determinar.



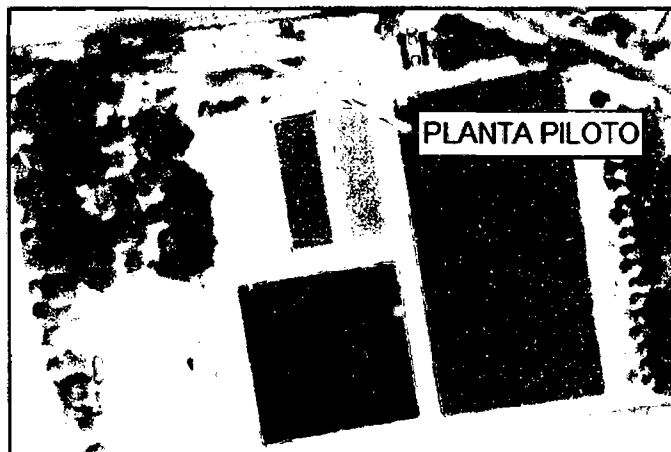
## A. METODOLOGÍA

### 1. UBICACIÓN DEL REACTOR MODELO

El reactor piloto UASB, se ubicó en la Planta de Tratamiento UNITRAR con la finalidad de simular las condiciones ambientales a las cuales funciona el reactor UASB-UNITRAR.



*Figura III.1.- Ubicación de la Planta UNITRAR*

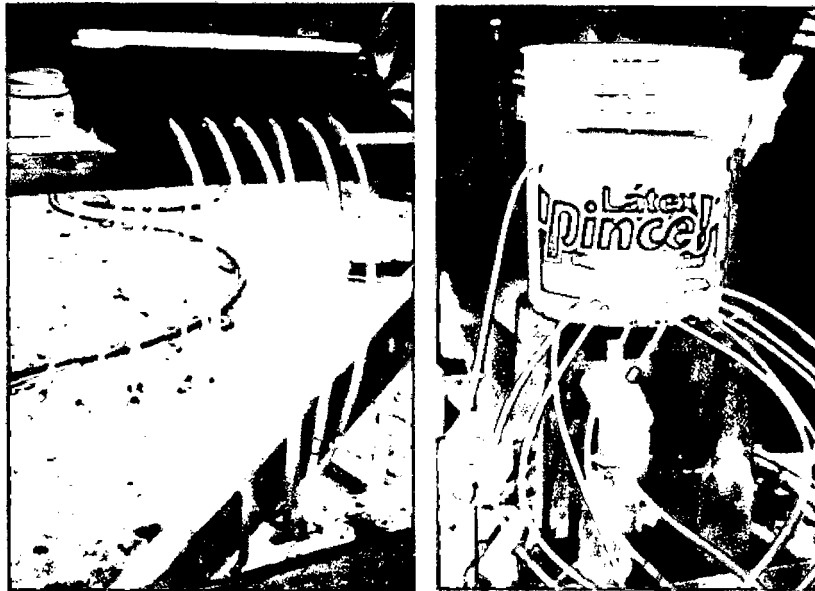


*Figura III.2.- Ubicación de la Planta Piloto dentro de la Planta UNITRAR*

## 2. ELECCIÓN DEL REPARTIDOR DE CAUDAL

Para la elección del repartidor de caudal se tuvo como criterio principal la continuidad del caudal ( $Q$ ) a lo largo del tiempo con variaciones mínimas ( $\Delta Q$ ) y de fácil corrección.

Las alternativas fueron:



*Figura III.3.- Izquierda: Alternativa N°1, derecha: Alternativa N°2*

### Alternativa N° 1:

#### **Descripción de la alternativa:**

Este repartidor fue diseñado en un taper con 12 salidas, las cuales eran reguladas mediante 12 válvulas de paso (tipo pecera) de PVC de diámetro interno de 4.5 mm.

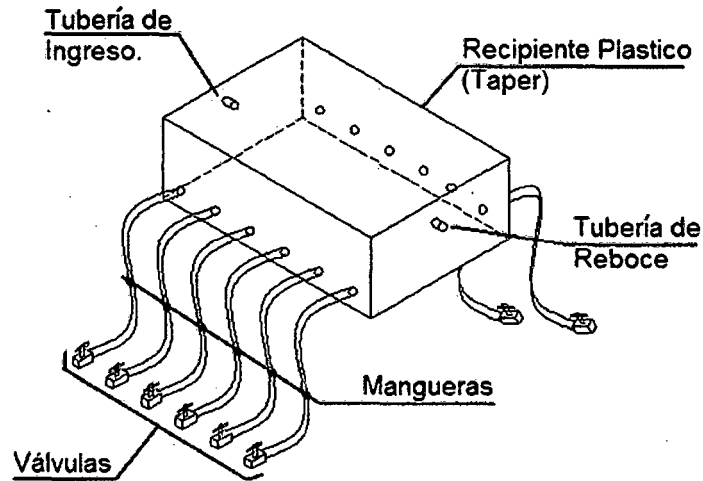


Figura III.4.- Bosquejo de Alternativa N°1

#### Resultados y discusión:

Se realizaron pruebas de calibración para ver si cumplía la condición de mantener el caudal constante en el tiempo. El cuadro a continuación, muestra el resumen de los resultados obtenidos. (Para ver los resultados completos, ver Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del Repartidor de Caudal Alternativa N° 1 y Alternativa N° 2).

Prueba N°	Dia	Caudal Base (ml/s)	Frecuencia Promedio de Calibración	Caudal Obtenido (ml/s)			Error (%)	
				Promedio	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo
01	04/10/10	0.285	30 min	0.261	0.294	0.195	12.79%	-25.08%
02	05/10/10	0.285	30 min	0.393	0.427	0.249	8.64%	-36.70%
03	11/10/10	0.285	30 min	0.267	0.324	0.162	21.49%	-39.35%
04	12/10/10	0.285	30 min	0.293	0.324	0.268	10.67%	-8.34%
05	13/10/10	0.285	30 min	0.233	0.346	0.113	48.29%	-51.66%
06	14/10/10	0.285	30 min	0.243	0.293	0.105	20.64%	-56.71%
07	18/10/10	0.285	30 min	0.280	0.334	0.239	19.18%	-14.79%
08	19/10/10	0.285	30 min	0.257	0.307	0.190	19.66%	-26.05%

Cuadro III.1.- Resumen de las Pruebas de Calibración de la Alternativa N°1 para la elección del repartidor de caudal.

Los resultados muestran que se consiguió un caudal promedio muy cercano al deseado y que con una frecuencia de calibración de 30 min, se consiguió variaciones del caudal promedio entre -56.66% y 48.29%.

El agua usada es proveniente de pozos presenta alta dureza, lo que ocasiona que se formen pequeñas incrustaciones al interior de las válvulas, además las impurezas que contiene el agua potable, como son las partículas en suspensión (polvo), esto sumado a que las válvulas de PVC utilizadas fueron de tipo pecera de diámetro interno 4.5 mm, se produjo una importante reducción en el área de la sección transversal, y por ende la disminución del caudal que se regula.

Otro problema fue la dificultad de regular este tipo de válvulas, estas tomaban demasiado tiempo (entre 15 y 20 min) debido al pequeño caudal deseado, además se observó que con un golpe suave se descalibraban, variando el caudal dosificado hasta en 100% y siendo necesaria la corrección del caudal.

### **Alternativa N° 2:**

#### **Descripción de la alternativa:**

Este repartidor fue diseñado en un balde con 12 salidas en la parte inferior, las cuales eran reguladas mediante 12 dispositivos de carga constante. Este dispositivo fue diseñado bajo la teoría de Bernoulli, con un flotador compuesto por una plancha de tecnoport de 20 x 10 cm el cual presenta 12 orificios, por donde pasan 12 tuberías rígidas de diámetro ½" y longitud 15 cm, cada una tiene un orificio de diámetro 1 mm, por donde ingresa el agua. Luego pasa por una tubería flexible de diámetro 3 mm y longitud 20 cm.

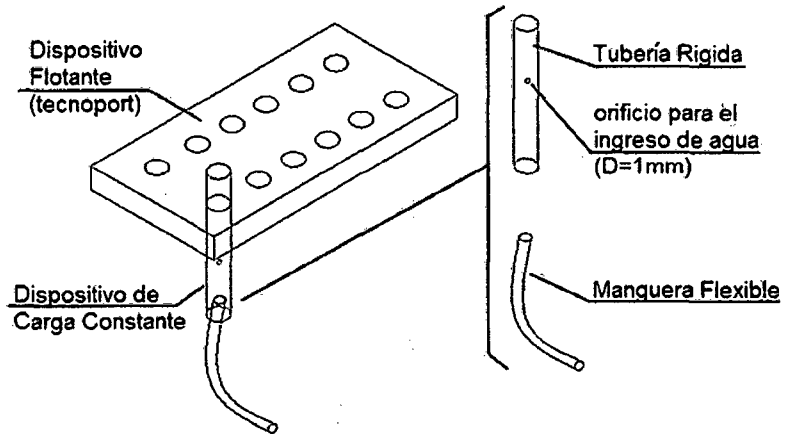


Figura III.5.- Dispositivo de carga constante

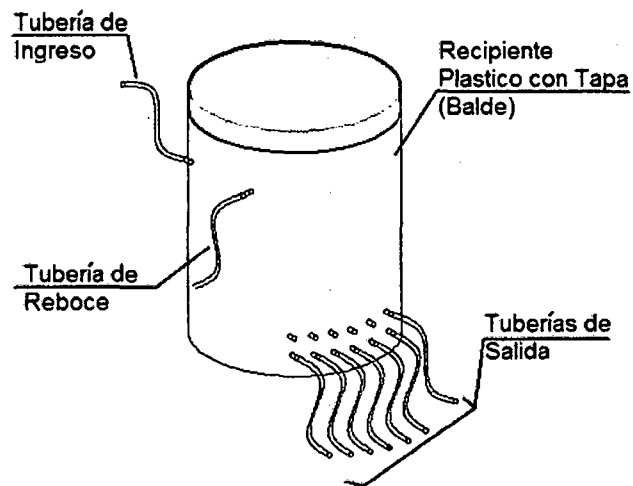


Figura III.6.- Bosquejo de Alternativa N° 2

A continuación se presentan los cálculos de Bernoulli:

**Ecuación de Bernoulli:**

$$Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{Ec. III.1}$$

Dónde:

- $Z_1$  = Altura desde una cota referencial

- $V_i$  = Velocidad del fluido en la sección considerada
- $P_i$  = Presión a lo largo de la línea de corriente
- $\gamma$  = Peso específico del fluido
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ )

**Ecuación de continuidad:**

$$Q = A \times V \quad \text{Ec. III.2}$$

Para secciones circulares:

$$Q = \frac{D^2}{4} \times \pi \times V \quad \text{Ec. III.3}$$

Despejando la velocidad:

$$V = \frac{4}{D^2 \times \pi} \times Q \quad \text{Ec. III.4}$$

Entonces la ecuación de Bernoulli queda de la siguiente manera:

$$Z_1 + \frac{\left(\frac{4}{D_1^2 \times \pi} \times Q\right)^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{\left(\frac{4}{D_2^2 \times \pi} \times Q\right)^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{Ec. III.5}$$

La calibración del caudal deseado se logró con el movimiento de la manguera de arriba hacia abajo para aumentar el caudal y de abajo hacia arriba para disminuir el caudal.

**Resultados y discusión:**

El cuadro a continuación, muestra el resumen de los resultados obtenidos. (Para ver los resultados completos, ver Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del Repartidor de Caudal Alternativa N° 1 y Alternativa N° 2).

Prueba N°	Dia	Caudal Base (ml/s)	Frecuencia Promedio de Calibración	Caudal Obtenido (ml/s)			Error (%)	
				Promedio	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo
01	09/12/10	0.285	60 min	0.270	0.310	0.240	14.84%	-11.11%
02	10/12/10	0.285	60 min	0.266	0.333	0.201	25.53%	-24.15%
03	13/12/10	0.285	60 min	0.279	0.333	0.235	19.38%	-15.98%

**Cuadro III.2.- Resumen de las Pruebas de Calibración de la Alternativa N°2 para la elección del repartidor de caudal.**

Los resultados muestran que se consiguió un caudal promedio muy cercano al deseado y que con una frecuencia de calibración de 60 min, se consiguió variaciones del caudal promedio entre -24.15% y 25.53%, además se observó que las variaciones del caudal en los dispositivos de carga constante obedecen a la variación de la temperatura del agua.

#### **DECISIÓN DEL REPARTIDOR DE CAUDAL:**

Teniendo en cuenta las variaciones de caudales obtenidas y las frecuencias de calibración requeridas para cada alternativa, se optó por la Alternativa N° 2 como la mejor opción para el Repartidor de caudal, debido a su mayor facilidad en calibración y porque el caudal se mantenía más constante en el tiempo.

### **3. ELECCIÓN DEL TRAZADOR Y SU CONCENTRACIÓN**

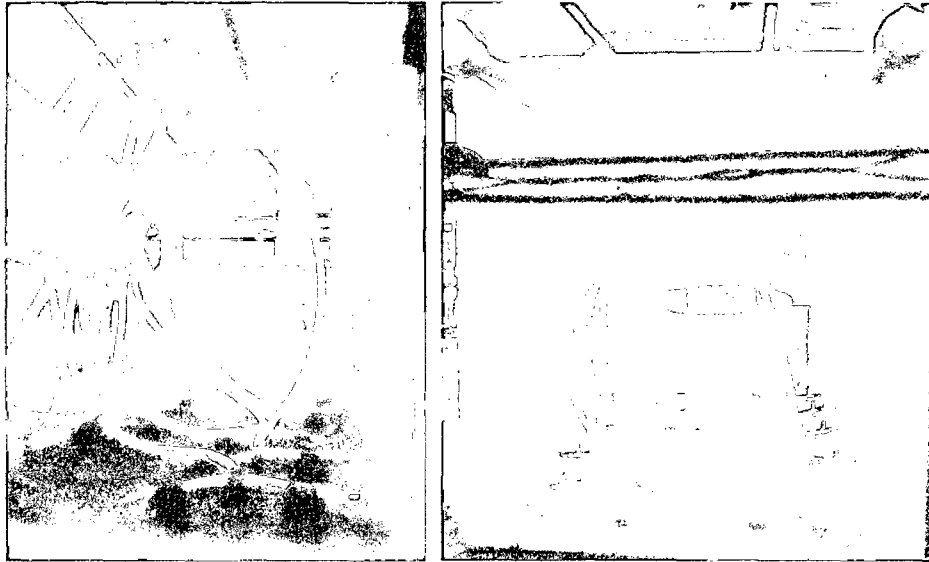
Para la investigación realizada fue necesaria la utilización de dos tipos de trazados, uno visual que permita distinguir las líneas de flujo en el interior del reactor piloto UASB y otro trazador que permita ser medido con facilidad para la determinación del tiempo de retención hidráulico real.

Para efecto de visualización de las corrientes y volumen útil, se utilizó como trazador los colorantes Verde y Fucsia.

El trazador elegido para los ensayos de determinación del tiempo de retención hidráulico real fue cloruro de sodio (NaCl); debido a su bajo costo de adquisición, fácil obtención, fácil manipulación, además de su simplicidad de medición por medio de conductividad y/o prueba de cloruros.

La densidad de aplicación del trazador es un factor importante, si la densidad del trazador es mayor que la del agua, el trazador se asienta en la base y no sigue el flujo del sistema, presentando un retraso significativo en la aparición del trazador en el afluente, en caso contrario, si la densidad es menor, el trazador

asciende rápidamente generando cortocircuitos cinéticos, dando falsas lecturas y un tiempo de retención reducido.



*Figura III.7.- A la izquierda: Trazador con mayor densidad que el agua, se asienta en el fondo y la difusión en la masa de agua es lenta. A la Derecha: Trazador con densidad menor que del agua, asciende rápidamente generando cortocircuitos cinéticos.*

#### **Curvas de Calibración NaCl:**

Antes de realizar cada prueba se realizó curvas de calibración del trazador. Esta curva se obtuvo con los valores de la "Concentración de NaCl Vs Conductividad" y además "Conductividad Vs Cloruros".

#### **Datos Obtenidos:**

Estas pruebas determinaron la mínima concentración ( $C_0$ ) necesaria para la dosificación instantánea, que nos permita determinar con facilidad la conductividad en el agua. Además nos da una referencia de la relación que existe entre la concentración de NaCl y la conductividad.



**Prueba N°01:**

Fecha:	14/12/2010
T° =	22.3
PH =	7.02

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°01				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.92
2	1000.00	0.5	2000	7.39
3	500.00	0.5	1000	4.69
4	250.00	0.5	500	3.35
5	125.00	0.5	250	2.61
6	62.50	0.5	125	2.29
7	31.25	0.5	62.5	2.01
8	15.63	0.5	31.25	1.98

Cuadro III.3.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 01

El estudio se realizó en un rango de concentraciones de NaCl de 31.25 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de obtener la mínima concentración medible para determinar la cantidad de trazador a inyectar.

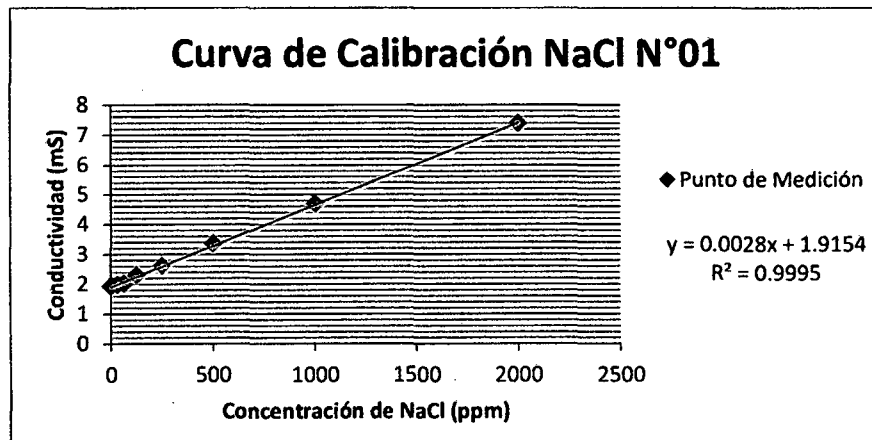


Figura III.8.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N° 01

De la Curva de Calibración N°01 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.95\%$ ).

**Prueba N° 02:**

Fecha:	15/12/2010
T° =	23
PH =	7.05

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°02				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.95
2	1000.00	0.5	2000	7.52
3	500.00	0.5	1000	4.96
4	250.00	0.5	500	3.43
5	125.00	0.5	250	2.72
6	62.50	0.5	125	2.31
7	31.25	0.5	62.5	2.1
8	15.63	0.5	31.25	1.99
9	7.81	0.5	15.625	1.93

Cuadro III.4.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 02

El rango de concentraciones estudiado fue de 15.625 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de determinar la cantidad de trazador a usar en el ensayo de trazadores.

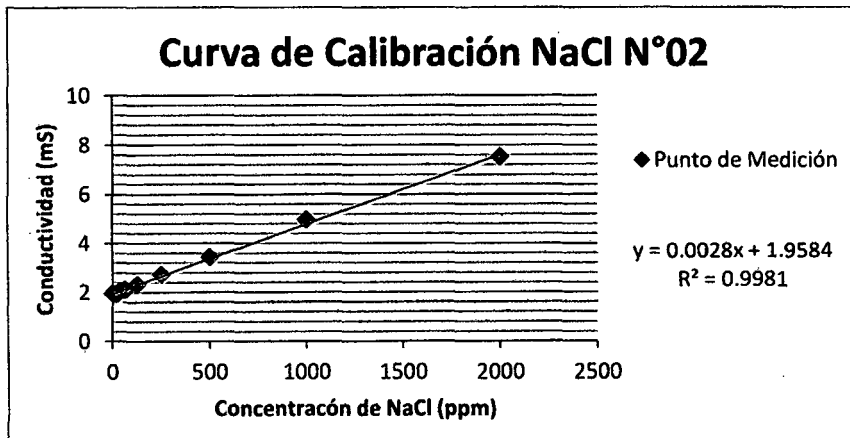


Figura III.9.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°2

De la Curva de Calibración N°02 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.81\%$ ).

**Prueba N° 03:**

Fecha:	16/12/2010
T° =	22.4
PH =	7.03

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°03				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.93
2	1000.00	0.5	2000	7.44
3	500.00	0.5	1000	4.78
4	250.00	0.5	500	3.35
5	125.00	0.5	250	2.68
6	62.50	0.5	125	2.3
7	31.25	0.5	62.5	2.05
8	15.63	0.5	31.25	1.99

Cuadro III.5.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 03

El rango de concentraciones estudiado fue de 31.25 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de determinar la cantidad de trazador a usar en el ensayo de trazadores.

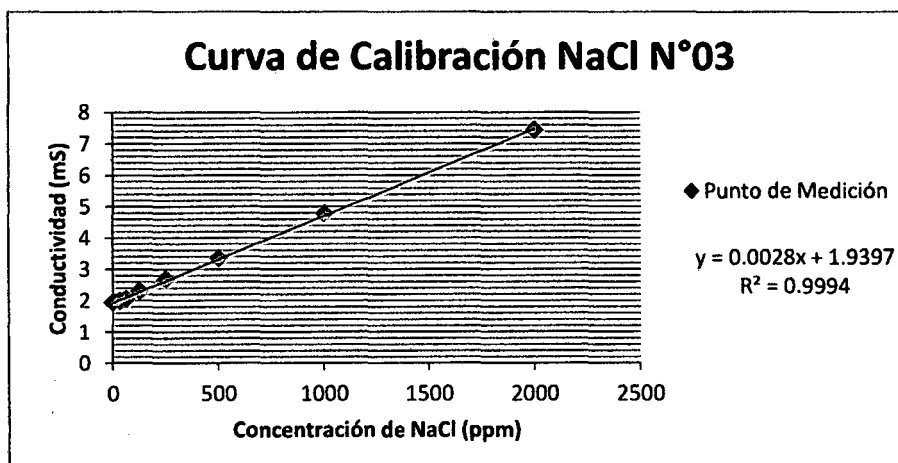


Figura III.10.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°3

De la Curva de Calibración N°03 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.94\%$ ).

**Prueba N° 04:**

Fecha:	17/12/2010
T° =	23.8
PH =	7.06

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°04				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.97
2	1000.00	0.5	2000	7.56
3	500.00	0.5	1000	4.82
4	250.00	0.5	500	3.39
5	125.00	0.5	250	2.73
6	62.50	0.5	125	2.33
7	31.25	0.5	62.5	2.15
8	15.63	0.5	31.25	2

Cuadro III.6.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 04

El rango de concentraciones estudiado fue de 31.25 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de determinar la cantidad de trazador a usar en el ensayo de trazadores.

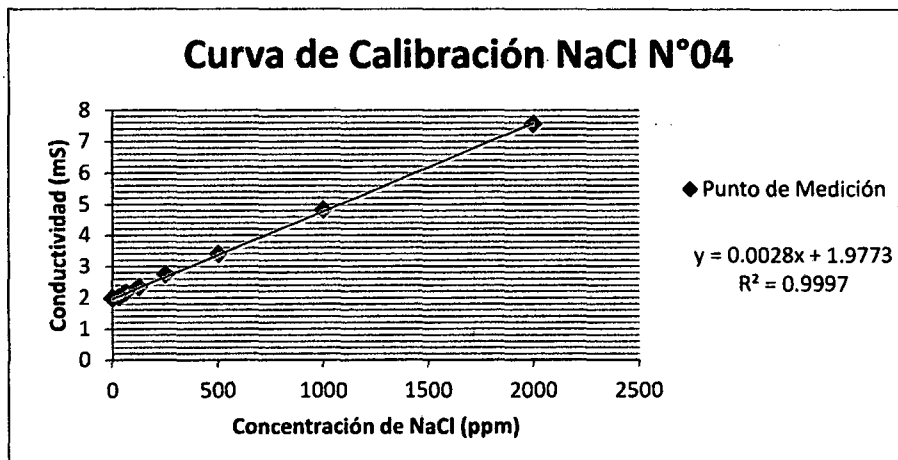


Figura III.11.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°4

De la Curva de Calibración N°04 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.97\%$ ).

**Prueba N° 05:**

Fecha:	20/12/2010
T° =	21.6
PH =	7.01

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°05				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.91
2	1000.00	0.5	2000	7.51
3	500.00	0.5	1000	4.76
4	250.00	0.5	500	3.34
5	125.00	0.5	250	2.68
6	62.50	0.5	125	2.26
7	31.25	0.5	62.5	2.09
8	15.63	0.5	31.25	2

Cuadro III.7.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 05

El rango de concentraciones estudiado fue de 31.25 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de determinar la cantidad de trazador a usar en el ensayo de trazadores.

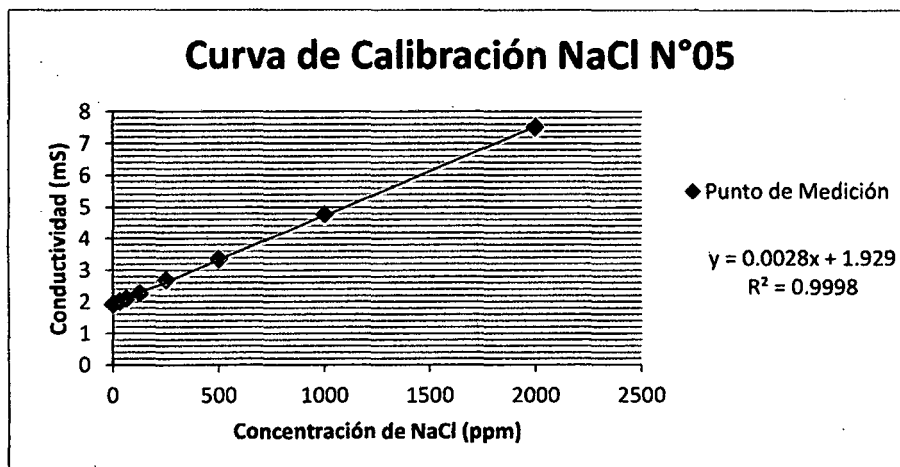


Figura III.12.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°5

De la Curva de Calibración N°05 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.98\%$ ).

**Prueba N° 06:**

Fecha:	21/12/2010
T° =	19.4
PH =	7.01

Datos de la Curva de Calibración NaCl N°06				
Muestra	Peso NaCl (mg)	Vol. Agua (lt)	Concentración (ppm)	Conductividad (mS)
1	0.00	0.5	0	1.91
2	1000.00	0.5	2000	7.49
3	500.00	0.5	1000	4.75
4	250.00	0.5	500	3.31
5	125.00	0.5	250	2.66
6	62.50	0.5	125	2.23
7	31.25	0.5	62.5	2.07
8	15.63	0.5	31.25	1.99

Cuadro III.8.- Datos de la Curva de Calibración NaCl N° 06

El rango de concentraciones estudiado fue de 31.25 ppm a 2000 ppm, con la finalidad de determinar la cantidad de trazador a usar en el ensayo de trazadores.

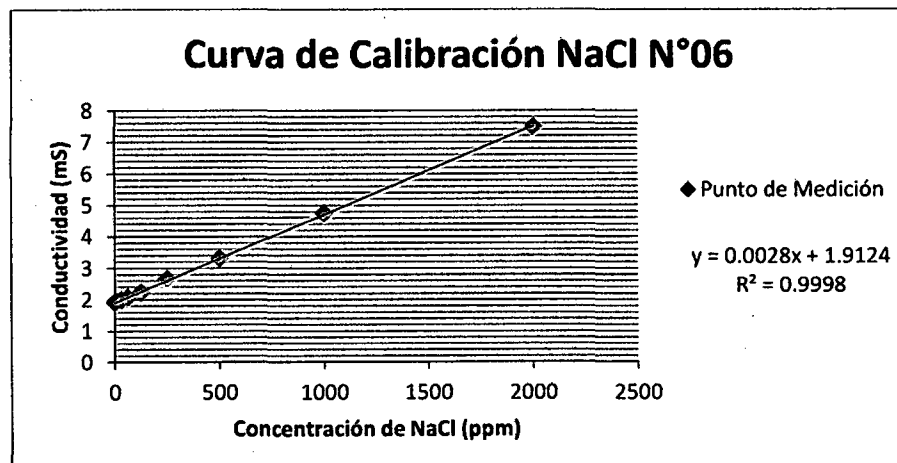


Figura III.13.- Grafica de la Curva de Calibración de NaCl N°6

De la Curva de Calibración N°06 se concluye que en el rango de concentraciones estudiado, el comportamiento de la Conductividad vs Concentración de NaCl es lineal ( $R^2=99.98\%$ ).

De las curvas obtenidas se observa que la concentración de NaCl Vs la conductividad tiene un comportamiento lineal, siendo directamente proporcionales para el rango de concentraciones 31.25 ppm a 2000 ppm, además se observa que para una concentración de 125ppm de NaCl la conductividad del agua resulta en promedio 2.68 mS en comparación con los 1.93 mS de conductividad a concentración 0ppm, dando una diferencia lo suficientemente grande para ser detectada mediante la medición de conductividad en campo, por lo que se tomó esta concentración (125 ppm) como base para determinar la cantidad de trazador a aplicar.

#### 4. ELECCIÓN DEL CAUDAL

La elección del caudal afluente de la planta piloto se realizó en función al caudal de diseño del reactor UASB-UNITRAR, teniendo en cuenta el factor de escala de 7:100 con el cual se construyó el reactor piloto UASB.

El caudal de diseño del reactor UASB-UNITRAR es de 10 litros por segundo para el cual presenta un tiempo de retención teórico de 8 horas, sin embargo en la práctica se opera con grandes variaciones horarias.

Entonces, para encontrar el caudal promedio de diseño de la planta piloto, es necesario afectar el caudal promedio de diseño de la Planta UNITRAR por el factor de escala elevado a la tercera potencia.

Cada dimensión se ve afectada por el factor de escala, entonces, el volumen del reactor piloto UASB sería:

$$V_{piloto} = V_{UASB-UNITRAR} \times Ke^3$$

Donde:

- $V_{piloto}$  = Volumen del reactor piloto UASB
- $V_{UASB-UNITRAR}$  = Volumen del reactor UASB-UNITRAR
- $Ke$  = Factor de escala (7:100)

Dividiéndolo entre el tiempo, obtenemos:

$$\frac{V_{piloto}}{t} = \frac{V_{UASB-UNITRAR}}{t} \times Ke^3$$

Que es igual a:

$$Q_{piloto} = Q_{UASB-UNITRAR} \times Ke^3 \quad \text{Ec. III.6}$$

Dónde:

- $Q_{piloto}$  = Caudal Promedio de diseño de la Planta Piloto
- $Q_{UASB-UNITRAR}$  = Caudal Promedio de diseño de la Planta UNITRAR
- $Ke$  = Factor de escala (7:100)

Entonces:

$$Q_{piloto} = 10 \times (7/100)^3$$

$$Q_{piloto} = 0.00343 \frac{l}{s}$$

$$Q_{piloto} = 3.43 \text{ ml/s}$$

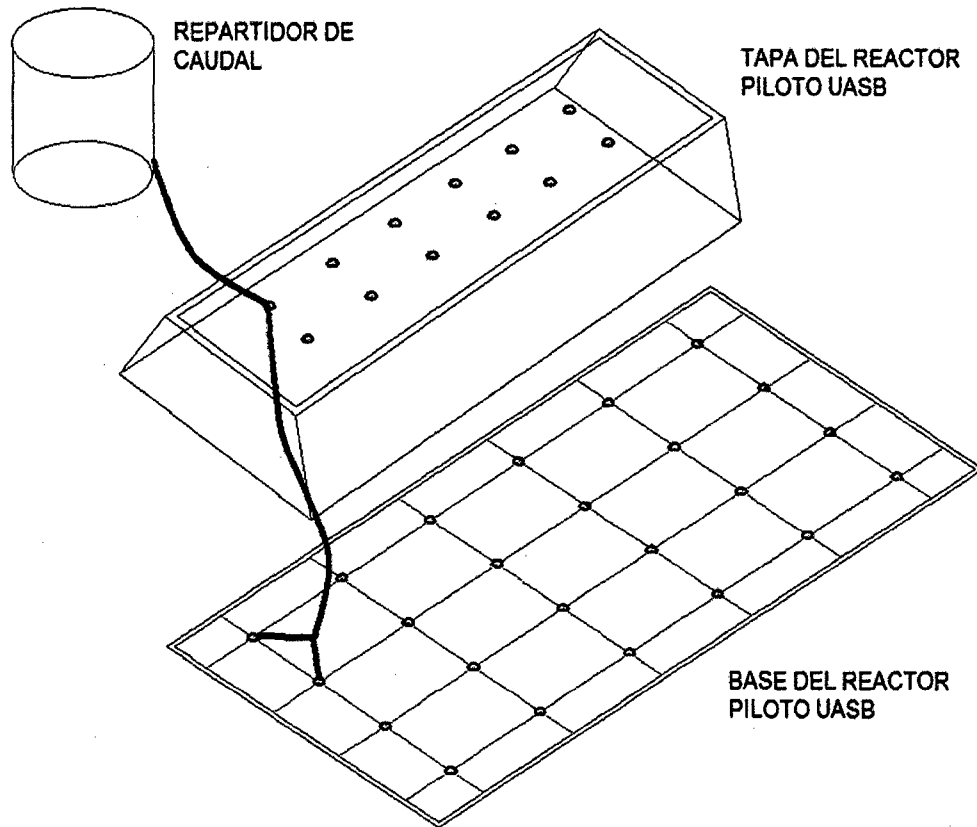
El distribuidor de caudal distribuye el caudal en 12 partes iguales que ingresan al reactor mediante 12 entradas situadas en la parte superior del reactor, luego en el fondo cada ramal se subdivide en 2 sub-ramales formando 24 puntos de ingreso, distribuidos de manera uniforme ubicados equidistantemente. Ver Figura III.14.

Entonces:

$$Q_{manguera} = Q_{piloto}/12$$

$$Q_{manguera} = 0.2858 \text{ ml/s}$$





*Figura III.14.- Esquemática del ingreso del afluente*

Durante las pruebas realizadas se buscó acercarse a este caudal ideal (3.43ml/s) lo más posible, obteniendo caudales que se muestran a continuación en cada prueba.

**GRUPO N°1:  
ENSAYOS DE TRAZADORES CON COLOR**

Ausencia del Manto de Lodos	
Ensayo N°	Qp (ml/s)
01	3.356

Presencia del Manto de Lodos	
Ensayo N°	Qp (ml/s)
02	3.405

**GRUPO N°2:  
ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl**

Ausencia del Manto de Lodos	
Ensayo N°	Qp (ml/s)
01	2.483
02	2.582
03	3.712
04	3.566
05	3.728
06	3.558
07	3.254
08	3.608
09	3.325

Presencia del Manto de Lodos	
Ensayo N°	Qp (ml/s)
10	4.027
11	3.461
12	3.377
13	3.534
14	3.410

*Cuadro III.9.- Datos del caudal afluente promedio (Qp) al reactor piloto UASB.*

## **5. ELECCIÓN DEL MATERIAL Y ESCALA DEL REACTOR PILOTO UASB**

La construcción del reactor piloto UASB fue en material Polimetilmetacrilato (acrílico), la principal razón para la elección del material fue la transparencia ya que permite visualizar las corrientes internas mediante la inyección de colorante y el comportamiento hidráulico, además la alta resistencia al impacto y la acción de la intemperie, lo que pone al polimetilmetacrilato por encima del vidrio para los fines de esta investigación.

### **Elección de la escala:**

La escala de construcción es de 7:100, se debe a los siguientes criterios:

- **Fácil transporte:** Por sus dimensiones puede ser trasladado en cualquier automóvil sin mayores inconvenientes.
- **Facilidades operativas:** El caudal está en función de la escala, por lo que se buscó una dimensión adecuada asegurando un caudal de rápida calibración. Además se asegura su abastecimiento con el tanque de almacenamiento de agua de 250 litros durante todo el ensayo. También, debido a su dimensión el llenado de lodo es sencilla y rápida, y el volumen de lodo que necesita es mínimo.
- **Facilidad de visualización:** Debido a su dimensión se observó con facilidad el flujo de las corrientes al utilizar trazadores colorantes, así como las formaciones de canales en el manto de lodo.
- **Fácil Mantenimiento:** Debido a su dimensión la limpieza del reactor piloto UASB es sencilla y rápida.
- **Económicos:** Para la construcción, a esta escala, solo se necesitó una plancha de acrílico de dimensiones comerciales.

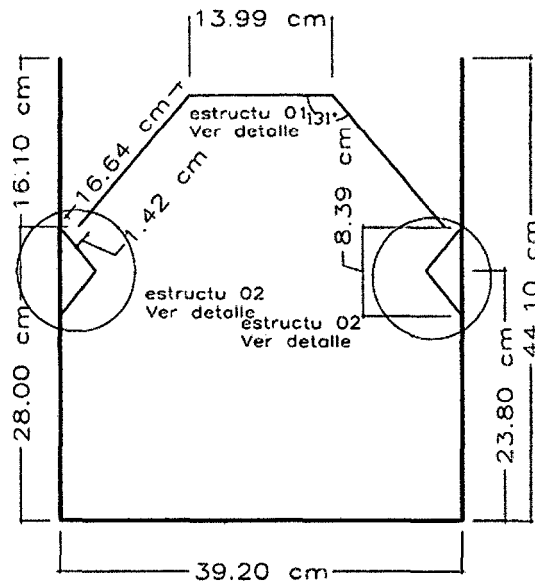


Figura III.15.- Sección transversal típica del reactor piloto UASB a escala 7:100

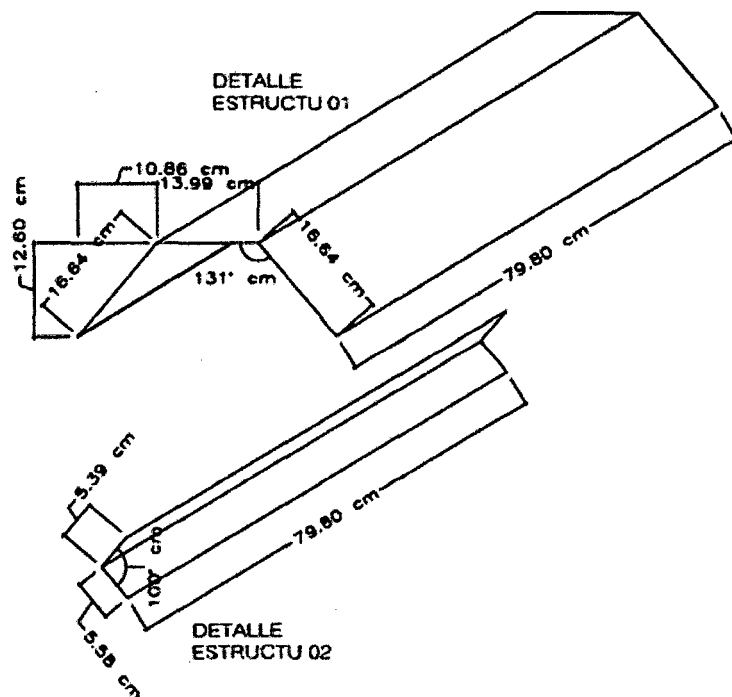


Figura III.16.- Detalles constructivos: Detalle de Estructura 01: Cámara separadora de gases, Detalle de Estructura 02: Deflector.

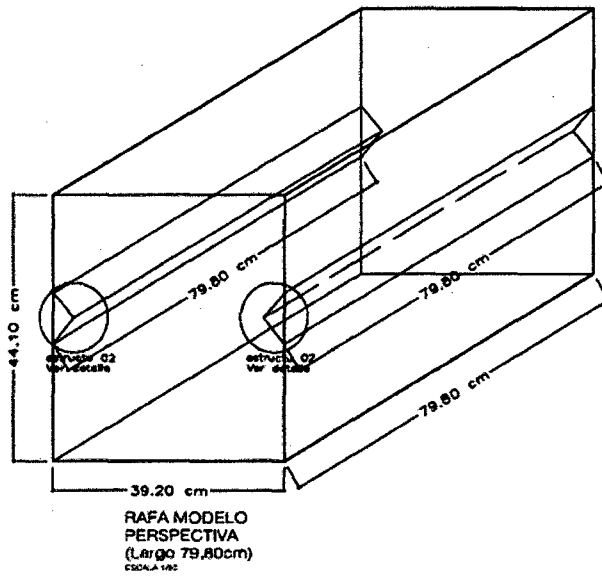


Figura III.17.- Ubicación de los deflectores

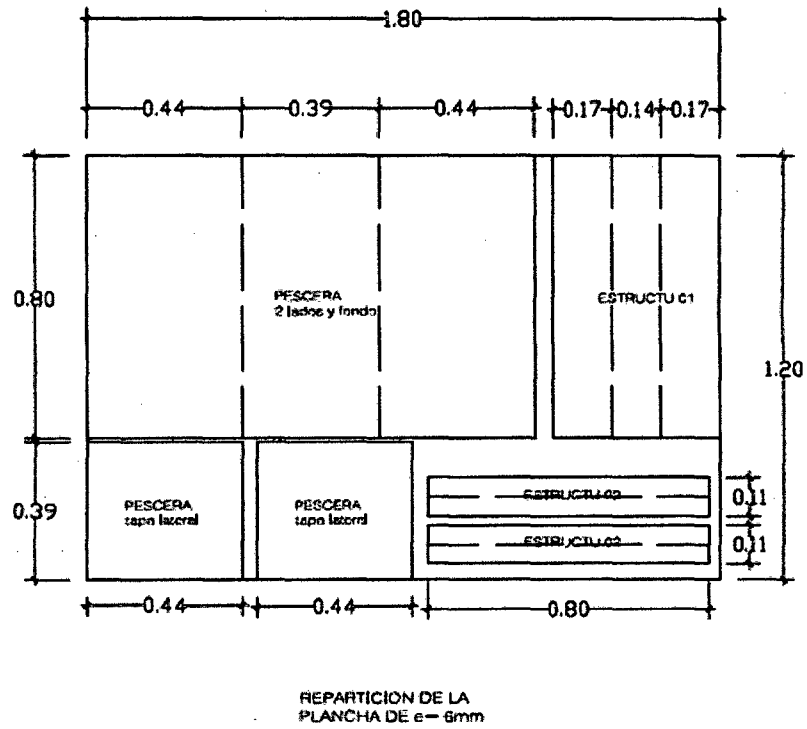


Figura III.18.- Distribución de las estructuras en la plancha de acrílico de 1.20mx1.80mx6mm.

## 6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto cuenta con las siguientes unidades:



Figura III.19.- Planta Piloto

**a) Tanque de Almacenamiento:**

Se usó un tanque ROTOPLAST de 250 litros de capacidad, que nos permitía disponer de afluente continuo a próximamente 16 horas para el caudal utilizado con sus respectivas variaciones por efectos de la temperatura y caudal de reboce en la caja repartidora de caudal.



*Figura III.20.- Tanque de Almacenamiento.*

**b) Dispositivo de Carga Constante:**

Este dispositivo permite mantener un caudal constante a la salida del tanque de almacenamiento, durante toda la duración del ensayo, independientemente de la altura de agua en el tanque de almacenamiento.

Fue diseñado con una botella de vidrio y un frasco de plástico que en la parte superior tiene una envoltura de jebes de tal modo que cuando el agua llena el recipiente este frasco flota tapando el orificio de ingreso y reduciendo su sección útil lo que origina que el caudal que ingresa sea menor, cuando el volumen de agua disminuye permite el ingreso de mayor cantidad de agua ya que el frasco desciende, de ese modo se permitió la dosificación de un caudal constante durante la realización de los ensayos.

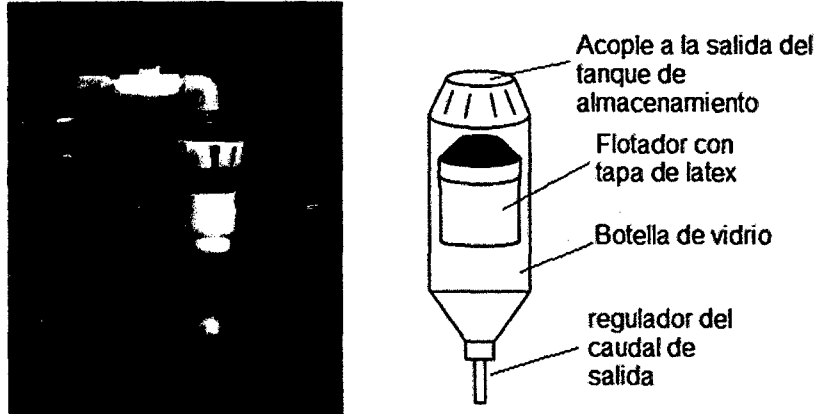


Figura III.21.- A la izquierda la fotografía y a la derecha el bosquejo del Dispositivo de Carga Constante

### c) Repartidor de Caudal:

Esta unidad es la encargada de la repartición del caudal hacia reactor piloto UASB, es aquí donde se regula el caudal que pasará por cada orificio mediante los dispositivos de carga constante que están en el interior de la caja repartidora, los cuales están suspendidos en el agua mediante un tecnoport como soporte, además cuenta con una tubería de reboce para eliminar el caudal excedente.

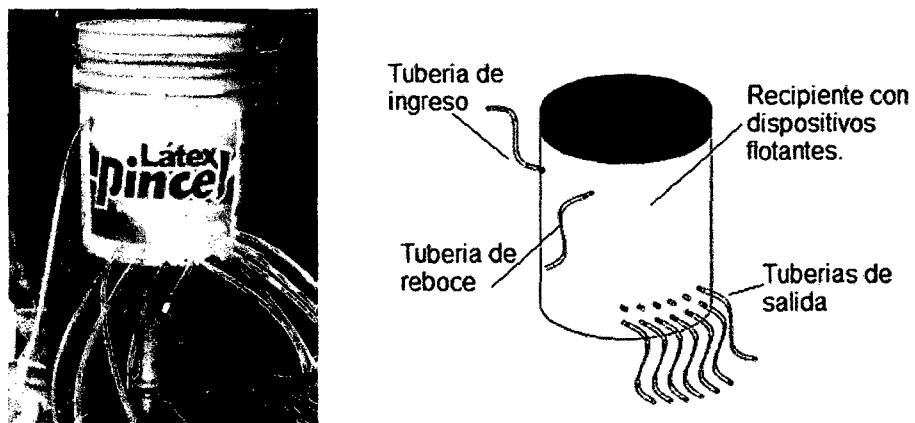
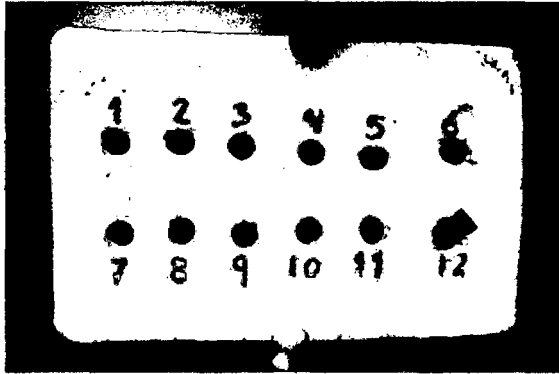


Figura III.22.- A la izquierda la fotografía y a la derecha el bosquejo de la Caja Repartidora de Caudal

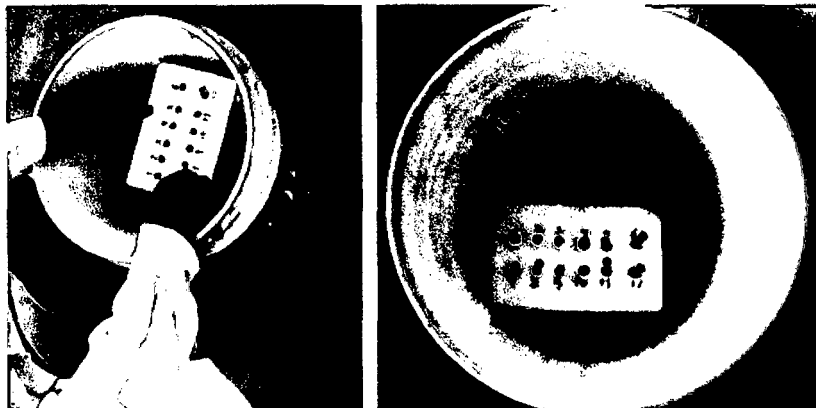




*Figura III.23.- Flotador y soporte para los 12 dispositivos de carga constante.*



*Figura III.24.- Dispositivo de carga constante.*



*Figura III.25.- Ubicación del flotador y soporte dentro del repartidor de caudal.*

**d) Reactor piloto UASB:****i) Elección del material y escala:**

El reactor piloto UASB, es un reactor a escala 7:100 del reactor UASB-UNITRAR, cuenta con una zona de ingreso en la parte inferior alimentada por conductos que ingresan por la parte superior, una zona de lodos, cámara separadora de gases y dos canaletas de recolección, buscando asemejar las estructuras existentes en el reactor UASB-UNITRAR.

El reactor piloto UASB es de Polimetilmetacrilato (acrílico). La elección del material se debe a su transparencia ya que permite visualizar las corrientes internas mediante la inyección de colorante, también por su alta resistencia al impacto y la acción de la intemperie. La escala de construcción fue de 7:100 (Ver Anexo N° 03: Esquema para la Construcción del reactor piloto UASB).



*Figura III.26.- Fotografía del Reactor piloto UASB de acrílico a escala 7:100 del reactor UASB-UNITRAR.*



Figura III.27: Sección transversal típica del reactor piloto UASB.

### ii) Descripción de la estructura de Ingreso:

El dispositivo usado y su configuración fueron elegidos después de numerosas pruebas en las que se buscó que se asemeje a la entrada en el UASB-UNITRAR, además que la distribución del trazador en el fondo del reactor sea lo más homogénea posible.

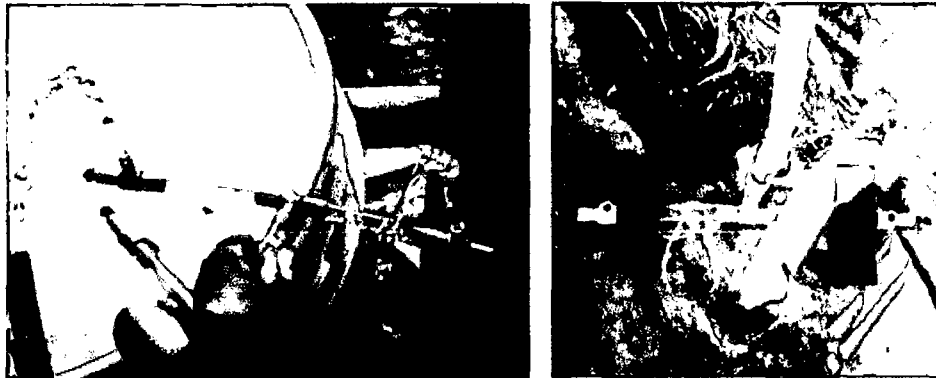
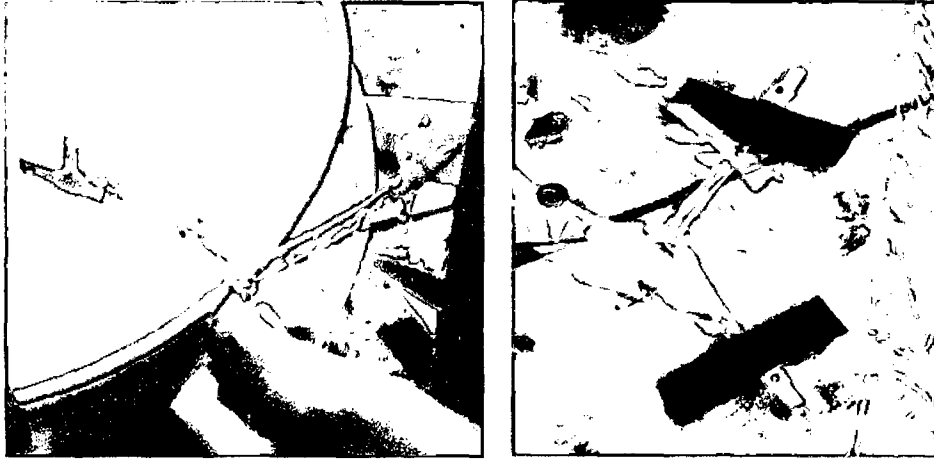


Figura III.28.- Diferentes configuraciones probadas para el ingreso en el fondo del reactor.



*Figura III.29.- Diferentes configuraciones probadas para el ingreso en el fondo del reactor. (Continuación)*

El ingreso de las 12 tuberías, provenientes de la caja repartidora, es por la parte superior de la zona de recolección de gases. Las 12 tuberías se subdividen en 24 tuberías en el fondo del reactor, con el objetivo de asemejar la configuración de ingreso del Reactor piloto UASB al del reactor UASB-UNITRAR. Para ello se usó mangueras flexibles, tuberías de plástico (mangueras rígidas), accesorios yee y tee de plástico tipo pecera. Se colocó el punto de ingreso direccionándolo hacia el fondo con un ángulo de inclinación de aproximadamente 45 grados respecto a la vertical, sobre unos tacos de madera de dimensiones 1.00 x 1.00 x 0.50 cm. Ver Figura III.30.

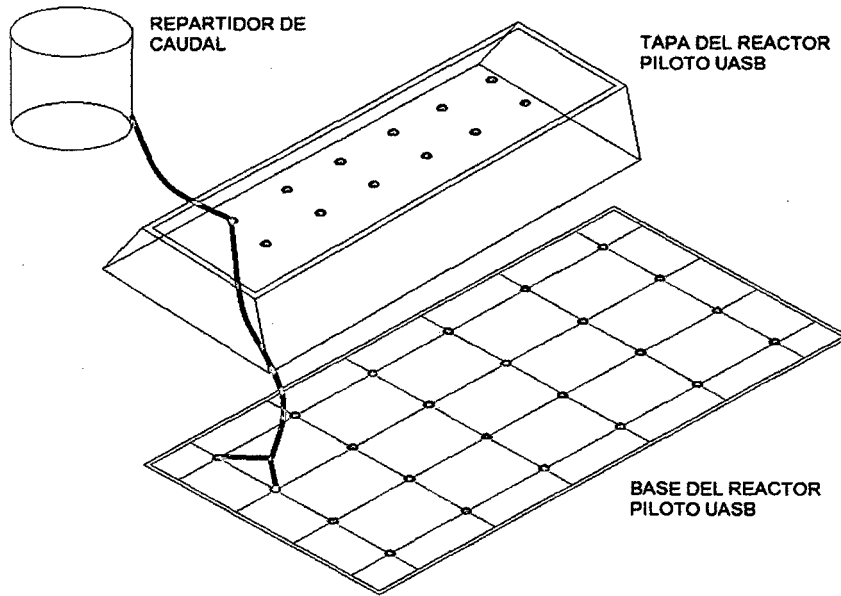


Figura III.30.- Esquema de la configuración de la estructura de Ingreso.



Figura III.31.- Vista de la tapa del reactor piloto UASB, se aprecian las válvulas para eliminar las burbujas de aire en el fluido y mantener la presión a niveles atmosféricos en la entrada al reactor.



Figura III.32.- Ingresos en el fondo del reactor.

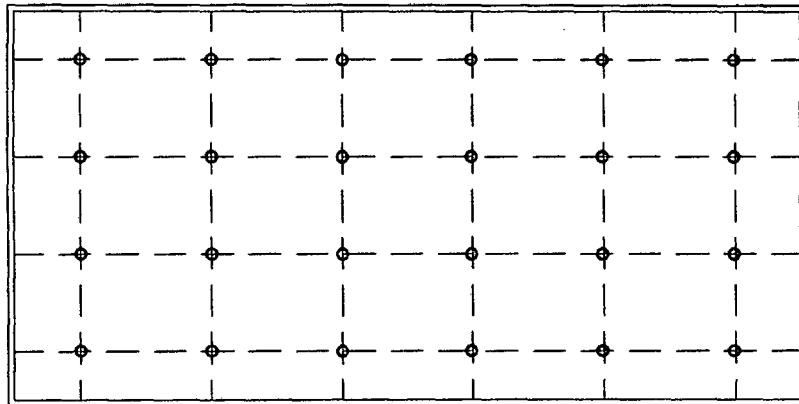


Figura III.33.- Distribución de los 24 ingresos en el fondo del reactor piloto UASB.

### iii) Descripción de las Canaletas de Recolección:

El sistema de recolección elegido consta de dos tuberías de PVC de diámetro  $\frac{3}{4}$ " , ubicadas en las zonas de recolección a lo largo del reactor, con 3 orificios de 4mm de diámetro distribuidos de manera homogénea a lo largo del lomo de tubería.

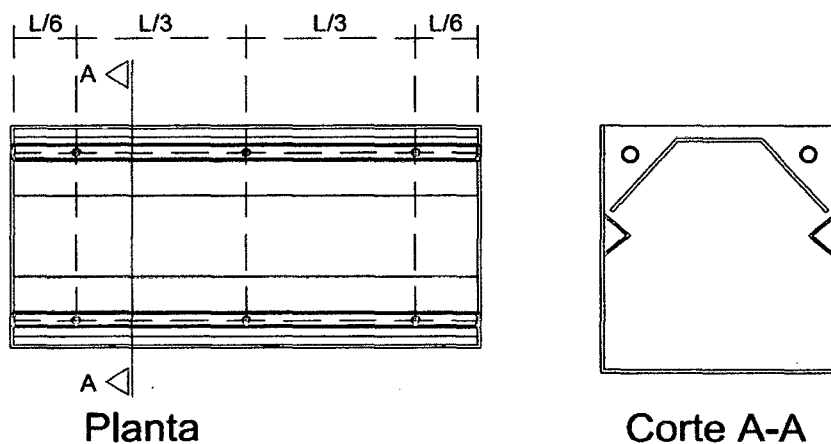


Figura III.34.- Distribución de las Canaletas de Recolección: se muestra la ubicación de las tuberías de recolección y la distribución de los orificios.

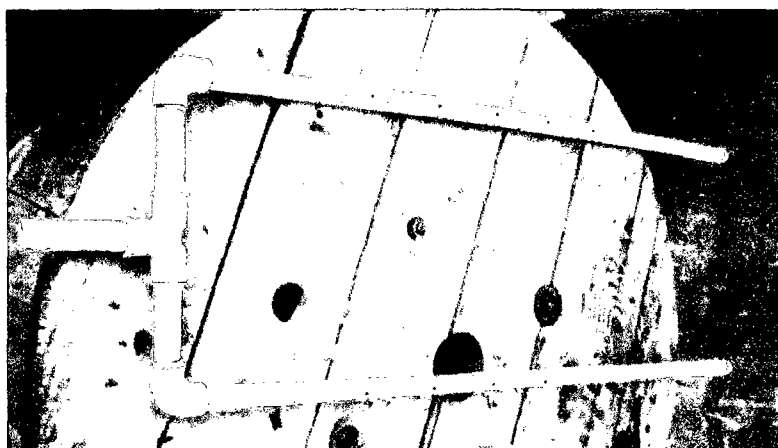


Figura III.35.- Sistema de recolección: Se observan las dos tuberías que trabajan como canales recolectando el afluente y juntando los caudales recolectados para luego liberarlos en un solo chorro (parte izquierda de la foto)

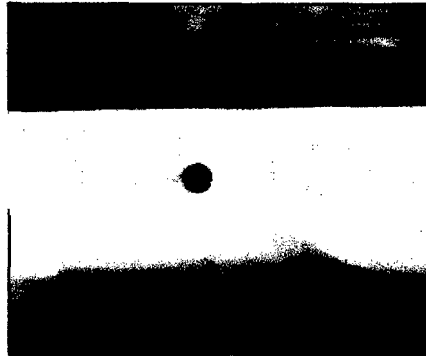


Figura III.36.- Orificio en la tubería de recolección. En la figura se observa como el trazador es recolectado hacia el orificio.

#### e) Inyector de Trazador:

Debido a la necesidad de un dispositivo para inyectar el trazador distribuyendo el caudal equitativamente en 12 orificios, se optó por usar la Alternativa N° 1 del Repartidor de Caudal, ya que las válvulas mantienen constante el caudal durante el intervalo de aplicación del trazador (ver Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del Repartidor de Caudal Alternativa N° 1 y Alternativa N° 2).

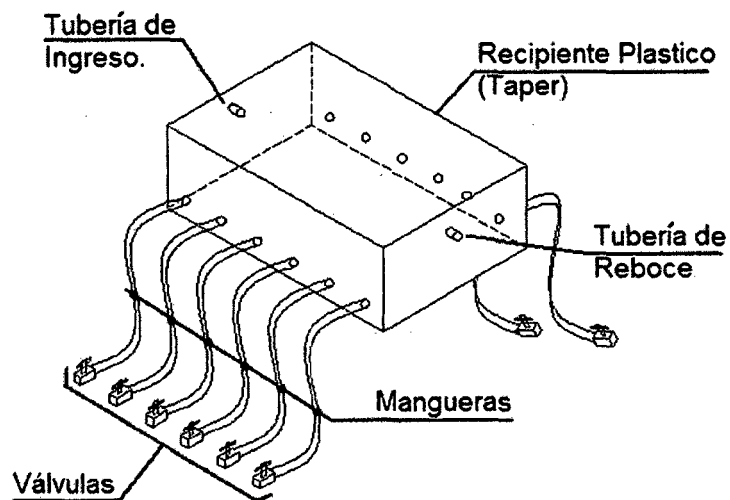


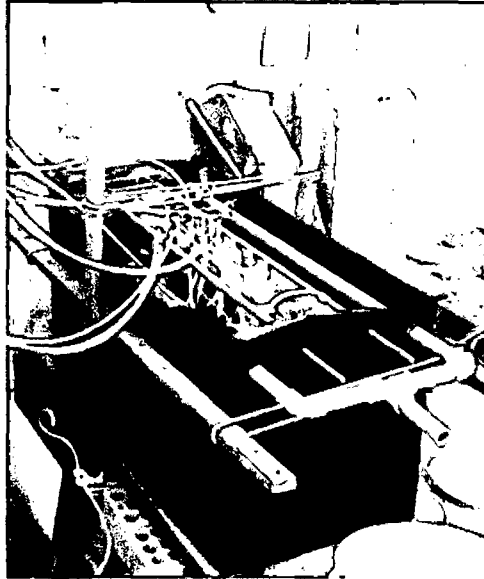
Figura III.37.- Bosquejo del Inyector de Trazador.



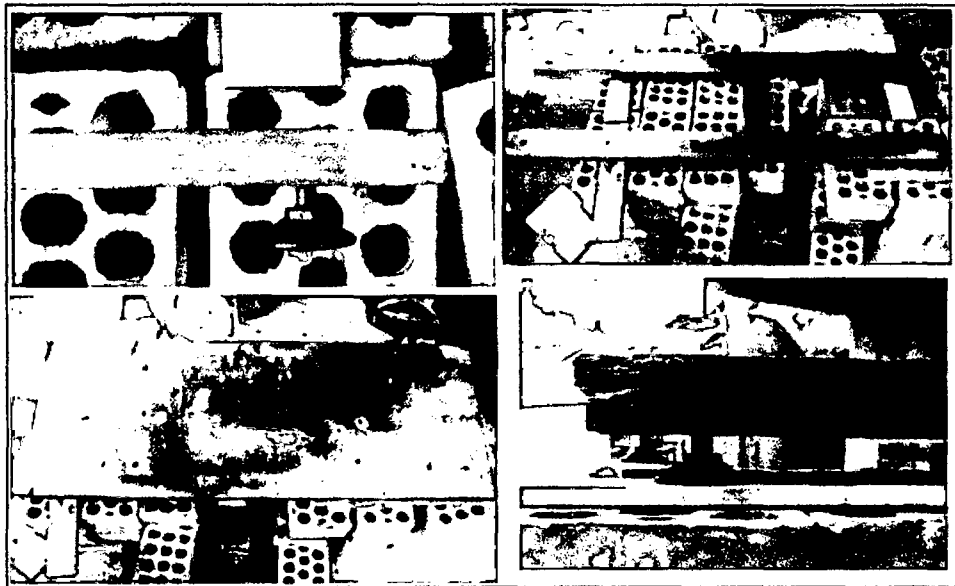


*Figura III.38.- Ubicación del Inyección de Trazador en la Planta Piloto*

Los materiales y herramientas usados para el armado y montaje de las unidades en su gran mayoría fueron tuberías de plástico de diversos diámetros y longitudes (según la necesidad), pegamento de PVC, siliconas fría y caliente, cintas aislante, cintas teflón, cuchillas, tijera, etc.



*Figura III.39.- Al finalizar el armado se forro el UASB para evitar la formación de algas por efecto de fotosíntesis, también se colocaron soportes de madera para evitar deformaciones en la estructura del reactor.*



*Figura III.40.- Soporte en la base del reactor, con pata niveladoras por tornillos para asegurar que el reactor este nivelado en todo momento.*

## **7. ENSAYO DE TRAZADORES**

### **a) METODOLOGIA DE REALIZACION DE ENSAYOS DE TRAZADORES**

#### **i) Introducción**

Con la finalidad de realizar correctamente los ensayos de trazadores se siguieron las siguientes pautas, durante los trabajos de campo, de modo tal de tener en todo momento un estricto control sobre las diferentes tareas conexas.

#### **ii) Tareas preliminares a los ensayos:**

##### **En la primera etapa:**

La primera etapa fue con el reactor piloto UASB sin lodo, aquí no se realizó ninguna tarea preliminar a los ensayos.

##### **En la segunda etapa:**

La segunda etapa fue con el reactor piloto UASB con lodo, aquí se realizó las siguientes tareas preliminares a los ensayos:

El día anterior al ensayo se llenó el tanque de almacenamiento con agua potable y se le adicionó 250 gr. de NaCl, el cual fue disuelto por completo. Además se llenó el reactor piloto UASB con agua potable.



*Figura III.41.- Preparación de la solución salina para saturar el manto de lodo.*

Posteriormente se calibró el caudal de  $0.31 \text{ ml/seg} \pm 2.5\%$ , por cada salida del repartidor de caudal, esto tuvo como finalidad saturar el lodo del reactor con la solución salina, y así evitamos interferencias como pérdida del ión cloruro en el manto de lodo por retención. Este proceso se realizó aproximadamente por 18 horas. Durante las 3 primeras horas se revisó que el caudal regulado se mantenga constante y también se observó el óptimo funcionamiento de las válvulas de aire.



*Figura III.42.- Regulando caudales de salida del balde repartidor.*

Para eliminar posibles obstrucciones en las tuberías y los puntos de ingreso se inyectó el fluido a presión con ayuda de una jeringa de 20ml. Una vez estabilizado el caudal efluente se midió, con la finalidad de verificar que el caudal de ingreso y caudal de salida del reactor piloto UASB fuera el mismo.

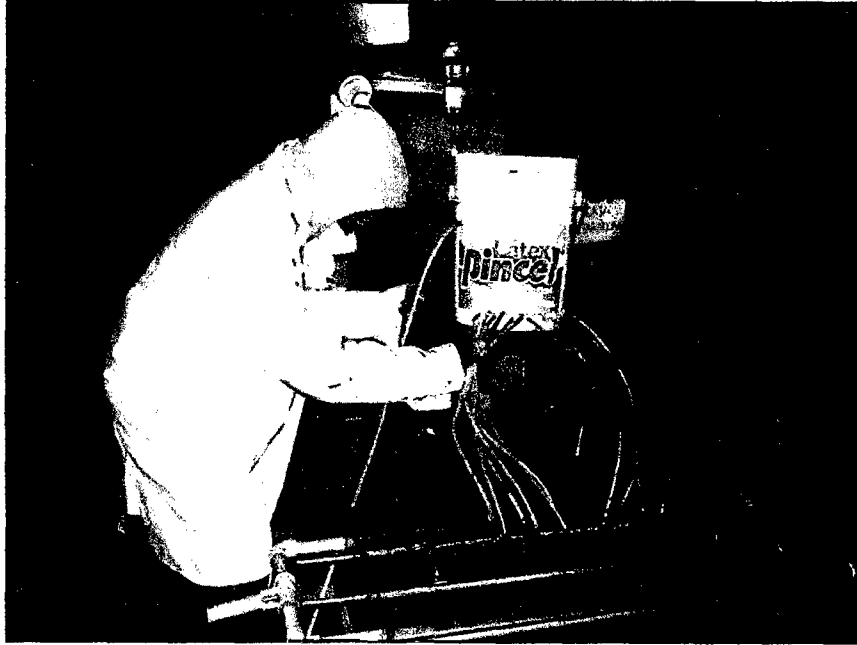


Figura III.43.- Mediciones de caudal durante la madrugada para verificar la continuidad en la aplicación de la solución saturadora.

Esquema de Concentraciones a la Salida del Reactor Uasb  
en Presencia del Manto de Lodos

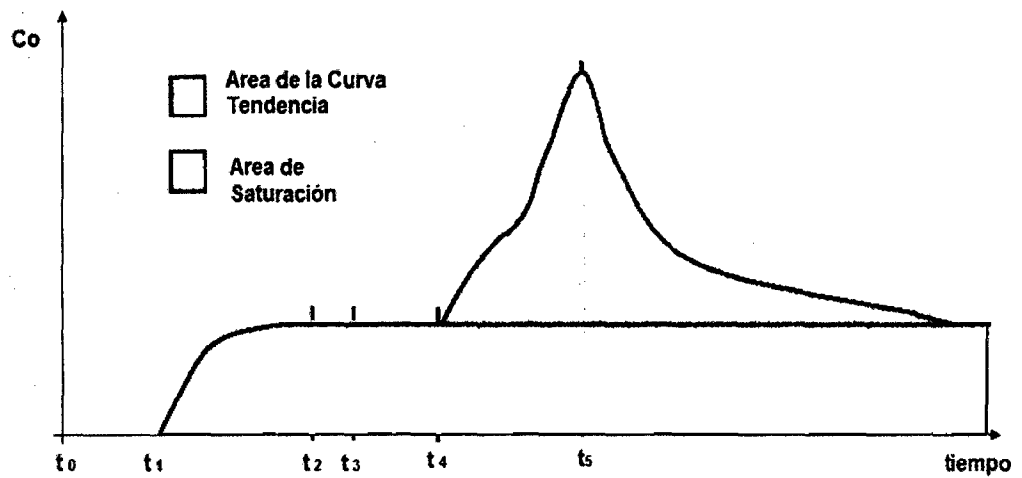


Figura III.44.- Concentración del trazador antes, durante y después del ensayo.

De la figura:

- $t_0$ : Inicio de la aplicación de la solución saturadora.
- $t_1$ : Aparición de la solución saturadora en el afluente.
- $t_2$ : Punto donde el manto de lodos está saturado con el trazador. La curva se mantiene horizontal.
- $t_3$ : Aplicación del trazador.
- $t_4$ : Aparición del trazador en el afluente.
- $t_5$ : Punto de concentración máxima a la salida del reactor.

### iii) Tareas previas en el día de los Ensayos:

#### En la primera etapa:

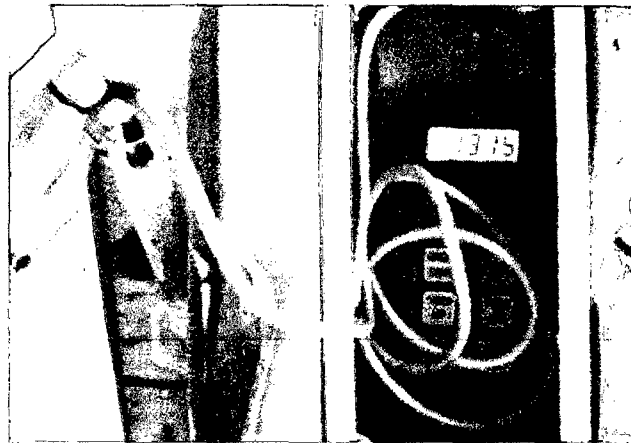
Se verificó que el caudal de cada salida del repartidor de caudal fuese  $0.31\text{ml/seg} \pm 2.5\%$ , en los casos que no cumplía este rango se tuvo que recalibrarlo. Posteriormente para eliminar posibles obstrucciones en las tuberías y los puntos de ingreso se inyectó la solución salina a presión con ayuda de una jeringa de 20ml. Luego se revisó el funcionamiento óptimo de las válvulas de aire.

Una vez estabilizado el caudal efluente se midió, con la finalidad de verificar que el caudal de ingreso y caudal de salida del reactor piloto UASB fuera el mismo. Posteriormente se tomó una muestra y se determinó su temperatura.

Finalmente se realizó la calibración del inyector de trazador a un caudal de  $0.55\text{ml/seg} \pm 2.5\%$  por cada válvula de paso.

**En la segunda etapa:**

Antes de la realización del ensayo se determinó los valores de conductividad del afluente y efluente del reactor piloto UASB. Si los valores de conductividad eran iguales o muy cercanos indicaba que el manto de lodo estaba saturado, por lo que se procedía a realizar el ensayo, en caso contrario se esperó a que los valores se igualen. Se tuvo también presente la temperatura ya que esta puede distorsionar los valores de la conductividad.



*Figura III.45.- Medición de la conductividad.*

Se verificó que el caudal de cada salida de la caja repartidora de caudal fuese  $0.31\text{ml/seg} \pm 2.5\%$ , en los casos que no cumplía este rango se tuvo que recalibrarlo. Posteriormente para eliminar posibles obstrucciones en las tuberías y los puntos de ingreso se inyectó la solución salina a presión con ayuda de una jeringa de 20ml. Luego se revisó el funcionamiento óptimo de las válvulas de aire.

Una vez estabilizado el caudal efluente se midió, con la finalidad de verificar que el caudal de ingreso y caudal de salida del reactor piloto UASB fuera el mismo. Posteriormente se tomó una muestra y se determinó su temperatura.

Finalmente se realizó la calibración del inyector de trazador a un caudal de  $0.55\text{ml/seg} \pm 2.5\%$  por cada válvula de paso.





*Figura III.46.- Medición del caudal de salida.*

#### **iv) Tareas a desarrollar durante el Ensayo:**

Las tareas a continuación a ser mencionadas, se realizarán tanto para la primera etapa como la segunda etapa.

Para la preparación del trazador se disolvió completamente 160 gr NaCl en 4 litros de agua. Posteriormente se determinó los parámetros de temperatura, conductividad y densidad.

Luego se depositó el trazador en el inyector, previamente calibrado. El tiempo de aplicación fue  $1/16$  del tiempo de retención hidráulico real ( $\leq 10$  minutos). Durante la aplicación también se aforo el caudal de salida del reactor piloto UASB, con la finalidad de verificar el caudal de aplicación del trazador.



*Figura III.47.- Inyección de trazador.*

Se verificó el paso del trazador a través de las tuberías de ingreso al reactor piloto UASB, así como también el buen funcionamiento de las válvulas de aire, se observó que no halla fugas, evitando las falsas lecturas.



*Figura III.48.- Verificación de paso de trazador a través de las válvulas y de los conductos.*

Al finalizar la inyección, se puso cuidado y énfasis en las tareas periódicas, estas fueron verificación del caudal de ingreso y salida, verificación del óptimo funcionamiento de las válvulas de aire y determinación de la temperatura. Estas se realizaron simultáneamente con el muestreo.

Durante el ensayo se los muestreos con los intervalos mínimos que se indican a continuación:

HORA DE MUESTREO	FRECUENCIA	PUNTOS DE TOMA
1 <sup>era</sup> y 2 <sup>da</sup> hora	Cada 30 min	Entrada / Salida
3 <sup>era</sup> hora	Cada 15 min	Entrada / Salida
4 <sup>ta</sup> y 5 <sup>ta</sup> hora	Cada 10 min	Entrada / Salida
6 <sup>ta</sup> hora	Cada 15 min	Entrada / Salida
7 <sup>ma</sup> y 8 <sup>va</sup> hora	Cada 30 min	Entrada / Salida

*Cuadro III.10: Frecuencias de muestreo.*

En la primera etapa, los parámetros determinados en cada muestra fueron: Conductividad y temperatura.

En la segunda etapa, los parámetros determinados en cada muestra fueron: Conductividad, prueba de cloruros y temperatura.



Figura III.49.- Determinación de cloruros.

La duración de la prueba fue dos veces el tiempo de retención hidráulico teórico, obtenido de la siguiente manera:

$$t_0 = \frac{V}{Q} \quad \text{Ec. III.7}$$

Donde:

- $t_0$ : Tiempo de retención hidráulico teórico
- $V$ : Volumen total
- $Q$ : Caudal

**v) Tareas a desarrollar finalizado el Ensayo:**

Para la segunda etapa: finalizado la toma de muestras se continuó dejando pasar el mismo caudal de tal modo de tener la seguridad que todo el trazador salga del reactor piloto UASB, para realizar la siguiente prueba, este proceso se duró aproximadamente por 18 horas.

**b) LOS ENSAYOS QUE SE REALIZARÓN**

Los ensayos de trazadores que se realizaron se dividieron en dos etapas. La primera etapa fue el reactor piloto UASB en ausencia de manto de lodo. La segunda etapa fue el reactor piloto UASB en presencia de manto de lodo.

Se tomó la decisión de realizar estas dos etapas, por el motivo que en los diseños de reactores tipo UASB se determina el tiempo de retención hidráulico teórico con el volumen total del reactor sin tomar en cuenta el volumen que ocupa el manto de lodo, lo que disminuye el volumen activo.

Adicionalmente a los ensayos antes mencionados se realizó un ensayo para poder visualizar y tener un mejor entendimiento de los flujos de corriente, las zonas muertas y las zonas de cortocircuito que se presentan en el reactor piloto UASB. Para ello realizamos pruebas de color tanto con lodo como sin lodo.

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Ensayo de Trazadores con Color en Ausencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°01
- Ensayo de Trazadores con Color en Presencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°02
- Ensayo de Trazadores con NaCl en Ausencia del Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con NaCl del N°01 al N°09
- Ensayo de Trazadores con NaCl en Presencia del Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con NaCl del N°10 al N°14.

## **CAPITULO IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

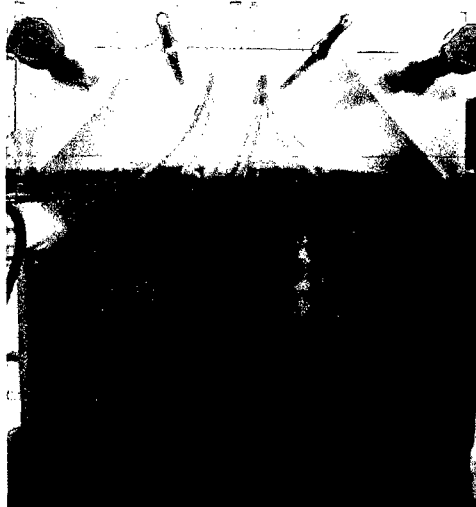
### **A. INTRODUCCION**

En la presente investigación se realizaron dos grupos de ensayos de trazadores, en el primer grupo el trazador utilizado fueron colorantes naturales que se utilizaron para la visualización de las líneas de flujo y la determinación del volumen útil en el reactor piloto UASB, para lo cual se utilizó dos trazadores de colores contrastantes para una mejor observación de las zonas muertas en el efluente, se obtuvo como resultado que el porcentaje de volumen muerto, ubicado bajo la cámara separadora de gases, es 20% por lo que el volumen útil se reduce de 120 litros a 96.7 litros, lo que se mostrara en las sección siguientes.

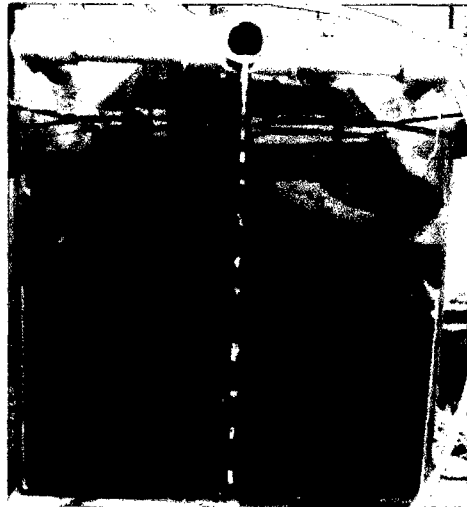
El segundo grupo de ensayos, se realizó con trazador NaCl, con la finalidad de encontrar el tiempo de retención hidráulico real y la distribución de los tiempos de residencia del fluido dentro del reactor piloto UASB mediante la determinación de la conductividad y/o concentración de cloruros a la salida del reactor.

Ambos tipos de ensayo se realizaron en dos etapas, la primera en ausencia de manto de lodos y la segunda con presencia de manto de lodos, esto se realizó con la finalidad de poder comparar como se ve afectado el tipo de flujo y el tiempo de retención hidráulico real con la presencia del manto de lodos.

**GRUPO N°01**  
**ENSAYOS DE TRAZADORES CON COLOR**



ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR  
EN AUSENCIA DEL MANTO DE LODOS



ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR  
EN PRESENCIA DEL MANTO DE LODOS

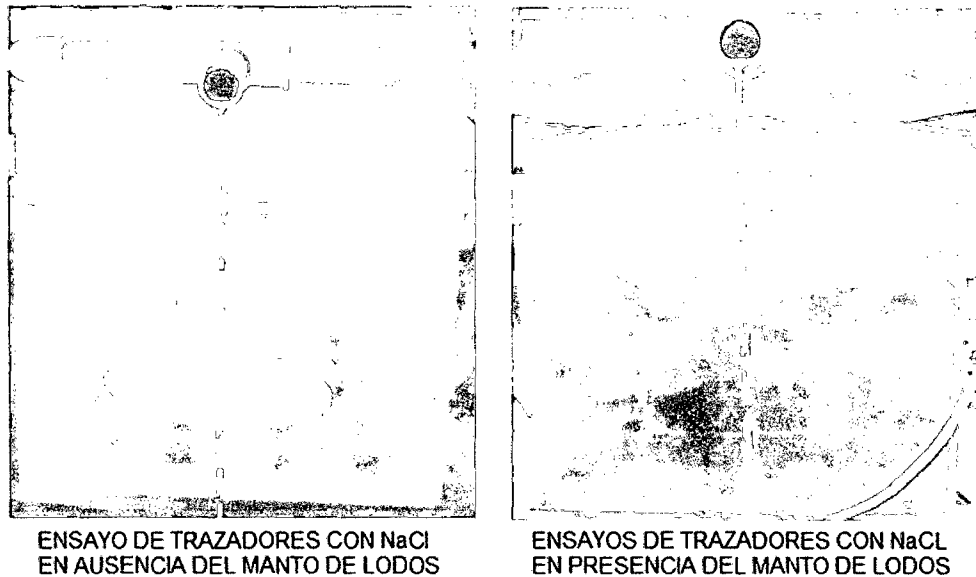
*Figura IV.1.- Grupo N°01: Ensayos de Trazadores con Color: Ensayo de Trazador con Color en ausencia de manto de lodo y Ensayo de Trazador con Color en presencia de manto de lodos*

Los ensayos realizados se enumeran de la siguiente manera:

Primer Grupo:

- Ensayo de Trazadores con Color en Ausencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°01
- Ensayo de Trazadores con Color en Presencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°02

**GRUPO N°02**  
**ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl**



*Figura IV.2.- Grupo N°02: Ensayos de trazadores con NaCl: Ensayo de Trazador con NaCl en ausencia de manto de lodo y Ensayo de Trazador con NaCl en presencia de manto de lodos*

**Segundo Grupo:**

- Ensayo de Trazadores con NaCl del 01 al 09 fueron realizados sin la presencia del manto de lodos.
- Ensayo de Trazadores con NaCl del 10 al 14 fueron realizados con la presencia del manto de lodos.

Además se realizaron las caracterizaciones del agua y el lodo utilizados, así como la determinación del volumen útil dentro del reactor piloto UASB.



## B. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA Y LODO

### 1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE

En el Cuadro IV.1 se presenta los principales parámetros y sus valores de la caracterización del agua potable usada para la realización de los ensayos en el Reactor Piloto UASB.



*Figura IV.3.- En la izquierda: resultado de la titulación del Análisis de Cloruros, en la derecha: resultado de la titulación del Análisis de Dureza*

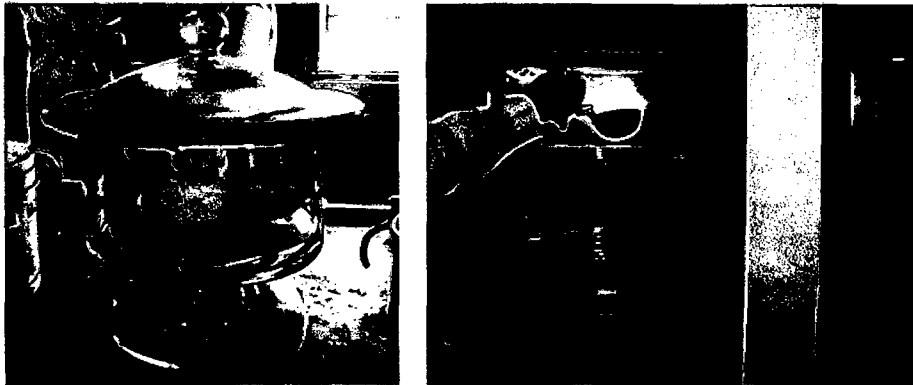
PARÁMETROS	VALORES
Cloruros	165 mg/L
Alcalinidad	172 mg/L
Dureza	520 mg/L
Sulfatos	180 mg/L
Conductividad	1157 uS
pH	8.28
Sólidos Disueltos	563 ppm

*Cuadro IV.1.- Caracterización del agua potable.*

Según la caracterización, Cuadro IV.1, el agua es considerada un agua muy dura, mayor igual a 300 mg/L<sup>(2)</sup> por lo que puede generar incrustaciones en las tuberías y válvulas, ya que estas son de pequeñas dimensiones. Otro parámetro que nos indica esta dureza del agua es el valor elevado del pH. Por otra parte la dureza no carbonatada es significativamente alta, esto se puede observar en los valores obtenidos de sulfatos y cloruros.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL LODO

En el Cuadro IV.2 se presenta los principales parámetros y valores de la caracterización del lodo obtenido del manto de lodo del UASB-UNITRAR a una altura de 2 m con respecto del fondo del reactor, el cual fue usado para los Ensayos de Trazadores en presencia de Manto de lodos.



*Figura IV.4.- En la foto se observa los materiales y equipos usados en la Determinación de dureza*

PARÁMETROS	VALORES
Densidad	1.0474 g/ml
Sólidos Totales	1931.17 mg/L
Sólidos Disueltos Totales	1250.05 mg/L

<sup>(2)</sup> Libro Análisis de Agua y Desagüe, autor Jimeno Blasco, Enrique, página 126.

PARÁMETROS	VALORES
Sólidos Suspendidos Totales	681.12 mg/L

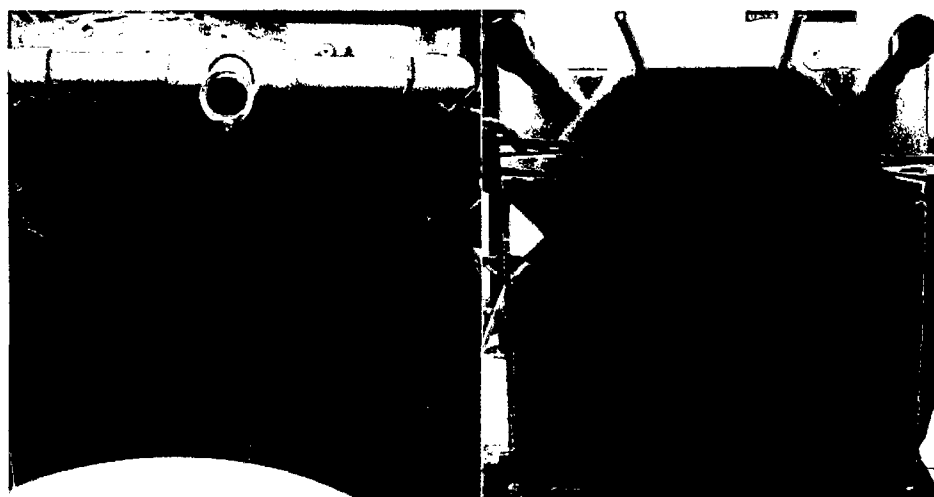
*Cuadro IV.2.- Caracterización del lodo.*

El lodo usado para la caracterización estaba en estado semisólido, en suspensión, por lo que se observa que la densidad es cercana a uno.

### **C. DETERMINACION DEL VOLUMEN ÚTIL EN EL REACTOR PILOTO UASB**

Previo al inicio de los ensayos de trazadores para determinar el Tiempo Retención Hidráulico Real, se realizó una prueba con trazadores de color para determinar visualmente el volumen útil (que participa en el proceso) dentro del reactor piloto UASB.

Primero se llenó el reactor con agua con colorante verde, para posteriormente inyectar una dilución de colorante fucsia, para conseguir un alto contraste e identificar visualmente las zonas que no participan en el volumen útil.



*Figura IV.5.- Visualización del Volumen Útil.*

Observándose que el volumen sobre los deflectores, correspondiente a la cámara separadora de gases no participe como volumen útil (zona verde), ya que las líneas de flujo (zona fucsia) no ingresan a esta zona, sino que transitan directamente a la zona de recolección.

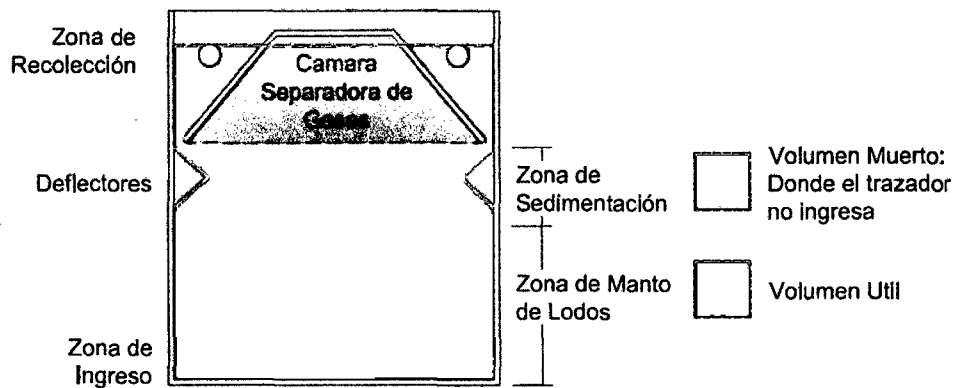


Figura IV.6.- Esquema de las líneas de flujo observadas: El área verde representa el volumen que no interfiere como volumen útil.

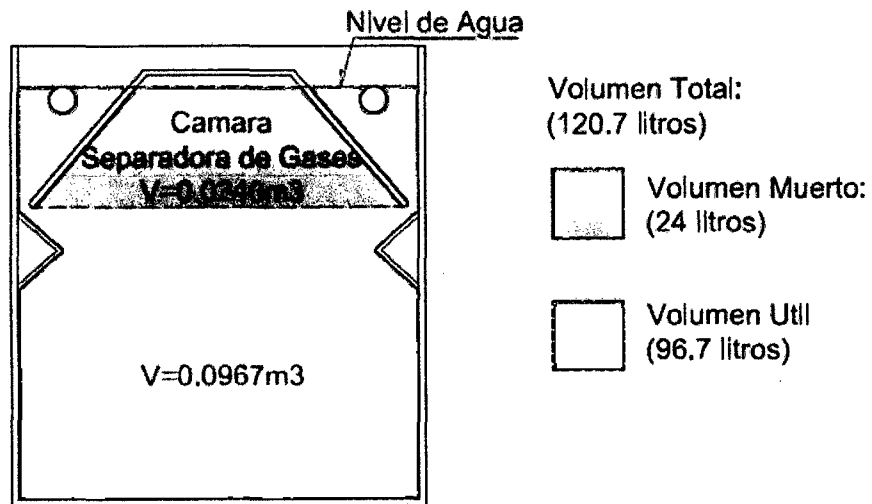
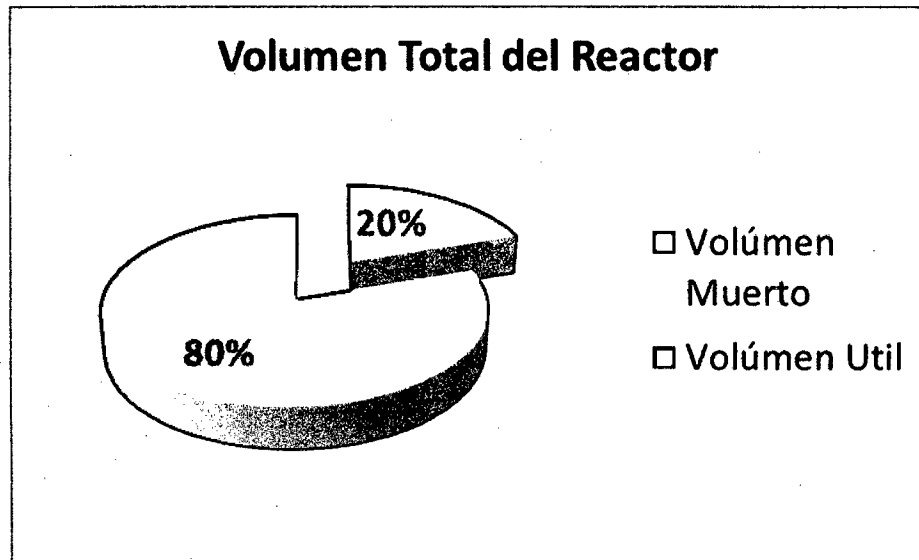


Figura IV.7.- Volumen del área útil y volumen de la zona muerta.

El porcentaje de volumen muerto bajo la cámara separadora de gases es 20% por lo que el volumen útil se reduce de 120 litros a 96.7 litros.



*Figura IV.8.- Distribución del volumen en el interior del reactor piloto UASB*

#### **D. PRIMER GRUPO:**

##### **ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR**

Se realizaron dos ensayos de trazadores con color utilizando colorantes naturales para evitar la toxicidad en el manto de lodos, con la finalidad de observar las líneas de flujo y el comportamiento del trazador dentro del reactor piloto UASB para un mejor entendimiento del comportamiento hidráulico al interior del reactor tanto en un reactor con ausencia de manto de lodos como con presencia del manto de lodos. Los ensayos que se realizaron fueron:

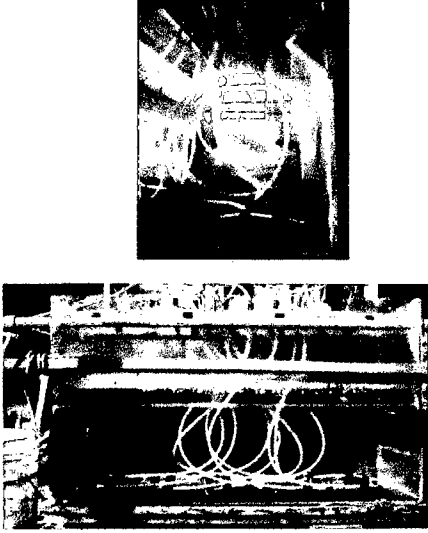
- Ensayo de Trazadores con Color en Ausencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°01
- Ensayo de Trazadores con Color en Presencia de Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con Color N°02

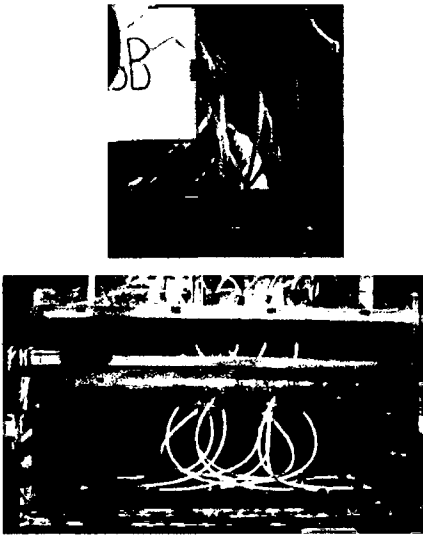
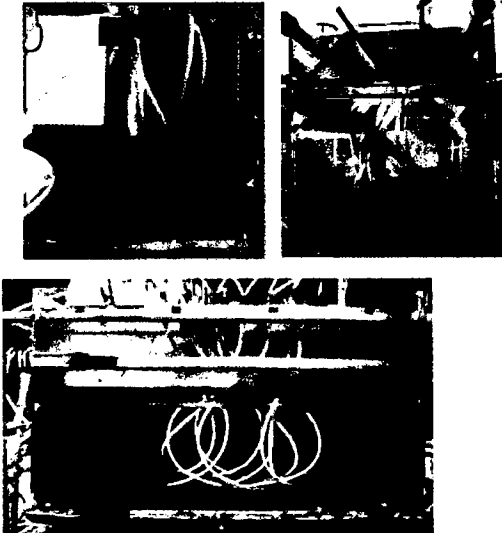
### 1. ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR EN AUSENCIA DE MANTO DE LODOS.

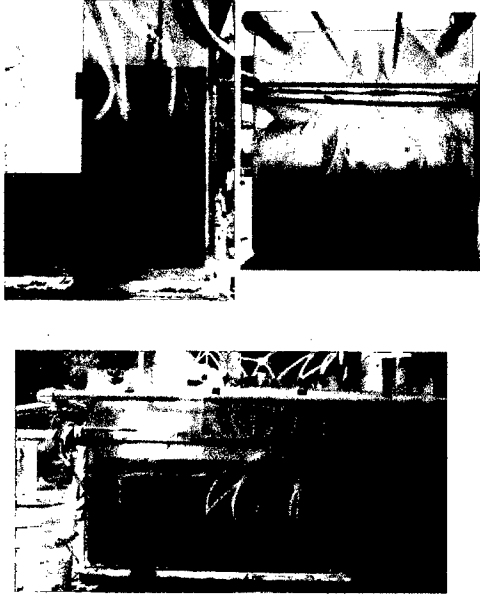

El primer ensayo de trazadores realizado es con trazador de color en ausencia de manto de lodos, utilizando el color verde como trazador. La finalidad de este ensayo es observar el comportamiento hidráulico en el interior del reactor piloto UASB para entender de mejor manera lo que ocurre en él.

#### a) ENSAYO DE TRAZADORES DE COLOR N°01

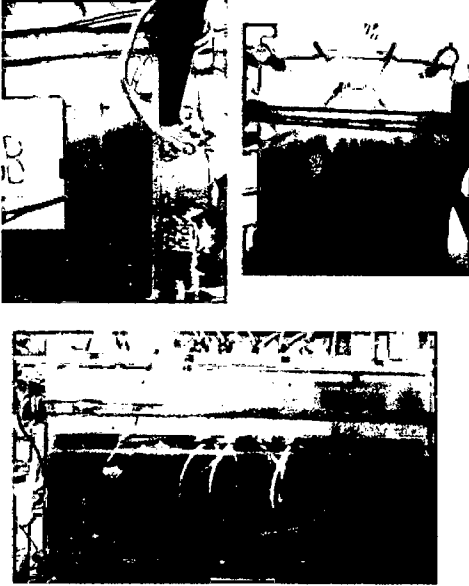
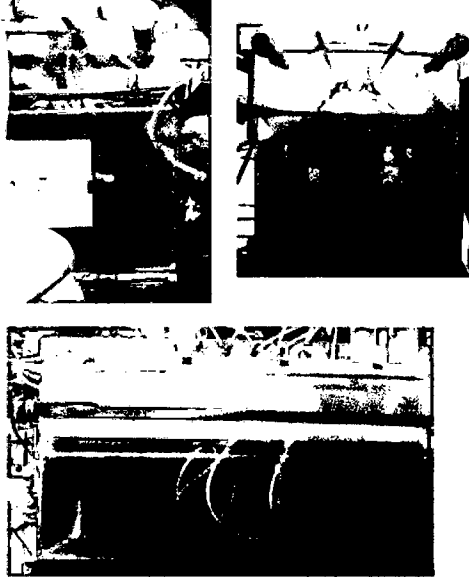
#### SECUENCIA FOTOGRAFICA: ENSAYO DE TRAZADORES DE COLOR EN AUSENCIA DE MANTO DE LODOS



TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
7:30 am (0min)		El trazador ingresa al reactor por la parte inferior y se distribuye formando un colchón en la parte inferior del reactor.

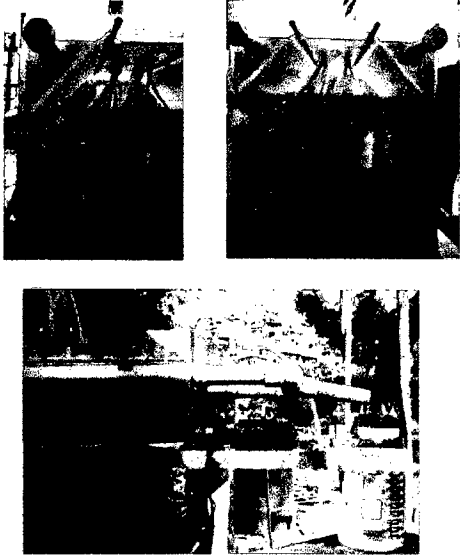
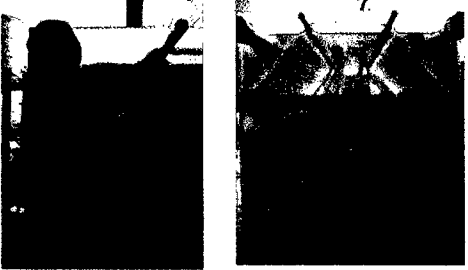

TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
<p>07:50 am (20min)</p>		<p>El espesor del colchón formado por el trazador aumenta.</p>
<p>08:45 am (75min)</p>		<p>Aumento del espesor del colchón, se observa que se realiza de forma homogénea.</p>

TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
<p><b>10:30 am</b> <b>(180min)</b></p>		<p>El espesor del colchón formado por el trazador aumenta su altura.</p>
<p><b>11:30 am</b> <b>(240min)</b></p>		<p>El espesor del colchón formado por el trazador aumenta su altura.</p>



TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
<p>12:30 pm (300min)</p>		<p>El colchón formado por el trazador alcanza el nivel de los deflectores.</p>
<p>2:30 pm (420min)</p>		<p>El nivel del colchón se mantiene en la zona de sedimentación, se observa que el trazador no ingresa en el área bajo la campana.</p>

TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
<p>3:00 pm (450min)</p>		<p>El trazador ingresa a la zona de recolección y se observa que el trazador no ingresa a la zona bajo la campana.</p>
<p>3:30 pm (480min)</p>		<p>El nivel del colchón formado por el trazador, se mantiene en el interior del reactor, sin ingresar en el área bajo la campana.</p>

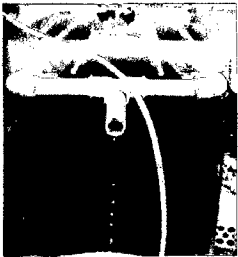
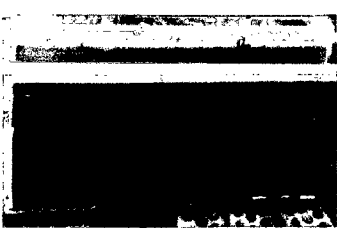
TIEMPO	VISTA FRONTAL / VISTA LATERAL	DESCRIPCIÓN
<p>4:30 pm (540min)</p>		<p>El trazador continúa sin ingresar a la zona bajo la campana.</p>
<p>6:30 pm (660min)</p>		<p>El trazador continúa sin ingresar a la zona bajo la campana.</p>
<p>7:00 pm (720min)</p>		<p>Se observa que el área bajo la campana no participa como volumen útil.</p>


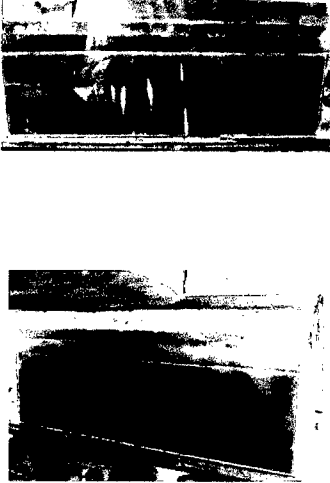
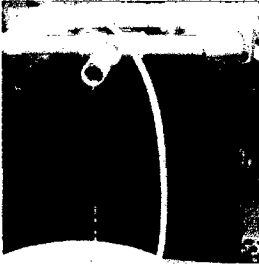
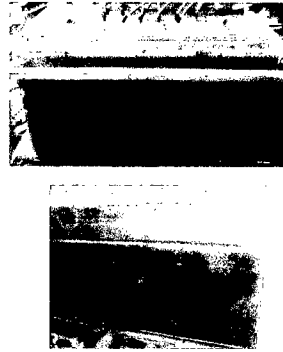
## 2. ENSAYO DE TRAZADORES CON COLOR EN PRESENCIA DE MANTO DE LODOS.


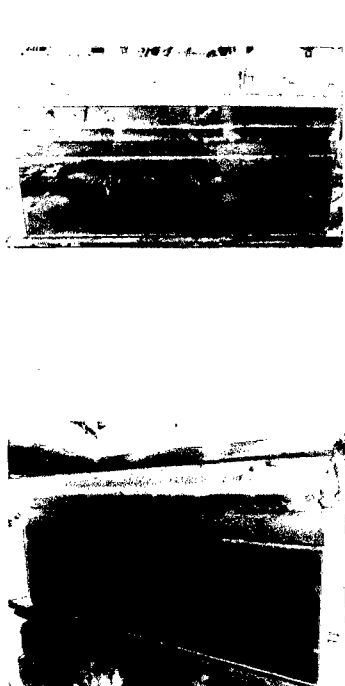
El segundo ensayo de trazadores realizado es con trazador de color en presencia de manto de lodos, utilizando el color fucsia como trazador para conseguir mayor contraste. La finalidad de este ensayo es observar el comportamiento hidráulico en el interior del reactor piloto UASB con presencia de manto de lodos para entender de mejor manera los flujos y los tiempos de retención, así como también los efectos de la presencia de manto de lodos en los comportamientos de estos.

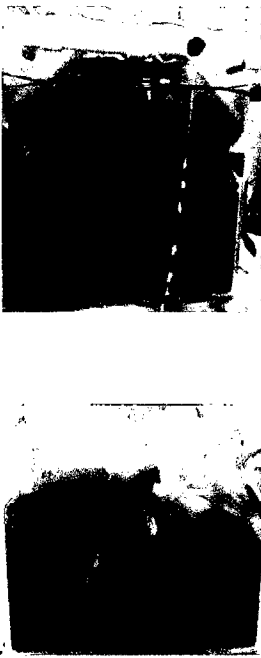



### a) ENSAYO DE TRAZADORES DE COLOR N°02



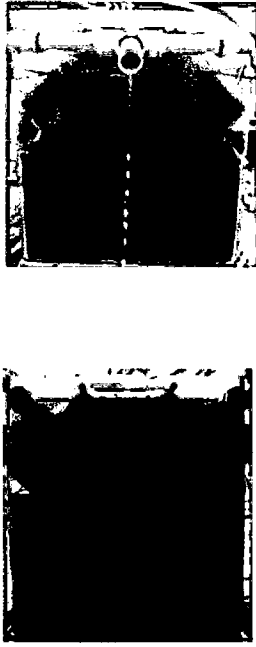
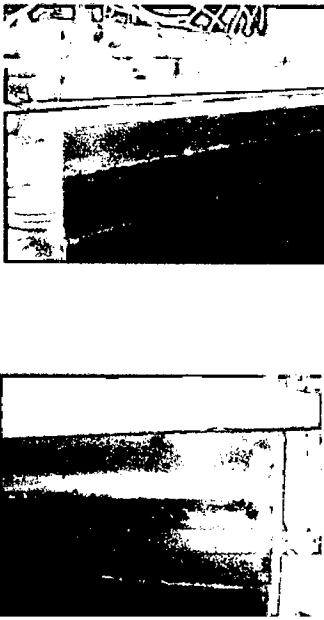
**SECUENCIA FOTOGRAFICA: ENSAYO DE TRAZADORES DE COLOR EN PRESENCIA DE MANTO DE LODOS**

TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
10:30 am (0 min)			Se aplica el trazador.


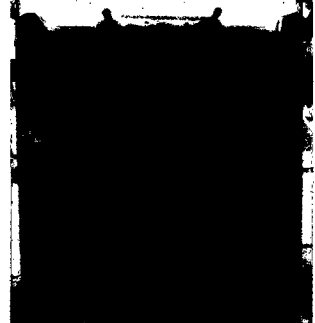
TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
<p>10:36 am (6min)</p>			<p>El trazador ingresa en las canalizaciones existentes en el manto de lodos.</p>
<p>10:45 am (15min)</p>			<p>El trazador recorre diferentes caminos dentro del manto de lodos.</p>

TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
<p>11:00 am (30min)</p>			<p>El trazador llega a la superficie superior del manto de lodos en la parte frontal, mientras que en la parte posterior todavía se encuentra en las canalizaciones, esto demuestra que el flujo recorre diferentes caminos dentro del manto de lodos, tomando diferentes tiempos en llegar a la superficie del manto de lodos.</p>

TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
<p><b>11:15 am (45min)</b></p>			<p>El trazador llega a la superficie superior del manto de lodos en la parte frontal, mientras que en la parte posterior recién empieza a llegar a la superficie. La distribución de trazador en el reactor no es uniforme.</p>
<p><b>11:30 am (60min)</b></p>			<p>La distribución del trazador dentro del reactor no es uniforme.</p>

TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
<p><b>11:45 am (75min)</b></p>			<p>En la parte posterior empieza a aparecer mayor presencia de trazador en la superficie del manto de lodos.</p>
<p><b>12:30 pm (120min)</b></p>			<p>El trazador ingresa a la zona de recolección, se observa que el trazador no ingresa al área bajo la campana, lo que se traduce en una reducción del volumen útil en el reactor.</p>



TIEMPO	VISTA FRONTAL/POSTERIOR	VISTA DERECHA/IZQUIERDA	DESCRIPCIÓN
1:00pm (150min)			Se observa que el trazador no ingresa en el área bajo la campana, y así se mantiene en las horas posteriores, solo presentando disminución en la intensidad del color.

#### E. PRIMER GRUPO:

#### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON COLOR.

##### 1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRAZADOR CON COLOR EN AUSENCIA DEL MANTO DE LODOS.

Del Ensayo de Trazadores con Color N°01 realizado en ausencia del manto de lodos, se observa que el área bajo la cámara separadora de gases, correspondiente al 20% del volumen total del reactor, no interviene como volumen útil, reafirmando lo expuesto en el ítem "B. DETERMINACION DEL VOLUMEN UTIL EN EL REACTOR PILOTO UASB" del presente capítulo.

Se observa también, que la distribución del trazador en el fondo del reactor es uniforme, indicando que el dispositivo de ingreso es adecuado, asegurando una distribución homogénea a lo largo del fondo del reactor, además el ascenso de las líneas de flujo, representadas por el colchón de trazador (colchón de color verde), es uniforme indicando que el flujo predominante es el régimen Flujo Pistón y que existe un fuerte fenómeno de difusión que se puede observar en el aumento del espesor del colchón de trazador en el tiempo disminuyendo su concentración (el color verde se va atenuando conforme el colchón aumenta su espesor).

## **2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRAZADOR CON COLOR EN PRESENCIA DEL MANTO DE LODOS.**

Del Ensayo de Trazadores con Color N°02 realizado en presencia del Manto de Lodos, se observa que el área bajo la cámara separadora de gases, correspondiente al 20% del volumen total del reactor, no interviene como volumen útil, reafirmando lo expuesto en el ítem "*B. DETERMINACION DEL VOLUMEN UTIL EN EL REACTOR PILOTO UASB*" del presente capítulo.

De los resultados del Ensayo en cuestión, se observa claramente que, si bien la distribución es uniforme en el fondo del reactor (de lo observado en el Ensayo de Trazadores con Color N°01), el paso del fluido a través del manto de lodos no es uniforme, sino que genera canalizaciones no uniformes a través de él, ocasionando que el fluido recorra diferentes caminos dentro del manto de lodos y por ende el tiempo de permanencia en el Manto de Lodos de las diferentes fracciones del fluido son diferentes, originando aparición tempranas y tardías en la superficie del Manto de Lodos, lo que se ve traducido en una distribución no uniforme del trazador en dicha superficie que se observa en los tiempos 11:15 am (45min) y 11:45 am (75min) del Ensayo de Trazadores N°02.

Además una vez atravesado el Manto de Lodos, el trazador asciende por la zona de sedimentación hacia la zona de recolección, sin ingresar al área bajo la cámara separadora de gases.

Las diferentes fracciones del volumen del trazador emergen por diferentes puntos en la superficie del manto de lodos en diferentes instantes de tiempo y aunque se observa el fenómeno de difusión, este no es tan fuerte como para que el trazador se disperse en toda la superficie del Manto de Lodos y la zona de sedimentación, dando lugar a que las diferentes fracciones del trazador ingresen a la zona de recolección en diferentes instantes de tiempo.

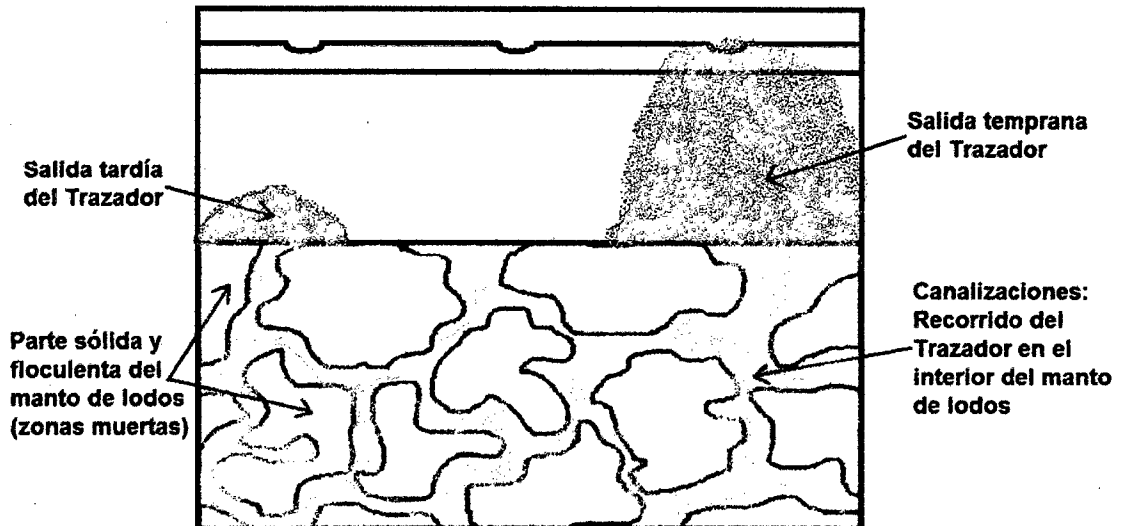


Figura IV.9.- Formación de canalización en el manto de lodos

### 3. DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DEL MANTO DE LODOS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

De los resultados obtenidos en los Ensayos de Trazadores con Color, tanto en ausencia como en presencia del Manto de Lodos, se observó:

Que en el Ensayo de Trazadores con Color N°01, el ascenso del colchón de trazador es uniforme a lo largo del reactor, en contraposición a lo observado en el Ensayo de Trazadores con Color N°02, donde el trazador no forma un colchón uniforme a lo largo del reactor, sino que las diferentes fracciones del trazador ascienden en diferentes tiempos, debido a que toman diferentes caminos (canalizaciones) en el interior del Manto de Lodos, demostrando que la presencia del Manto de Lodos influye en la distribución del trazador en el interior del reactor y en los tiempos de permanencia en el reactor de las diferentes fracciones del trazador.

En el Ensayo de Trazadores con Color N°02 en presencia del manto de lodos, el trazador pasa a través del manto de lodos, de espesor 18cm, en 45 min, mientras que en el Ensayo de Trazadores con Color N°01 en ausencia del

manto de lodos, el colchón formado por el trazador alcanza la misma altura (18cm) a los 240 minutos. Además se observa que el tiempo en que el trazador ingresa por primera vez en la zona de recolección, es 450 min para el Ensayo de Trazadores con Color N°01 en ausencia del manto de lodos y 120 min para el Ensayo de Trazadores con Color N°02 en presencia de manto de lodos, lo que demuestra que la presencia del Manto de Lodos reduce el tiempo de retención hidráulico real en el reactor.

#### **F. SEGUNDO GRUPO:**

##### **ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

Se realizaron 14 ensayos de trazadores con NaCl tanto con ausencia y presencia de manto de lodos para hacer énfasis en el papel que cumple el manto de lodos en el comportamiento hidrodinámico en el reactor piloto UASB, en la disminución en el tiempo de retención hidráulico y el tipo de flujo que se desarrolla.

Los ensayos que se realizaron son:

- Ensayo de Trazadores con NaCl en Ausencia del Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con NaCl del N°01 al N°09
- Ensayo de Trazadores con NaCl en Presencia del Manto de Lodos:  
Ensayo de Trazadores con NaCl del N°10 al N°14

## **1. ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl EN AUSENCIA DE MANTO DE LODOS.**

Estos ensayos se realizaron en el reactor piloto UASB en ausencia de manto de lodos con la finalidad de posteriormente comparar los resultados con los resultados obtenidos en ensayos de trazadores con NaCl en presencia de lodos, para observar como el manto de lodos influye en el comportamiento hidráulico.

Se realizaron nueve (09) ensayos en esta etapa, el primer y segundo ensayo se realizaron con caudales promedios de 2.48 y 2.58 ml/s equivalentes a 7.2 y 7.5 l/s en el reactor UASB-UNITRAR respectivamente, los ensayos desde el tercero hasta el noveno se realizaron con caudales más cercanos a 3.43 ml/s y a su equivalente de 10 l/s que es el caudal de diseño del reactor UASB-UNITRAR.

Con esta diferencia en los caudales promedio se busca tener una visión más clara de cómo el caudal promedio, afecta los tipos de flujo que se presentan en el interior del reactor piloto UASB.

Los ensayos de trazadores de este grupo y los caudales promedios utilizados en cada uno se muestran a continuación:

- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 01 con  $Q_p = 2.48$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 02 con  $Q_p = 2.58$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 03 con  $Q_p = 3.71$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 04 con  $Q_p = 3.57$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 05 con  $Q_p = 3.73$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 06 con  $Q_p = 3.56$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 07 con  $Q_p = 3.25$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 08 con  $Q_p = 3.61$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 09 con  $Q_p = 3.33$  ml/s

**a) Ensayo de Trazadores con NaCl N°01**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°01 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

El ensayo de trazadores N°01 se realizo con trazador tipo NaCl el 12/12/2010, iniciando a las 7:30 horas correspondiente a la aplicación del trazador de manera puntual y finalizando a las 5:35 horas con la ultima medición realizada.

A continuacion se muestra el resumen con los rangos de temperatura que se presentaron durante el ensayo.

Ensayo N° : 01  
Fecha : 12/12/10  
T° Ambiental : 18°C / 24°C  
T° Agua : 19.5°C / 23.1°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

El trazador utilizado en el Ensayo de Trazadores N°01 es el NaCl. La preparación del trazador es 100 gr de NaCl (sal comun) diluido en 3 litros de agua con conductividad 1.15ms, resultando una mezcla con 33333 ppm de concentración y 47.27ms de conductividad.

**Trazador** : NaCl  
W de NaCl : 100.00 gr  
Volumen de : 3000.00 ml  
agua  
Concentración  
[ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
[ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
Conductividad : 1.15 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

Durante el Ensayo de Trazadores N°01 se obtuvo un caudal promedio de 2.48 ml/s, equivalente a 7.24 l/s en el reactor UASB-UNITRAR (calculado con el factor de escala 7:100), con mínimos de 2.17 ml/s y máximos de 3.22 ml/s.

En la planta piloto.

Qp : 2.48 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 7.24 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

La determinación del Tiempo de Retención Teórico, se realizó en base al caudal promedio medido durante el ensayo y al volumen útil determinado en el Capítulo IV - B. "Determinación del Volumen Útil en el Reactor", según lo indicado en la sección B - 1. "Tiempo de Retención" en el Marco Teórico.

Volumen Útil : 96.70 L

Caudal : 2.48 ml/s

Promedio

To : 10.82 horas <> 649.08 min.



### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

**Tabla IV.3.**  
**RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°01 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.15	1.15	3.22	22.0	20.0
08:30	60	1.20	1.20	2.17	22.0	21.0
09:30	120	1.19	1.19	2.41	21.0	21.0
10:00	150	1.17	1.17	2.39	22.0	22.0
10:30	180	1.17	1.17	2.50	22.0	22.0
11:00	210	1.16	1.16	2.39	23.0	22.0
11:30	240	1.16	1.16	2.82	23.0	22.5
12:30	300	1.16	1.16	2.35	23.0	22.5
13:40	370	1.16	1.16	2.42	23.1	24.0
14:00	390	1.15	1.17	2.82	23.1	24.0
14:25	415	1.15	1.16	2.67	23.1	24.0
14:55	445	1.15	1.16	2.47	23.1	22.0
15:25	475	1.15	1.16	2.47	23.1	21.0
15:40	490	1.15	1.16	2.47	23.1	21.0
16:20	530	1.15	1.18	2.47	23.1	20.0

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.3.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
16:20	530	1.15	1.18	2.47	23.1	20.0
16:40	550	1.13	1.20	2.47	22.4	20.0
16:55	565	1.13	1.32	2.47	22.4	19.5
17:15	585	1.13	1.44	2.47	22.4	19.5
17:45	615	1.12	1.43	2.47	20.5	19.0
18:25	655	1.11	1.79	2.47	20.5	19.0
18:35	665	1.11	1.93	2.47	20.0	19.0
18:45	675	1.11	2.01	2.47	20.0	19.0
18:55	685	1.12	2.01	2.47	20.0	19.0
19:05	695	1.12	1.96	2.47	20.0	18.0
19:15	705	1.10	1.98	2.47	19.5	18.0
19:25	715	1.10	1.85	2.47	19.5	18.0
19:35	725	1.12	1.86	2.47	19.5	18.0
19:45	735	1.13	1.82	2.47	19.5	18.0
20:05	755	1.12	1.79	2.47	19.5	18.0
20:15	765	1.12	1.79	2.47	19.5	18.0
20:35	785	1.11	1.77	2.47	19.5	18.0
21:00	810	1.11	1.77	2.47	19.5	18.0
21:20	830	1.10	1.76	2.47	19.5	18.0
21:35	845	1.10	1.75	2.47	19.5	18.0
21:50	860	1.11	1.73	2.47	19.5	18.0
22:50	920	1.11	1.71	2.47	19.5	19.0
23:50	980	1.11	1.69	2.47	21.0	19.0
00:35	1025	1.12	1.64	2.47	21.0	19.0
01:35	1085	1.12	1.60	2.47	21.0	19.0
02:35	1145	1.12	1.56	2.47	21.0	19.0
03:35	1205	1.12	1.53	2.47	21.0	19.0
04:35	1265	1.12	1.48	2.47	21.0	19.0
05:35	1325	1.12	1.44	2.47	21.0	19.0

#### **F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

En el Grafico IV.1. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varia de forma directa con la temperatura del agua, aunque no de forma constante, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

Grafico IV.1.

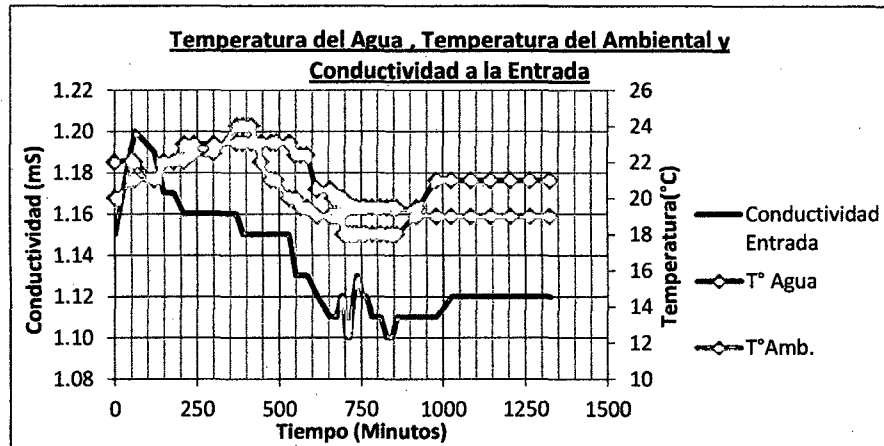
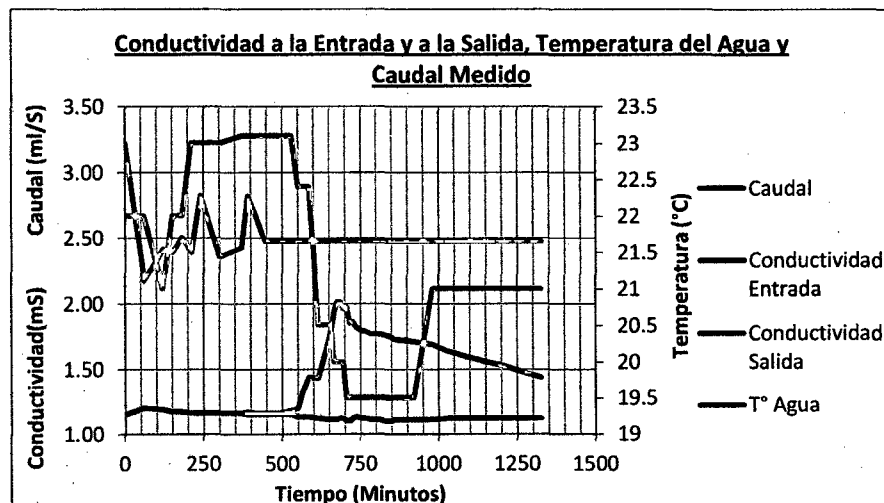


Grafico IV.2.



En el Grafico IV.2. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia a lo largo de la prueba, al inicio la temperatura es alta hasta un  $t = 615$  min (5:45 pm), donde hay un punto de inflexión, ya que despues de este la temperatura baja considerablemente.

### **G. CURVA E, F y 1-F**

Para facilitar el entendimiento y la descripción del tipo de flujo que se produce en el interior del reactor estudiado, es necesario la construcción de curvas que permitan observar la manera como se distribuye el trazador inyectado a lo largo del tiempo y además la fracción de trazador que permanece en el reactor a un determinado tiempo, estas curvas son:

- Curva E : Distribución de Edades del Fluido
- Curva F : Fracción Acumulada de Trazador de Salida
- Curva 1-F : Fracción de Trazador Retenido

#### **Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

De acuerdo con lo mencionado en el *Capítulo II "Marco Teórico"* en la sección E. "*Curva E, Distribución de Edad del Fluido*", para obtener la Curva E se utiliza la siguiente expresión, debido a que los intervalos de medición no son constantes.

$$E(t) = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(C_i + C_{i+1})\Delta t_i}{2}} \quad \dots \text{Columna (7)}$$

$$y \quad C_i = C_t - C_o$$

Donde:

- E(t) : Valor de la curva E para tiempo igual a "i"
- C<sub>i</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i"
- C<sub>i+1</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i+1"
- Δ t<sub>i</sub> : Intervalo de tiempo entre el tiempo "i" y el tiempo "i+1"
- C<sub>t</sub> : Concentración del trazador en el tiempo "i".
- C<sub>o</sub> : Concentración inicial del trazador.

Con esta expresión, se elaboro el Tabla IV.4. con los valores de E(t) (Columna 7), que se presenta a continuación.

Tabla IV.4.  
DATOS PARA LA CURVA E(t)

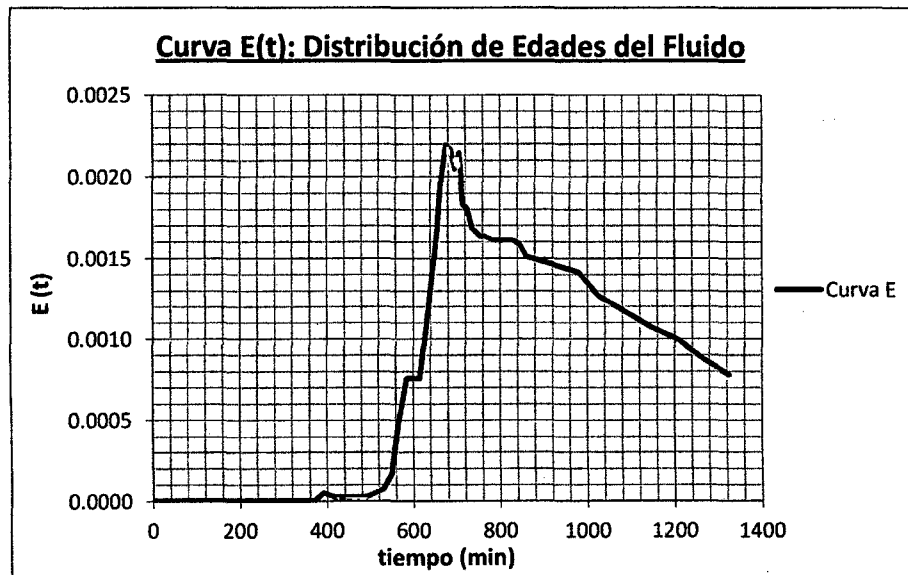
Hora (1)	tiempo (min) (2)	ti/to (3)	$\Delta t$ (min) (4)	$C_i=C_t-C_o$ (5)	$(C_i+C_{i+1})/2$ $\times \Delta t$ (6)	E(t) (7)
07:30	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00E+00
08:30	60	0.09	60.00	0.00	0.00	0.00E+00
09:30	120	0.18	60.00	0.00	0.00	0.00E+00
10:00	150	0.23	30.00	0.00	0.00	0.00E+00
10:30	180	0.28	30.00	0.00	0.00	0.00E+00
11:00	210	0.32	30.00	0.00	0.00	0.00E+00
11:30	240	0.37	30.00	0.00	0.00	0.00E+00
12:30	300	0.46	60.00	0.00	0.00	0.00E+00
13:40	370	0.57	70.00	0.00	0.00	0.00E+00
14:00	390	0.60	20.00	0.02	0.20	4.88E-05
14:25	415	0.64	25.00	0.01	0.38	2.44E-05
14:55	445	0.69	30.00	0.01	0.30	2.44E-05
15:25	475	0.73	30.00	0.01	0.30	2.44E-05
15:40	490	0.75	15.00	0.01	0.15	2.44E-05
16:20	530	0.82	40.00	0.03	0.80	7.31E-05
16:40	550	0.85	20.00	0.07	1.00	1.71E-04
16:55	565	0.87	15.00	0.19	1.95	4.63E-04
17:15	585	0.90	20.00	0.31	5.00	7.56E-04
17:45	615	0.95	30.00	0.31	9.30	7.56E-04
18:25	655	1.01	40.00	0.68	19.80	1.66E-03
18:35	665	1.02	10.00	0.82	7.50	2.00E-03
18:45	675	1.04	10.00	0.90	8.60	2.19E-03
18:55	685	1.06	10.00	0.89	8.95	2.17E-03
19:05	695	1.07	10.00	0.84	8.65	2.05E-03
19:15	705	1.09	10.00	0.88	8.60	2.15E-03
19:25	715	1.10	10.00	0.75	8.15	1.83E-03
19:35	725	1.12	10.00	0.74	7.45	1.80E-03
19:45	735	1.13	10.00	0.69	7.15	1.68E-03
20:05	755	1.16	20.00	0.67	13.60	1.63E-03
20:15	765	1.18	10.00	0.67	6.70	1.63E-03
20:35	785	1.21	20.00	0.66	13.30	1.61E-03
21:00	810	1.25	25.00	0.66	16.50	1.61E-03
21:20	830	1.28	20.00	0.66	13.20	1.61E-03
21:35	845	1.30	15.00	0.65	9.83	1.58E-03
21:50	860	1.32	15.00	0.62	9.53	1.51E-03
22:50	920	1.42	60.00	0.60	36.60	1.46E-03

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.4.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$t_i/t_o$ (3)	$\Delta t$ (min) (4)	$C_i=C_t-C_o$ (5)	$(C_i+C_{i+1})/2 \times \Delta t$ (6)	$E(t)$ (7)
23:50	980	1.51	60.00	0.58	35.40	1.41E-03
00:35	1025	1.58	45.00	0.52	24.75	1.27E-03
01:35	1085	1.67	60.00	0.48	30.00	1.17E-03
02:35	1145	1.76	60.00	0.44	27.60	1.07E-03
03:35	1205	1.86	60.00	0.41	25.50	9.99E-04
04:35	1265	1.95	60.00	0.36	23.10	8.78E-04
05:35	1325	2.04	60.00	0.32	20.40	7.80E-04

Grafico IV.3.



El Grafico IV.3. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

La curva F(t) representa al porcentaje acumulado de trazador que ha salido del reactor hasta el tiempo "t", mientras que la curva 1-F (t) representa el porcentaje de trazador que se encuentra en el interior del reactor en el instante "t". La curva F(t) se halla sumando el área bajo la curva E entre los instantes t=0 y t=i. De acuerdo a lo indicado en la sección F. "Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido." del Capítulo II "Marco Teórico" se usa la siguiente expresión para hallar las curva F(t) y 1-F(t) respectivamente.

$$F(t) = \int_0^t E dt \quad \dots \text{Columna (5)}$$

$$1-F(t) = 1 - \int_0^t E dt \quad \dots \text{Columna (6)}$$

Donde:

- F(t) : Valor de la curva F para tiempo igual a "i"
- E : o E(t) es el valor de la curva E para tiempo igual a "i"
- t : tiempo (min)
- dt : diferencial de tiempo

Con estas expresiones, se elabora la siguiente Tabla con los valores de F(t) (Columna 6) y 1-F(t) (Columna 7).

**Tabla IV.5.  
DATOS PARA LAS CURVAS F(t) y 1-F(t)**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	E(t) (3)	Δt (min) (4)	E(t)x Δt (5)	F(t) (6)	1-F(t) (7)
07:30	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00%	100.00%
08:30	60	0.00E+00	60	0.00E+00	0.00%	100.00%
09:30	120	0.00E+00	60	0.00E+00	0.00%	100.00%
10:00	150	0.00E+00	30	0.00E+00	0.00%	100.00%
10:30	180	0.00E+00	30	0.00E+00	0.00%	100.00%
11:00	210	0.00E+00	30	0.00E+00	0.00%	100.00%

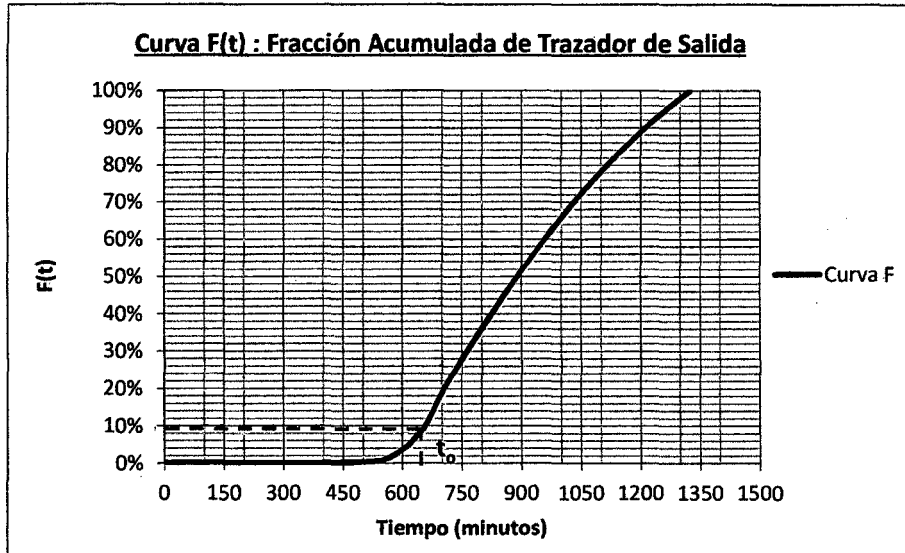
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.5.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	E(t) (3)	$\Delta t$ (min) (4)	E(t)x $\Delta t$ (5)	F(t) (6)	1-F(t) (7)
11:30	240	0.00E+00	30	0.00E+00	0.00%	100.00%
12:30	300	0.00E+00	60	0.00E+00	0.00%	100.00%
13:40	370	0.00E+00	70	0.00E+00	0.00%	100.00%
14:00	390	4.88E-05	20	4.88E-04	0.05%	99.95%
14:25	415	2.44E-05	25	9.14E-04	0.14%	99.86%
14:55	445	2.44E-05	30	7.31E-04	0.21%	99.79%
15:25	475	2.44E-05	30	7.31E-04	0.29%	99.71%
15:40	490	2.44E-05	15	3.66E-04	0.32%	99.68%
16:20	530	7.31E-05	40	1.95E-03	0.52%	99.48%
16:40	550	1.71E-04	20	2.44E-03	0.76%	99.24%
16:55	565	4.63E-04	15	4.75E-03	1.24%	98.76%
17:15	585	7.56E-04	20	1.22E-02	2.46%	97.54%
17:45	615	7.56E-04	30	2.27E-02	4.72%	95.28%
18:25	655	1.66E-03	40	4.83E-02	9.55%	90.45%
18:35	665	2.00E-03	10	1.83E-02	11.38%	88.62%
18:45	675	2.19E-03	10	2.10E-02	13.47%	86.53%
18:55	685	2.17E-03	10	2.18E-02	15.66%	84.34%
19:05	695	2.05E-03	10	2.11E-02	17.76%	82.24%
19:15	705	2.15E-03	10	2.10E-02	19.86%	80.14%
19:25	715	1.83E-03	10	1.99E-02	21.85%	78.15%
19:35	725	1.80E-03	10	1.82E-02	23.66%	76.34%
19:45	735	1.68E-03	10	1.74E-02	25.41%	74.59%
20:05	755	1.63E-03	20	3.32E-02	28.72%	71.28%
20:15	765	1.63E-03	10	1.63E-02	30.36%	69.64%
20:35	785	1.61E-03	20	3.24E-02	33.60%	66.40%
21:00	810	1.61E-03	25	4.02E-02	37.62%	62.38%
21:20	830	1.61E-03	20	3.22E-02	40.84%	59.16%
21:35	845	1.58E-03	15	2.40E-02	43.23%	56.77%
21:50	860	1.51E-03	15	2.32E-02	45.55%	54.45%
22:50	920	1.46E-03	60	8.92E-02	54.48%	45.52%
23:50	980	1.41E-03	60	8.63E-02	63.11%	36.89%
00:35	1025	1.27E-03	45	6.03E-02	69.14%	30.86%
01:35	1085	1.17E-03	60	7.31E-02	76.45%	23.55%
02:35	1145	1.07E-03	60	6.73E-02	83.18%	16.82%
03:35	1205	9.99E-04	60	6.22E-02	89.40%	10.60%
04:35	1265	8.78E-04	60	5.63E-02	95.03%	4.97%
05:35	1325	7.80E-04	60	4.97E-02	100.00%	0.00%

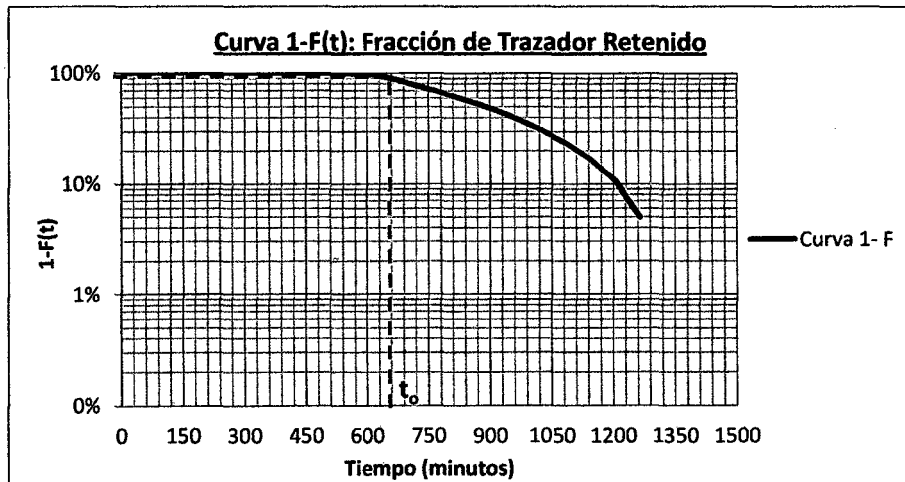


Grafico IV.4.



trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 8.95% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 10.82 horas.

Grafico IV.5.



En el Grafico IV.5. que muestra la Curva 1-F(t) que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 10.82 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 91.05%.

## **H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)**

En general los modelos matemáticos tratan de encontrar una expresión matemática para ajustarse al comportamiento real de la curva tendencia, la curva tendencia es la curva Concentración del Trazador (medido) Vs Tiempo, sin embargo el análisis de la curva tendencia es una herramienta que nos permite analizar la eficiencia hidráulica de un reactor, usando parámetros y relaciones entre los mismos sin la necesidad de aproximarlos a un modelo matemático. (ver G. "Análisis de la Curva Tendencia" en el Capítulo II "Marco Teórico").

### **Parámetros :**

Los parámetros para el análisis de la curva tendencia se obtienen del Grafico IV.6. Curva Tendencia, estos parámetros se presentan a continuación:

Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$$t_i : 390.00 \text{ min.}$$

$$\mathbf{6.50 \text{ horas}}$$

Tiempo modal, correspondiente a la presencia de la máxima concentración

$$t_p : 675.00 \text{ min.}$$

$$\mathbf{11.25 \text{ horas}}$$

Tiempo medio, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador.

$$t_m : 929.41 \text{ min.}$$

$$\mathbf{15.49 \text{ horas}}$$

Tiempo Teórico de Retención o Tiempo medio de retención Teórico.

$$t_o : 649.08 \text{ min.}$$

$$\mathbf{10.82 \text{ horas}}$$

Tiempo durante el cual la concentración en el efluente es mayor al 50% de la máxima concentración

$$t_c : 499.86 \text{ min.}$$

$$\mathbf{8.33 \text{ horas}}$$

**Análisis del Flujo :**

En el marco teórico indicado, se presentan algunos de los criterios para el análisis de la curva tendencia, con los cuales se realiza el siguiente análisis para este caso.

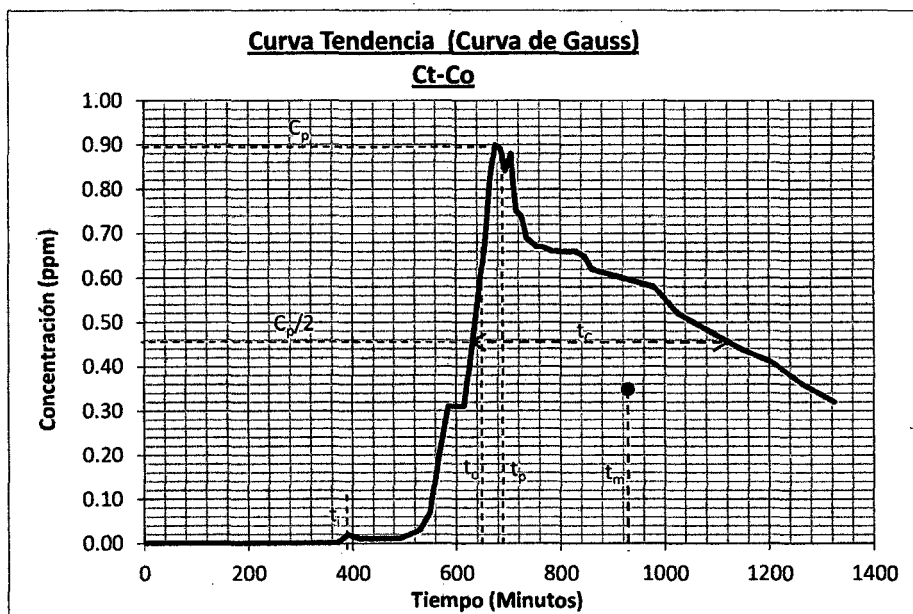
**CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$t_m$	= 15.49 horas	El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 15.49 horas
$t_f/t_o$	= 0.60	El valor de $t_f/t_o$ mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.
$t_m/t_o$	= 1.43	El valor de $t_m/t_o$ igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.
$t_p/t_o$	= 1.04	El valor de $t_p/t_o$ cercano a 1 y $t_i/t_o$ mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.
$t_c/t_o$	= 0.77	El valores de $t_c/t_o$ indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 15.49 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.6.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

El modelo de Wolf y Resnick es utilizado con frecuencia para determinar el flujo predominante en un reactor, siendo una herramienta muy útil en reactores donde no existen corrientes de recirculación. El modelo simplificado de Wolf y Resnick se encuentra en la sección H. "Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf y Resnick" del Capítulo II "Marco Teórico" e indica las siguientes expresiones que sirven para calcular el porcentaje de flujo pistón (p), mezclado (M) y espacios muertos dentro de un reactor (m):

El porcentaje de Flujo Pistón esta dado por:

$$p = \frac{\theta * \text{Tan } \alpha}{0.43429 + \theta * \text{Tan } \alpha}$$

El porcentaje de espacios muertos esta dado por la siguiente expresión, indicada en el marco teórico:

$$m = 1 + \frac{\theta}{p}$$

Y el porcentaje de Mezcla Completa se calcula con la expresión:

$$M + p + m = 1$$

Donde:

" Tan  $\alpha$  " esta dado por la pendiente de la recta tangente a la curva 1-F(t) donde la curva empieza a volverse vertical, y esta dado por la siguiente expresión :

$$\text{Tan } \alpha = \frac{1}{\frac{t_1}{t_o} + \frac{t_2}{t_o}}$$

Y "  $\theta$  " es la distancia desde el eje de las ordenadas hasta el punto donde la recta tangente a la curva 1-F(t) intersecta a Y=100%.

Del Grafico IV.7. se encuentra que :

$$\theta = 0.990$$

Además:

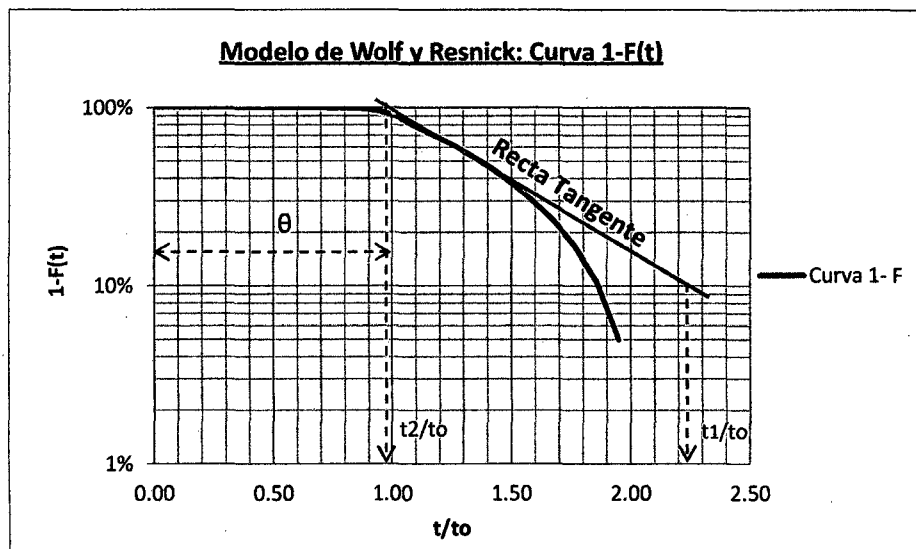
$$\begin{aligned} t_1/t_o &= 2.220 \\ t_2/t_o &= 0.990 \end{aligned}$$

Hallamos  $\tan \alpha$  :

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1}{t_0} - \frac{t_2}{t_0}}$$

$$\tan \alpha = 0.813$$

Grafico IV.7.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 64.95\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -52.42\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 35.05\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 64.95% y flujo mezclado 35.05% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -52.42 %).

## **J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**

La aplicación de los modelos matemáticos para flujo no ideal tiene como finalidad encontrar la curva teórica que mejor se ajuste hacia la curva tendencia, como parte de la discusión de esta investigación se hará la comparación de la curva E experimental con tres (03) modelos matemáticos para flujos no ideales.

- Modelo de Dispersión
- Modelo de Tanques en Serie
- Modelo de Convección para Flujo Laminar

Los métodos mencionados utilizan la comparación con la Curva de Edades del Fluido Normalizada (Curva E Normalizada), por lo cual a continuación se normalizará la Curva E, haciendo que el área bajo la curva sea igual a 1.

### **Curva E<sub>θ</sub>: Curva E Normalizada**

En el Capítulo II "Marco Teórico" en la sección E. "Curva E, Distribución de Edad de Fluido", se indica la ecuación Ec.II.11 para obtener la curva E Normalizada cuya área bajo la curva es igual a 1, que es la siguiente:

$$E_{\theta} = t_m \times E(t)$$

Además:

$$t_m \approx \frac{\sum C_i \cdot t_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$y \quad C_i = C_t - C_o$$

Donde:

- E<sub>θ</sub> : Valor de la Curva E Normalizada para el tiempo "i"
- E(t) : Valor de la Curva E para el tiempo "i"
- t<sub>m</sub> : Tiempo medio correspondiente al paso del 50% del trazador
- C<sub>i</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i"
- t<sub>i</sub> : Tiempo "i"
- Δ t<sub>i</sub> : Intervalo de tiempo entre el tiempo "i" y el tiempo "i+1"
- C<sub>t</sub> : Concentración del trazador en el tiempo "i".
- C<sub>o</sub> : Concentración inicial del trazador.

**Tabla IV.6.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA E(t) y  $t_m$**

Columna 3 y Columna 4 , datos para hallar el Tiempo Medio " $t_m$ ".

Columna 5 , valores para la Curva E Normalizada

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$txCix\Delta t$ (3)	$Cix\Delta t$ (4)	$E_g=E(t)xt_m$ (5)
07:30	0	0	0.00	0.000
08:30	60	0	0.00	0.000
09:30	120	0	0.00	0.000
10:00	150	0	0.00	0.000
10:30	180	0	0.00	0.000
11:00	210	0	0.00	0.000
11:30	240	0	0.00	0.000
12:30	300	0	0.00	0.000
13:40	370	0	0.00	0.000
14:00	390	78	0.20	0.045
14:25	415	156	0.38	0.023
14:55	445	134	0.30	0.023
15:25	475	143	0.30	0.023
15:40	490	74	0.15	0.023
16:20	530	424	0.80	0.068
16:40	550	550	1.00	0.159
16:55	565	1102	1.95	0.430
17:15	585	2925	5.00	0.702
17:45	615	5720	9.30	0.702
18:25	655	12969	19.80	1.541
18:35	665	4988	7.50	1.858
18:45	675	5805	8.60	2.039
18:55	685	6131	8.95	2.016
19:05	695	6012	8.65	1.903
19:15	705	6063	8.60	1.994
19:25	715	5827	8.15	1.699
19:35	725	5401	7.45	1.677
19:45	735	5255	7.15	1.563
20:05	755	10268	13.60	1.518
20:15	765	5126	6.70	1.518
20:35	785	10441	13.30	1.495
21:00	810	13365	16.50	1.495
21:20	830	10956	13.20	1.495
21:35	845	8302	9.83	1.473

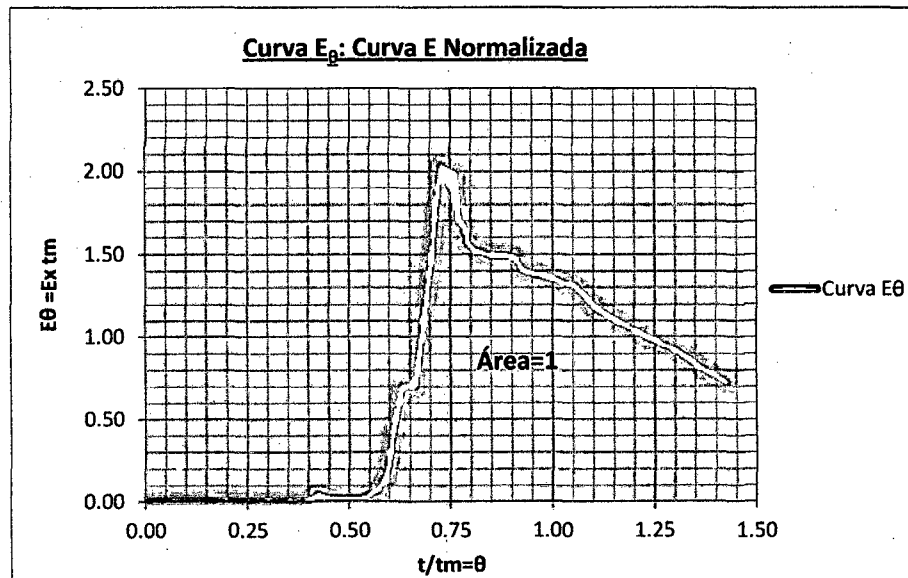
Continua en la siguiente página



Continuación de la Tabla IV.6.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$t \times C_{ix} \Delta t$ (3)	$C_{ix} \Delta t$ (4)	$E_{\theta} = E(t) x t_m$ (5)
21:50	860	8192	9.53	1.405
22:50	920	33672	36.60	1.359
23:50	980	34692	35.40	1.314
00:35	1025	25369	24.75	1.178
01:35	1085	32550	30.00	1.087
02:35	1145	31602	27.60	0.997
03:35	1205	30728	25.50	0.929
04:35	1265	29222	23.10	0.816
05:35	1325	27030	20.40	0.725

Grafico IV.8.



La curva E Normalizada, representada en el Grafico IV.8., tiene la característica de mantener la tendencia de la curva E, pero con el área bajo la curva igual a 1, lo que permite la comparación directa con los modelos matemáticos que se aplicaran. El eje x es adimensional y esta dado por la razón entre el tiempo medido y el tiempo medio.

### **1) Modelo de Dispersión Axial**

El modelo de dispersión Axial supone un proceso similar a la difusión que esta superpuesto al flujo pistón. Se usaran las expresiones indicadas en la sección 2. "Modelo de Dispersión" del Anexo N° 1, donde se indica la siguiente expresión para la construcción de la curva analítica:

Para un valor de  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01), la curva analítica se construye usando la siguiente ecuación:

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp\left(\frac{-(1-\theta)^2}{4(D/uL)}\right)$$

Donde:

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

$\left(\frac{D}{uL}\right)$  : Coeficiente de Dispersión del recipiente.

$\sigma^2$  : Varianza de la Curva Analítica.

$t_m$  : Tiempo Medio, correspondiente al paso del 50% del trazador.

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \approx \frac{\sum C_i * t_i * \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$t_m = 929.41 \text{ min.}$$

$$t_m = 15.49 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - t_m)^2 * C_i * \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$\sigma^2 = \frac{18746360.1 \text{ min}^3}{410.225 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 12.69 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva E<sub>θ</sub>):

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 0.0529$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_{\theta}^2 = 0.0529$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0272 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

Cuando la desviación respecto del flujo pistón no es demasiado grande, el uso de este modelo es complementario al Modelo de Dispersión, los resultados son idénticos para fines prácticos. Para la comparación con los demás modelos matemáticos, se usará la expresión adimensional (relacionado a la Curva E Normalizada).

La curva  $E_\theta$  para el modelo de tanques, se puede obtener usando la siguiente ecuación. (Levenspiel, 1998) según lo mencionado en la sección G - 3 "Modelo de Tanques en Serie" del Capítulo II "Marco Teórico".

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

Además:

$$\sigma^2_\theta = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 19$$

**Tabla IV.7.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA ANALITICA DEL MODELO DE TANQUES EN SERIE**

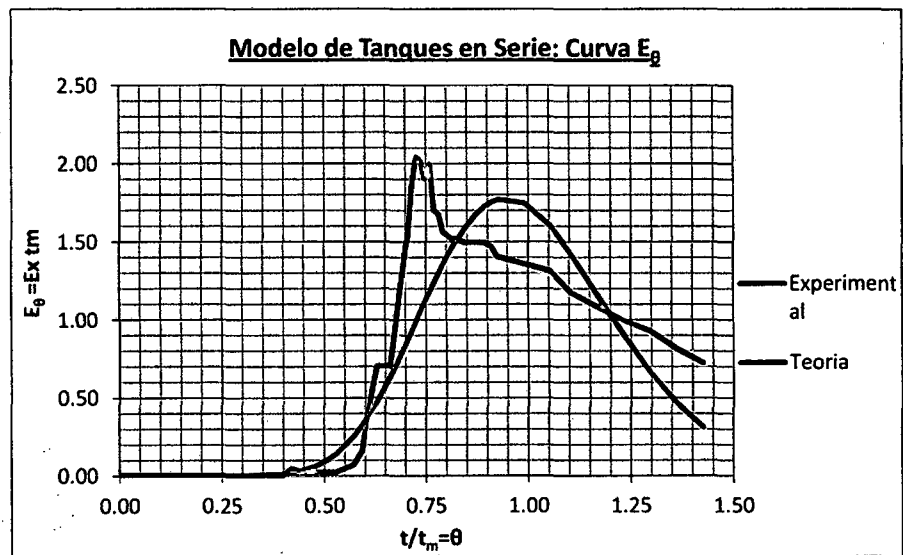
Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Tanques en Serie $E_\theta$ (4)	Curva $E_\theta$ Experimental (5)
07:30	0	0.000	0.000	0.000
08:30	60	0.065	0.000	0.000
09:30	120	0.129	0.000	0.000
10:00	150	0.161	0.000	0.000
10:30	180	0.194	0.000	0.000

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.7.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Tanques en Serie $E_0$ (4)	Curva $E_0$ Experimental (5)
11:00	210	0.226	0.000	0.000
11:30	240	0.258	0.000	0.000
12:30	300	0.323	0.001	0.000
13:40	370	0.398	0.010	0.000
14:00	390	0.420	0.017	0.045
14:25	415	0.447	0.032	0.023
14:55	445	0.479	0.061	0.023
15:25	475	0.511	0.106	0.023
15:40	490	0.527	0.137	0.023
16:20	530	0.570	0.248	0.068
16:40	550	0.592	0.320	0.159
16:55	565	0.608	0.383	0.430
17:15	585	0.629	0.476	0.702
17:45	615	0.662	0.634	0.702
18:25	655	0.705	0.870	1.541
18:35	665	0.716	0.931	1.858
18:45	675	0.726	0.993	2.039
18:55	685	0.737	1.054	2.016
19:05	695	0.748	1.116	1.903
19:15	705	0.759	1.176	1.994
19:25	715	0.769	1.235	1.699
19:35	725	0.780	1.293	1.677
19:45	735	0.791	1.349	1.563
20:05	755	0.812	1.453	1.518
20:15	765	0.823	1.501	1.518
20:35	785	0.845	1.586	1.495
21:00	810	0.872	1.673	1.495
21:20	830	0.893	1.724	1.495
21:35	845	0.909	1.752	1.473
21:50	860	0.925	1.770	1.405
22:50	920	0.990	1.747	1.359
23:50	980	1.054	1.598	1.314
00:35	1025	1.103	1.429	1.178
01:35	1085	1.167	1.167	1.087
02:35	1145	1.232	0.902	0.997
03:35	1205	1.297	0.663	0.929
04:35	1265	1.361	0.466	0.816
05:35	1325	1.426	0.315	0.725

Grafico IV.9.



El Grafico IV.9. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia y final, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

El modelo de convección supone que cada partícula del fluido se desliza mas allá de su vecino sin interactuar con el por difusión molecular. La amplitud de los tiempos de residencia se debe únicamente a las variaciones de velocidad.

Para la construcción de las curvas analíticas se propone el uso de las siguientes expresiones (ver Anexo N°1 Sección 4. "Modelo de Convección para Flujo Laminar").

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Según la descripción de los tipos de entrada y salida (ver Capítulo II "Marco Teórico" Sección G - 5. "Modelo de Convección para Flujo Laminar"), el ingreso al reactor es tipo FLUX y la salida del reactor es tipo PLANO, con lo cual, la ecuación a usar es  $E^*_{\theta}$ .

**Tabla IV.8.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA ANALITICA DEL MODELO DE**  
**CONVECCION PARA FLUJO LAMINAR**

Hora (1)	tiempo (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Modelo Laminar con Convección			Curva $E_{\theta}$ Experime ntal (5)
			$E_{\theta}$	$E^*_{\theta}$	$E^{**}_{\theta}$	
07:30	0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000
08:30	60	0.065	0.00	0.00	0.00	0.000
09:30	120	0.129	0.00	0.00	0.00	0.000
10:00	150	0.161	0.00	0.00	0.00	0.000
10:30	180	0.194	0.00	0.00	0.00	0.000
11:00	210	0.226	0.00	0.00	0.00	0.000
11:30	240	0.258	0.00	0.00	0.00	0.000

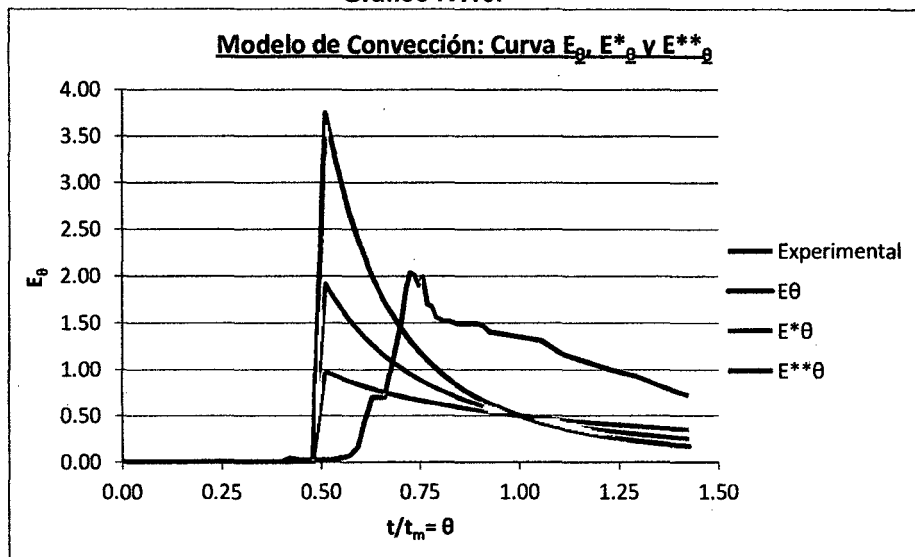
Continua en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.8.

Hora (1)	tiempo (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Modelo Laminar con Convección			Curva $E_\theta$ Experime ntal (5)
			$E_\theta$	$E^*_\theta$	$E^{**}_\theta$	
12:30	300	0.323	0.00	0.00	0.00	0.000
13:40	370	0.398	0.00	0.00	0.00	0.000
14:00	390	0.420	0.00	0.00	0.00	0.045
14:25	415	0.447	0.00	0.00	0.00	0.023
14:55	445	0.479	0.00	0.00	0.00	0.023
15:25	475	0.511	3.75	1.91	0.98	0.023
15:40	490	0.527	3.41	1.80	0.95	0.023
16:20	530	0.570	2.70	1.54	0.88	0.068
16:40	550	0.592	2.41	1.43	0.84	0.159
16:55	565	0.608	2.23	1.35	0.82	0.430
17:15	585	0.629	2.01	1.26	0.79	0.702
17:45	615	0.662	1.73	1.14	0.76	0.702
18:25	655	0.705	1.43	1.01	0.71	1.541
18:35	665	0.716	1.36	0.98	0.70	1.858
18:45	675	0.726	1.31	0.95	0.69	2.039
18:55	685	0.737	1.25	0.92	0.68	2.016
19:05	695	0.748	1.20	0.89	0.67	1.903
19:15	705	0.759	1.15	0.87	0.66	1.994
19:25	715	0.769	1.10	0.84	0.65	1.699
19:35	725	0.780	1.05	0.82	0.64	1.677
19:45	735	0.791	1.01	0.80	0.63	1.563
20:05	755	0.812	0.93	0.76	0.62	1.518
20:15	765	0.823	0.90	0.74	0.61	1.518
20:35	785	0.845	0.83	0.70	0.59	1.495
21:00	810	0.872	0.76	0.66	0.57	1.495
21:20	830	0.893	0.70	0.63	0.56	1.495
21:35	845	0.909	0.67	0.60	0.55	1.473
21:50	860	0.925	0.63	0.58	0.54	1.405
22:50	920	0.990	0.52	0.51	0.51	1.359
23:50	980	1.054	0.43	0.45	0.47	1.314
00:35	1025	1.103	0.37	0.41	0.45	1.178
01:35	1085	1.167	0.31	0.37	0.43	1.087
02:35	1145	1.232	0.27	0.33	0.41	0.997
03:35	1205	1.297	0.23	0.30	0.39	0.929
04:35	1265	1.361	0.20	0.27	0.37	0.816
05:35	1325	1.426	0.17	0.25	0.35	0.725



Grafico IV.10.



Del Grafico IV.10. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

**K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMATICOS.**

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

**Tabla IV.9.**  
**DATOS PARA COMPARACION DE LAS CURVAS ANALITICAS DE LOS**  
**MODELOS MATEMATICOS ANALIZADOS**

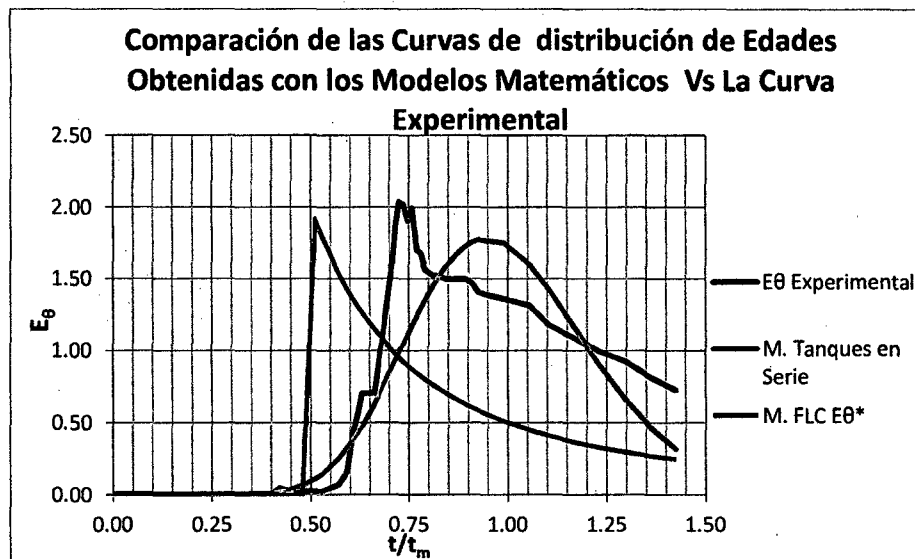
Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Curva Experimental $E_\theta$ (4)	Modelo	
				Tanques en Serie (6)	Convección $E^*_\theta$ (7)
07:30	0	0.00	0.00	0.00	0.00
08:30	60	0.06	0.00	0.00	0.00
09:30	120	0.13	0.00	0.00	0.00
10:00	150	0.16	0.00	0.00	0.00
10:30	180	0.19	0.00	0.00	0.00
11:00	210	0.23	0.00	0.00	0.00
11:30	240	0.26	0.00	0.00	0.00
12:30	300	0.32	0.00	0.00	0.00
13:40	370	0.40	0.00	0.00	0.00
14:00	390	0.42	0.05	0.00	0.00
14:25	415	0.45	0.02	0.00	0.00
14:55	445	0.48	0.02	0.00	0.00
15:25	475	0.51	0.02	0.00	1.91
15:40	490	0.53	0.02	0.00	1.80
16:20	530	0.57	0.07	0.01	1.54
16:40	550	0.59	0.16	0.01	1.43
16:55	565	0.61	0.43	0.01	1.35
17:15	585	0.63	0.70	0.02	1.26
17:45	615	0.66	0.70	0.05	1.14
18:25	655	0.70	1.54	0.10	1.01
18:35	665	0.72	1.86	0.11	0.98
18:45	675	0.73	2.04	0.13	0.95
18:55	685	0.74	2.02	0.16	0.92
19:05	695	0.75	1.90	0.18	0.89

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.9.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Curva Experimental $E_\theta$ (4)	Modelo	
				Tanques en Serie (6)	Convección $E^*_\theta$ (7)
19:15	705	0.76	1.99	0.20	0.87
19:25	715	0.77	1.70	0.22	0.84
19:35	725	0.78	1.68	0.24	0.82
19:45	735	0.79	1.56	0.25	0.80
20:05	755	0.81	1.52	0.29	0.76
20:15	765	0.82	1.52	0.30	0.74
20:35	785	0.84	1.50	0.34	0.70
21:00	810	0.87	1.50	0.38	0.66
21:20	830	0.89	1.50	0.41	0.63
21:35	845	0.91	1.47	0.43	0.60
21:50	860	0.93	1.40	0.46	0.58
22:50	920	0.99	1.36	0.54	0.51
23:50	980	1.05	1.31	0.63	0.45
00:35	1025	1.10	1.18	0.69	0.41
01:35	1085	1.17	1.09	0.76	0.37
02:35	1145	1.23	1.00	0.83	0.33
03:35	1205	1.30	0.93	0.89	0.30
04:35	1265	1.36	0.82	0.95	0.27
05:35	1325	1.43	0.72	1.00	0.25

Grafico IV.11.



Del Grafico IV.11. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°01, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**b) Ensayo de Trazadores con NaCl N°02**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°02 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 02  
Fecha : 14/12/10  
T° Ambiental : 17.5°C / 24°C  
T° Agua : 19°C / 23.1°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
W de NaCl : 100.00 gr  
Volumen de : 3000.00 ml  
agua  
Concentración  
[ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
[ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
Conductividad : 1.15 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 2.58 ml/s  
Equivalente en el UASB-UNITRAR  
Qp : 7.53 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
Caudal : 2.58 ml/s  
Promedio  
To : 10.40 horas <> 624.20 min.

**E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

**Parámetros Medidos:**

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.10.

**RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°02 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
09:30	0	1.15	1.15	2.93	23.1	20.0
15:35	365	1.16	1.17	2.93	23.1	24.0
15:50	380	1.15	1.17	2.89	23.1	24.0
16:20	410	1.13	1.17	2.60	23.1	24.0
16:50	440	1.13	1.16	2.53	23.1	22.0
17:20	470	1.13	1.16	2.16	23.1	21.0
17:35	485	1.12	1.16	2.14	23.1	21.0
18:15	525	1.11	1.20	2.34	23.1	20.0
18:35	545	1.13	1.25	2.43	22.4	20.0
18:45	555	1.13	1.25	2.40	22.4	19.5
19:05	575	1.12	1.32	2.38	22.4	19.5
19:35	605	1.11	1.43	2.44	20.5	19.0
20:15	645	1.11	1.88	2.43	20.5	19.0
20:25	655	1.13	1.86	2.43	20.0	19.0
20:35	665	1.12	1.92	2.38	20.0	19.0

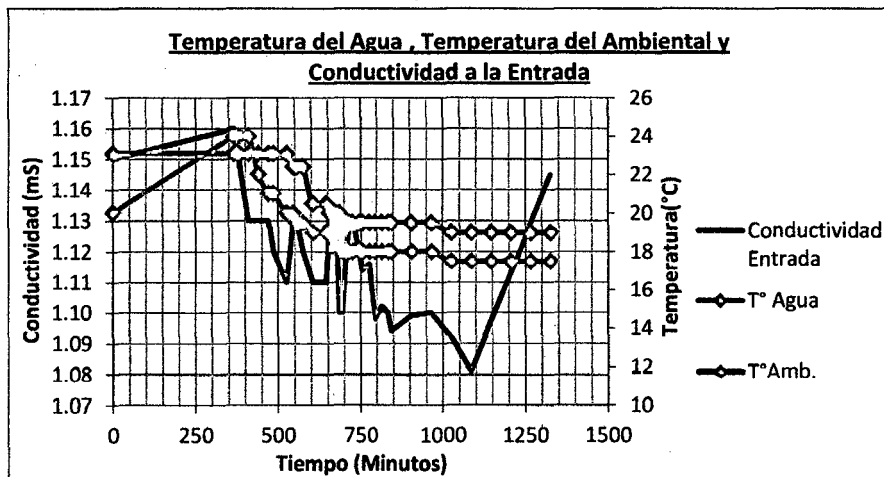
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.10.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
20:45	675	1.13	1.89	2.36	20.0	19.0
20:55	685	1.10	1.86	2.39	20.0	19.0
21:05	695	1.10	1.83	2.63	19.5	18.0
21:15	705	1.12	1.84	2.50	19.5	18.0
21:25	715	1.13	1.83	2.36	19.5	18.0
21:35	725	1.13	1.83	2.42	19.5	18.0
21:55	745	1.12	1.81	2.45	19.5	18.0
22:05	755	1.11	1.79	2.44	19.5	18.0
22:25	775	1.12	1.76	2.30	19.5	18.0
22:45	795	1.10	1.75	2.42	19.5	18.0
23:05	815	1.10	1.72	2.44	19.5	18.0
23:25	835	1.10	1.70	2.47	19.5	18.0
23:35	845	1.09	1.70	2.44	19.5	18.0
00:35	905	1.10	1.65	2.36	19.5	18.0
01:35	965	1.10	1.59	2.41	19.5	18.0
02:35	1025	1.09	1.55	2.43	19.0	17.5
03:35	1085	1.08	1.51	2.50	19.0	17.5
04:35	1145	1.10	1.44	2.52	19.0	17.5
05:35	1205	1.11	1.37	2.48	19.0	17.5
06:35	1265	1.13	1.29	2.54	19.0	17.5
07:35	1325	1.15	1.22	2.51	19.0	17.5

#### F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES

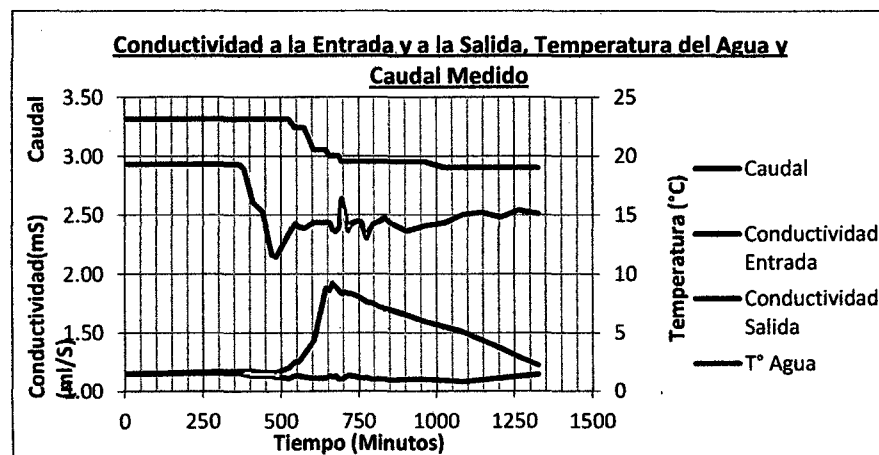
Grafico IV.12.





En el Grafico IV.12. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varia de forma directa con la temperatura del agua, aunque no de forma constante, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

Grafico IV.13.



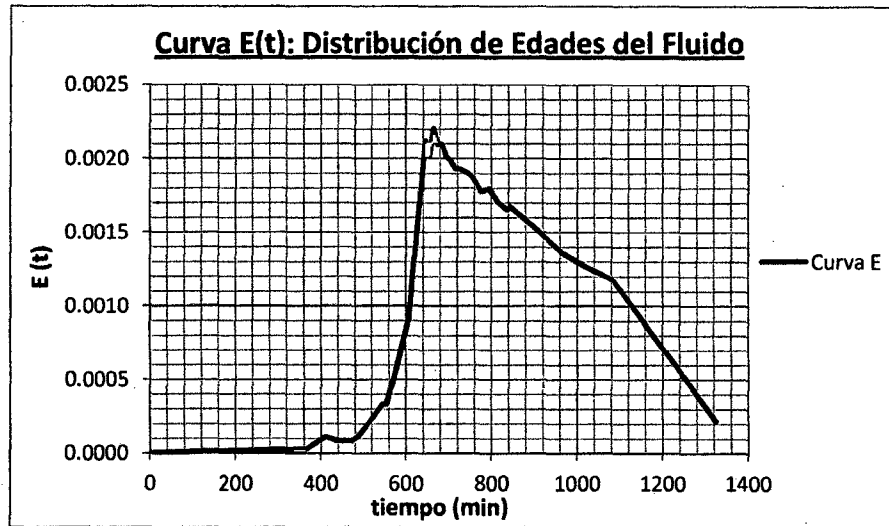
En el Grafico IV.13. al inicio el caudal es mayor, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante con mínimas variaciones. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, presenta dos picos consecutivos, en  $t=645$  min y  $t=665$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo a partir de  $t=525$  min (6:15 pm) hasta  $t=685$  (8:55 pm).

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

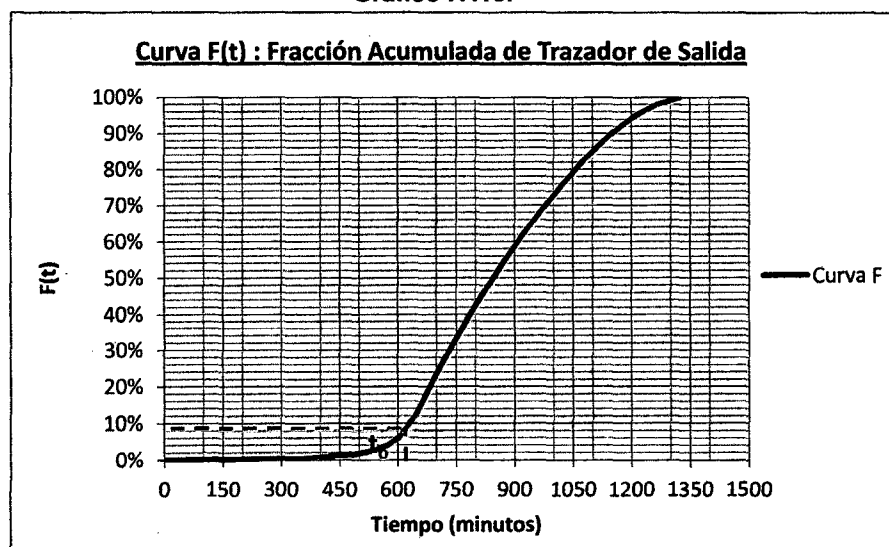
**Grafico IV.14.**



El Grafico IV.14. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

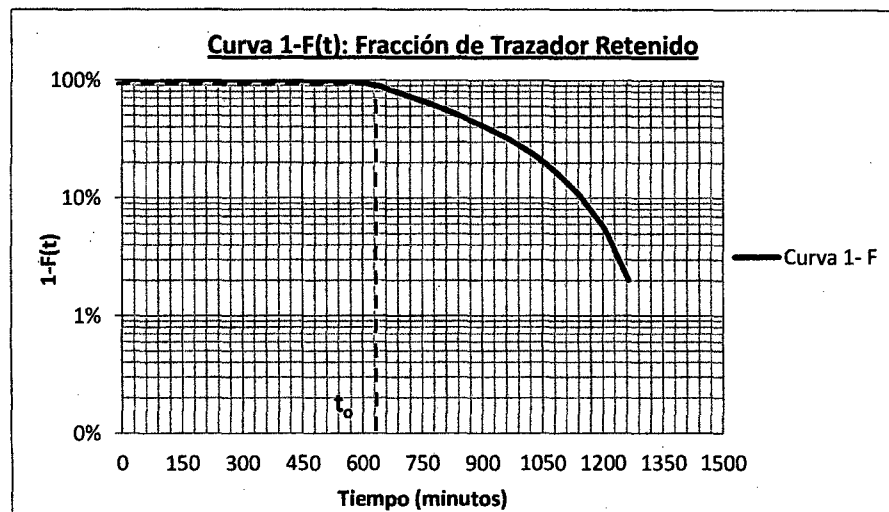
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

**Grafico IV.15.**



El Grafico IV.15. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 9.03% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 10.4 horas.

Grafico IV.16.



En el Grafico IV.16. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 10.4 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 90.97%.

## H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)

### Parámetros :

$t_i$  : 365.00 min.  
**6.08 horas**  
 $t_p$  : 665.00 min.  
**11.08 horas**  
 $t_m$  : 885.83 min.  
**14.76 horas**  
 $t_o$  : 624.20 min.  
**10.40 horas**  
 $t_c$  : 490.82 min.  
**8.18 horas**

### Análisis del Flujo :

#### CRITERIO Y VALOR

#### ANALISIS

$t_m$  = 14.76 horas

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 14.76 horas

$t_i/t_o$  = 0.58

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$t_m/t_o$  = 1.42

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$t_p/t_o$  = 1.07

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

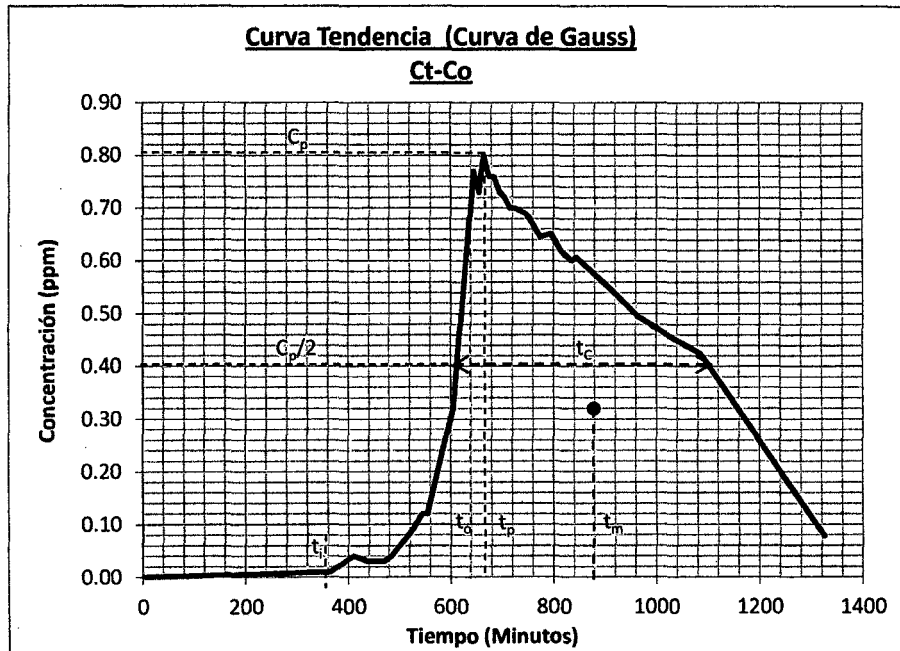
$t_c/t_o$  = 0.79

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 14.76 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.17.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.18. se encuentra que :

$$\theta = 0.980$$

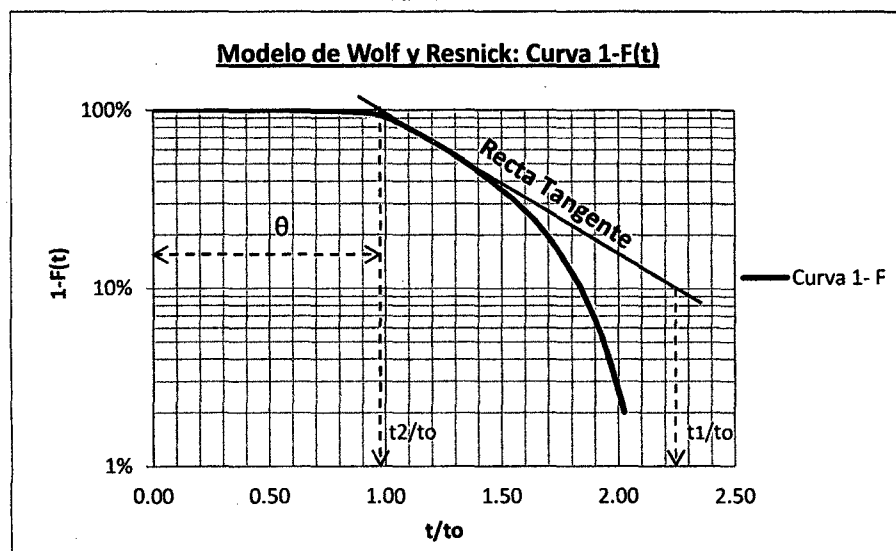
Además:

$$t_1/t_0 = 2.250$$

$$t_2/t_0 = 0.980$$

$$\tan \alpha = 0.787$$

Grafico IV.18.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 63.99\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -53.15\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 36.01\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 63.99% y flujo mezclado 36.01% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -53.15 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 885.83 \text{ min.}$$

$$t_m = 14.76 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{15564847.89 \text{ min}^3}{363.09 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 11.91 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.0546$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.0546$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0281 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a 0.01.}$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

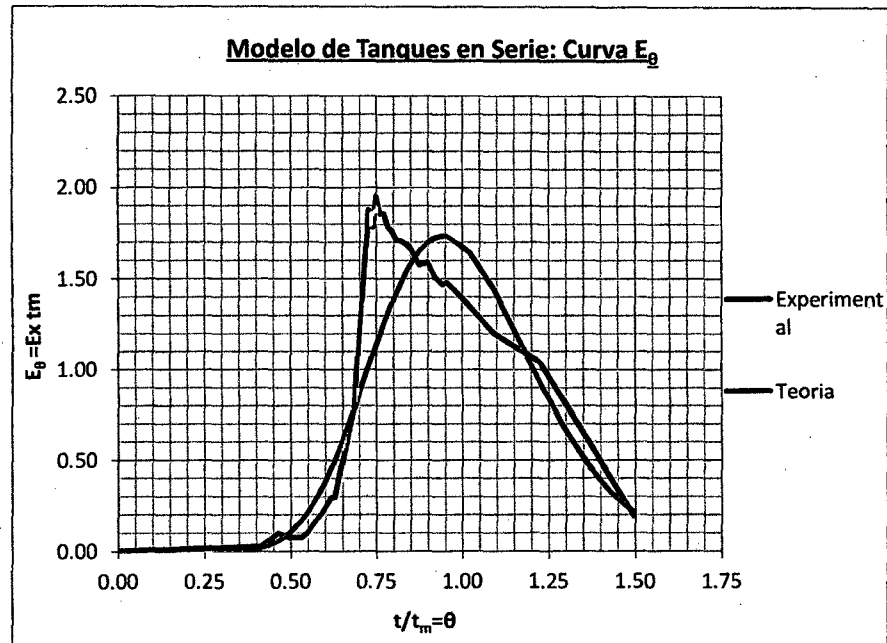
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 18$$

Grafico IV.19.



El Grafico IV.19. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia y final, las curvas no presentan comportamientos similares.



### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

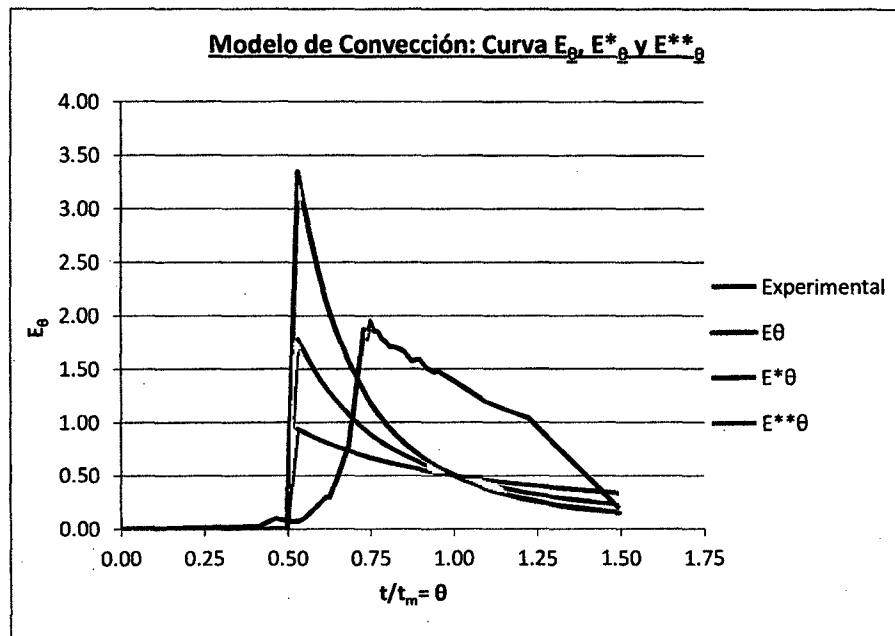
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.20.

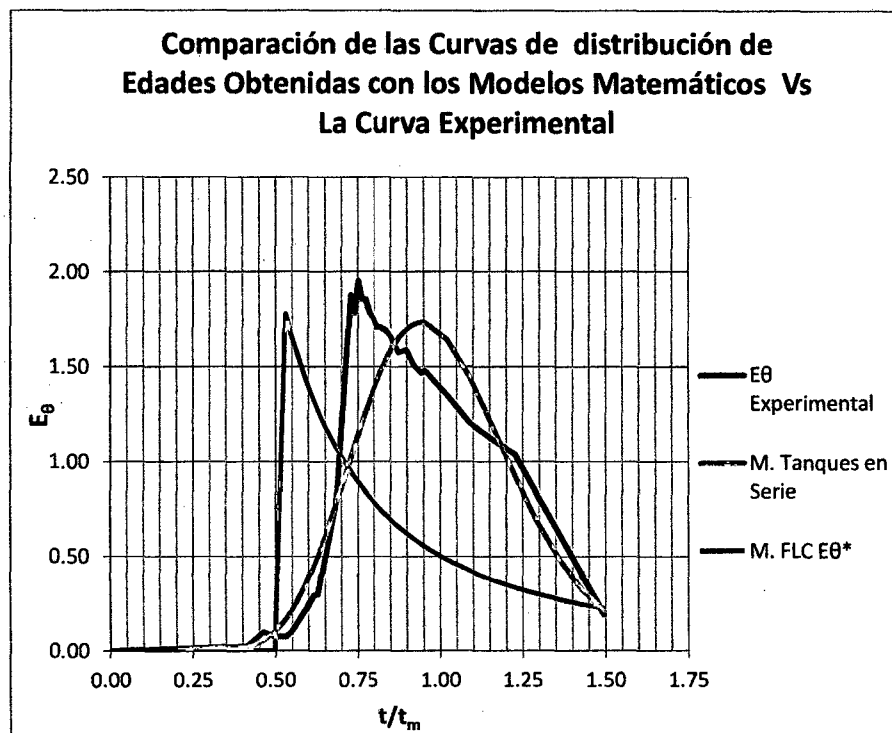


Del Grafico IV.20. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.21.



Del Grafico IV.21. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°02, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar, al inicio, y el modelo Tanques en Serie, al final de la curva.

**c) Ensayo de Trazadores con NaCl N°03**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°03 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 03  
 Fecha : 16/12/10  
 T° Ambiental : 19°C / 29°C  
 T° Agua : 19.5°C / 26°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 1.14 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.71 ml/s  
 Equivalente en el UASB-UNITRAR  
 Qp : 10.82 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.71 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.24 horas <> 434.17 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.11.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°03 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.14	1.14	3.78	21.5	24.0
08:20	50	1.18	1.18	3.54	22.0	25.0
11:30	240	1.21	1.23	3.82	25.0	29.0
11:40	250	1.21	1.23	3.82	25.0	29.0
11:50	260	1.22	1.24	3.82	25.0	29.0
12:20	290	1.22	1.26	3.78	24.5	29.0
12:50	320	1.22	1.26	3.68	25.0	29.0
13:20	350	1.22	1.31	3.73	26.0	29.0
13:50	380	1.22	1.30	3.77	26.0	29.0
14:00	390	1.22	1.31	3.52	26.0	29.0
14:10	400	1.23	1.33	3.70	25.0	29.0
14:40	430	1.24	1.64	3.70	25.0	29.0
14:50	440	1.25	1.80	3.71	26.0	29.0
14:55	445	1.23	1.93	3.60	26.0	29.0
15:00	450	1.23	2.09	3.48	26.0	29.0

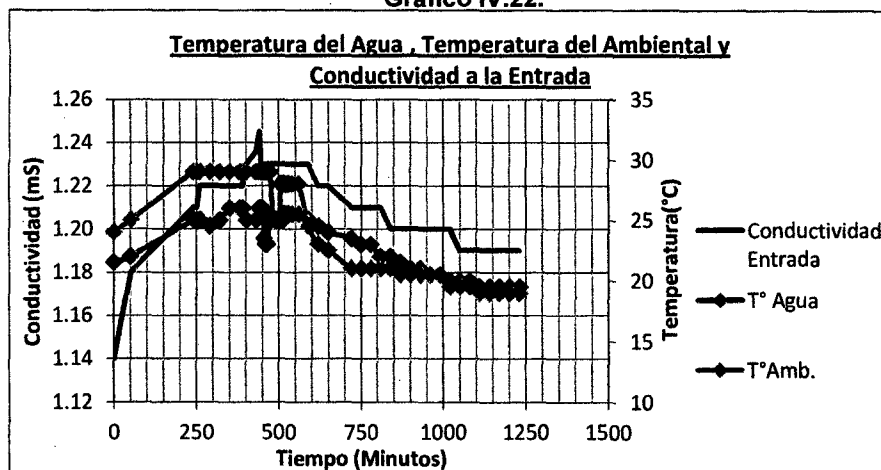
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.11.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:05	455	1.23	2.16	3.37	23.5	29.0
15:10	460	1.23	2.16	3.60	23.0	29.0
15:15	465	1.23	2.19	3.82	23.0	29.0
15:20	470	1.23	2.19	3.81	25.0	29.0
15:25	475	1.23	2.21	3.79	25.0	29.0
15:30	480	1.23	2.20	3.78	25.0	25.0
15:35	485	1.23	2.21	3.70	25.0	25.0
15:40	490	1.23	2.21	3.62	25.0	25.0
15:45	495	1.23	2.21	3.54	25.0	25.0
15:50	500	1.23	2.17	3.66	25.0	25.0
15:55	505	1.23	2.19	3.77	25.0	28.0
16:00	510	1.23	2.15	3.89	25.0	28.0
16:05	515	1.23	2.14	3.85	25.5	28.0
16:10	520	1.23	2.12	3.82	25.5	28.0
16:15	525	1.23	2.12	3.78	25.5	28.0
16:20	530	1.23	2.13	3.75	25.5	28.0
16:30	540	1.23	2.13	3.68	25.5	28.0
16:50	560	1.23	2.04	3.74	25.5	28.0
17:20	590	1.23	1.95	3.84	25.0	24.5
17:50	620	1.22	1.92	3.60	24.5	23.0
18:20	650	1.22	1.84	3.71	24.0	22.5
19:30	720	1.21	1.78	3.71	23.5	21.0
20:00	750	1.21	1.75	3.68	23.0	21.0
20:30	780	1.21	1.73	3.76	23.0	21.0
21:00	810	1.21	1.67	3.76	22.0	21.0
21:30	840	1.20	1.64	3.73	22.0	21.0
22:00	870	1.20	1.61	3.75	21.5	20.5
22:30	900	1.20	1.58	3.69	21.0	20.5
23:00	930	1.20	1.55	3.71	21.0	20.5
23:30	960	1.20	1.53	3.76	20.5	20.5
00:00	990	1.20	1.50	3.74	20.5	20.5
00:30	1020	1.20	1.48	3.75	20.0	19.5
01:00	1050	1.19	1.45	3.72	20.0	19.5
01:30	1080	1.19	1.43	3.69	20.0	19.5
02:00	1110	1.19	1.41	3.67	19.5	19.0
02:30	1140	1.19	1.38	3.71	19.5	19.0
03:00	1170	1.19	1.35	3.73	19.5	19.0
03:30	1200	1.19	1.34	3.70	19.5	19.0
04:00	1230	1.19	1.33	3.73	19.5	19.0

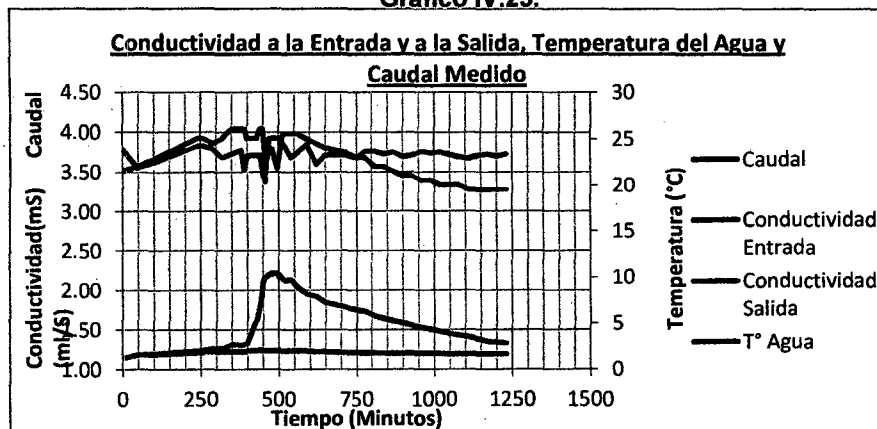
## F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES

Grafico IV.22.



En el Grafico IV.22. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varia de forma directa con la temperatura del agua, aunque no de forma constante, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

Grafico IV.23.



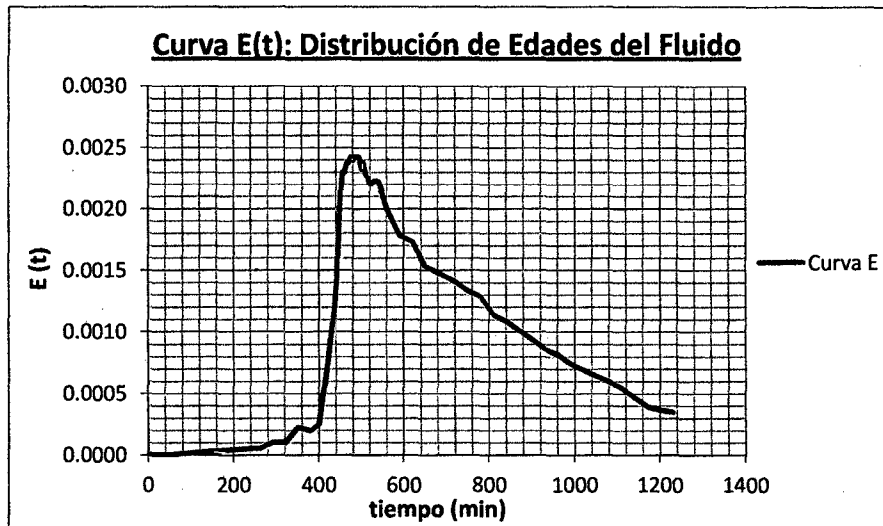
En el Grafico IV.23. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia a lo largo de la prueba, la temperatura a partir del  $t=530$  min (4:20 pm), la curva es descendente.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

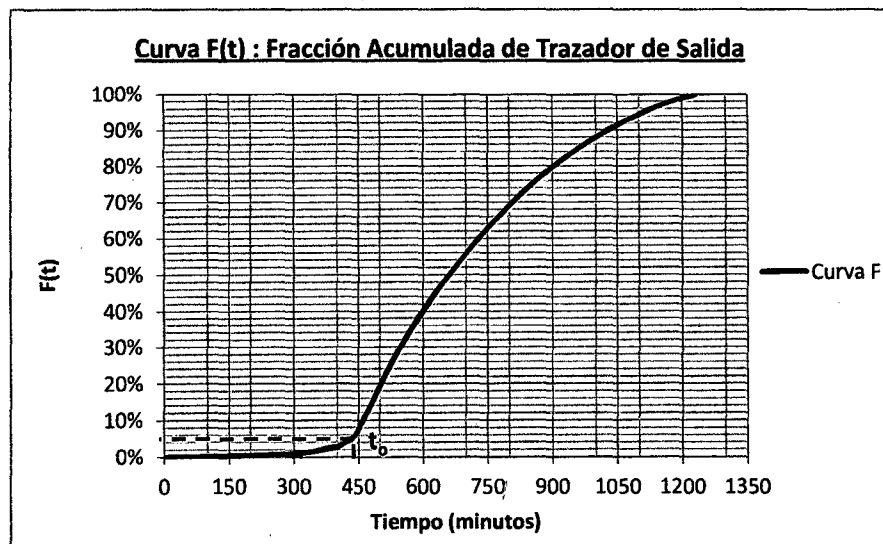
**Grafico IV.24.**



El Grafico IV.24. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

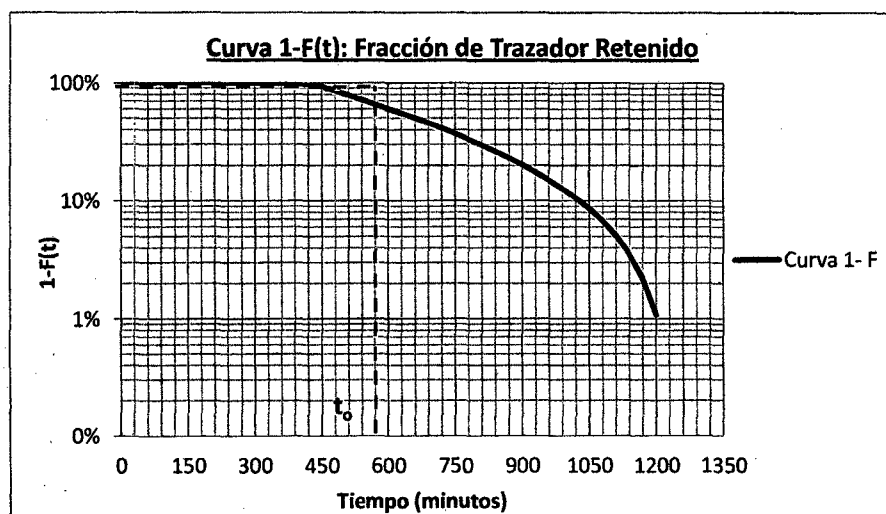
**Grafico IV.25.**





El Grafico IV.25. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 4.99% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.24 horas.

Grafico IV.26.



En el Gráfico IV.26. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.24 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 95.01%.

**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 240.00 min.  
           **4.00 horas**  
 $t_p$  : 475.00 min.  
           **7.92 horas**  
 $t_m$  : 715.64 min.  
           **11.93 horas**  
 $t_o$  : 434.17 min.  
           **7.24 horas**  
 $t_c$  : 359.17 min.  
           **5.99 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 11.93 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 11.93 horas

$$t_i/t_o = 0.55$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.65$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.09$$

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

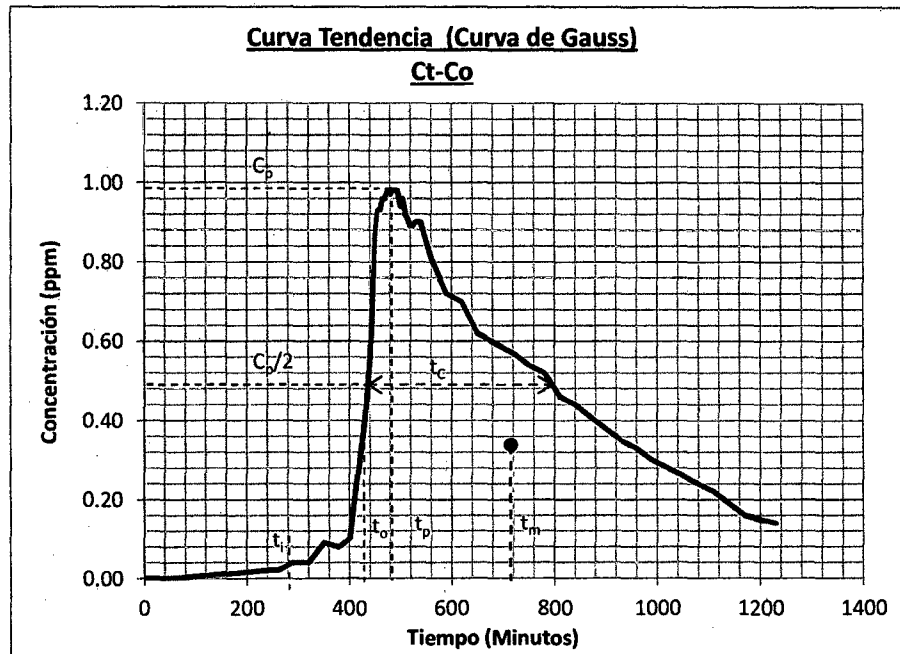
$$t_c/t_o = 0.83$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indicada:

El tiempo medio de retención es 11.93 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.27.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.28. se encuentra que :

$$\theta = 0.970$$

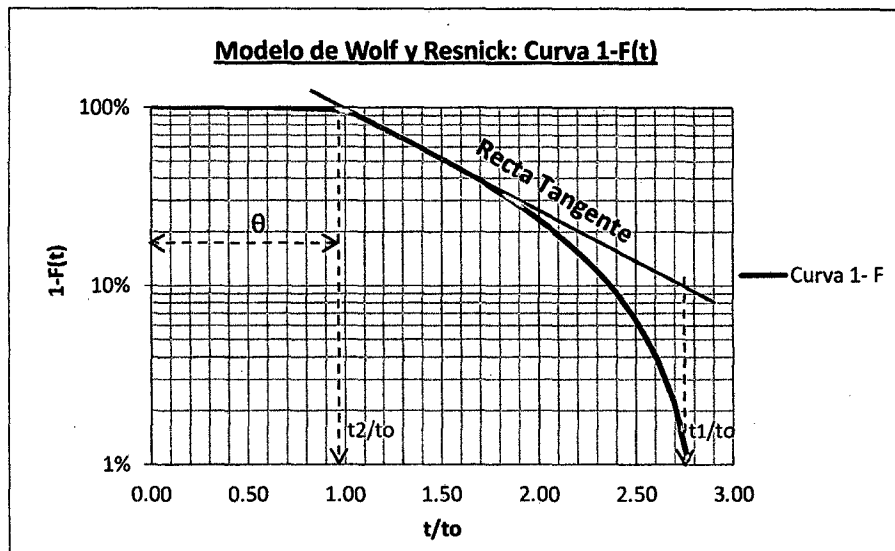
Además:

$$t_1/t_0 = 2.740$$

$$t_2/t_0 = 0.970$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.565$$

Grafico IV.28.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 55.79\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -73.87\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 44.21\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 55.79% y flujo mezclado 44.21% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -73.87 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ):

$$t_m = 715.64 \text{ min.}$$

$$t_m = 11.93 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{19380238.4 \text{ min}^3}{404.6625 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 13.30 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.0935$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante Iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left(\frac{uL}{D}\right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.0935$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0492 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

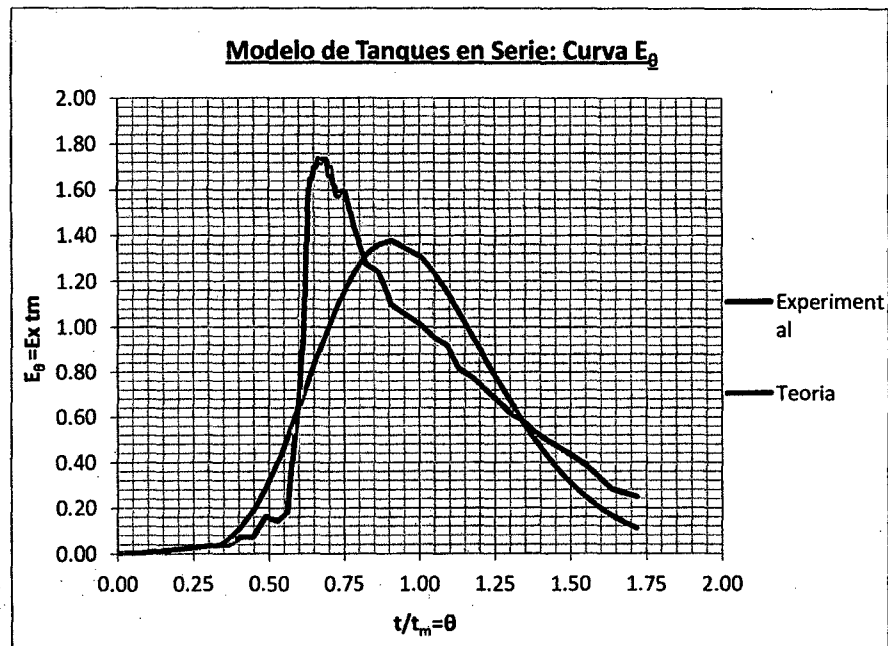
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 11$$

Grafico IV.29.



El Grafico IV.29. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia y final, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

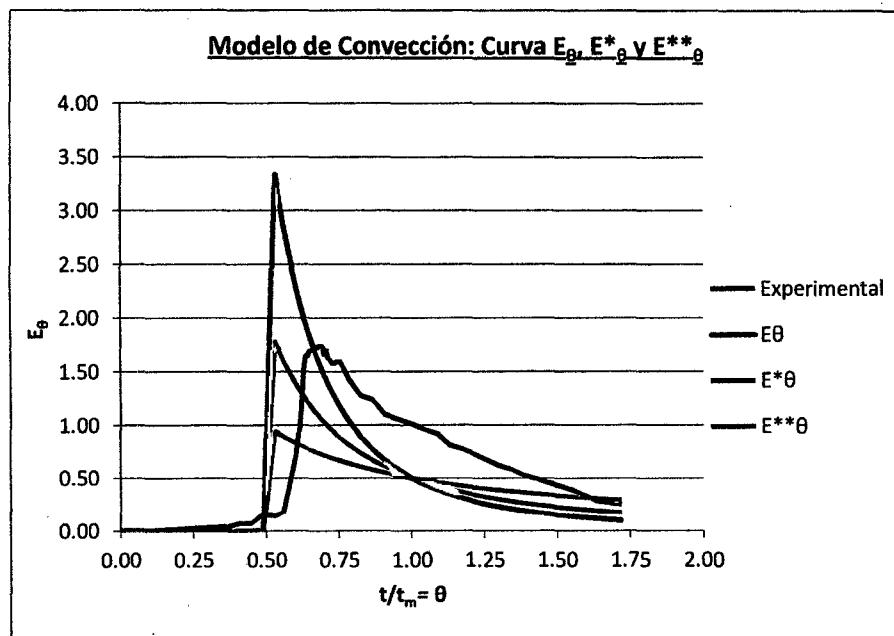
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.30.



Del Grafico IV.30. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

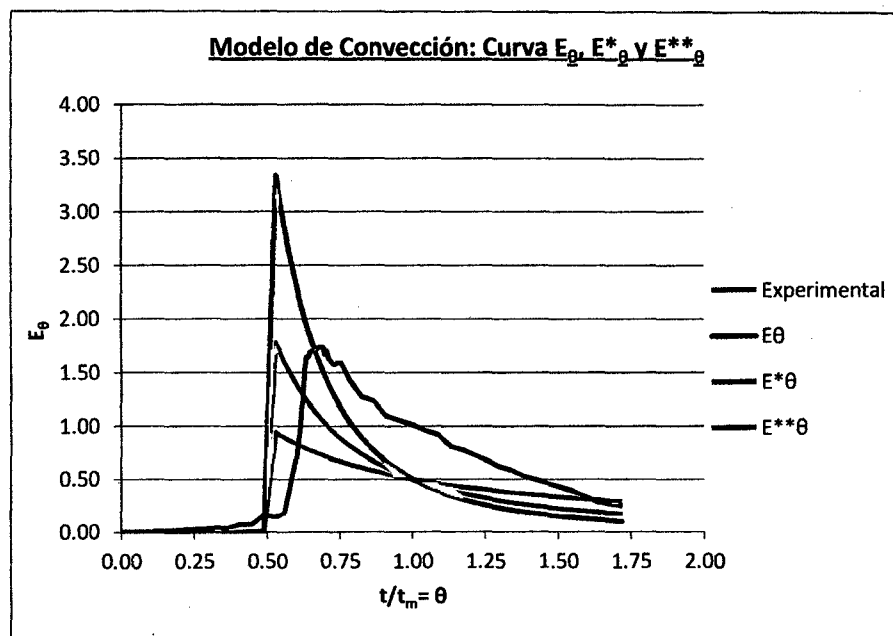
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.30.



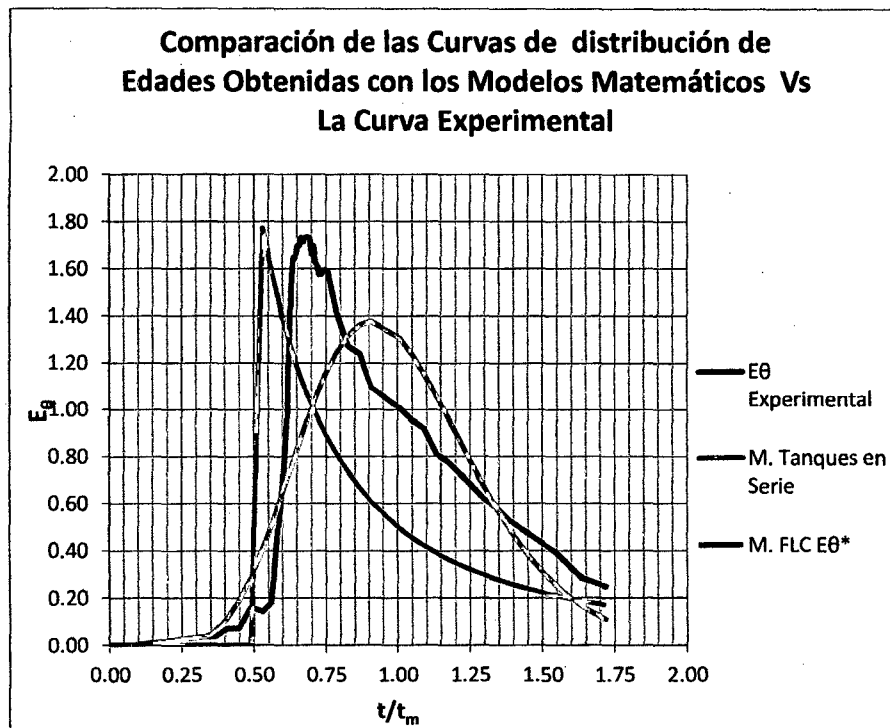
Del Grafico IV.30. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.



### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.31.



Del Grafico IV.31. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°03, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la amplitud. El ancho de la curva se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**d) Ensayo de Trazadores con NaCl N°04**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°04 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 04  
 Fecha : 19/12/10  
 T° Ambiental : 19°C / 27°C  
 T° Agua : 19°C / 25°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 1.15 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.57 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 10.40 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.57 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.53 horas <> 451.89 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.12.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°04 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.15	1.15	3.91	21.0	22.0
08:20	50	1.15	1.15	3.74	21.0	22.0
11:40	250	1.25	1.29	3.67	21.5	24.5
12:20	290	1.25	1.30	3.66	21.5	25.5
12:50	320	1.25	1.32	3.68	22.5	25.5
13:20	350	1.26	1.31	3.74	22.5	25.5
13:50	380	1.26	1.38	3.59	24.0	26.0
14:20	410	1.26	1.37	3.60	24.0	26.5
14:35	425	1.28	1.46	3.58	24.0	26.5
14:50	440	1.29	2.01	3.49	24.0	26.5
14:55	445	1.29	2.06	3.53	24.5	26.5
15:00	450	1.29	2.08	3.58	24.5	26.5
15:05	455	1.27	2.07	3.53	24.5	26.5
15:10	460	1.27	2.07	3.49	24.5	26.5
15:15	465	1.27	2.13	3.44	25.0	27.0

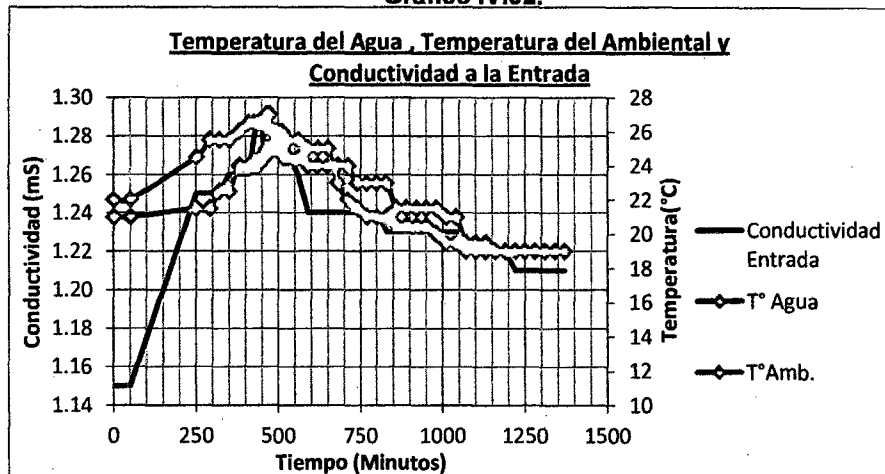
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.12.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:20	470	1.27	2.22	3.45	25.0	27.0
15:25	475	1.27	2.31	3.45	25.0	27.0
15:30	480	1.28	2.33	3.46	25.0	26.0
15:35	485	1.27	2.32	3.46	25.0	26.0
15:40	490	1.27	2.34	3.47	25.0	26.0
15:45	495	1.27	2.35	3.44	25.0	26.0
15:50	500	1.27	2.34	3.42	25.0	26.0
15:55	505	1.27	2.29	3.39	25.0	26.0
16:00	510	1.27	2.28	3.36	25.0	26.0
16:05	515	1.27	2.26	3.37	24.5	25.5
16:10	520	1.27	2.23	3.38	24.5	25.5
16:20	530	1.27	2.24	3.39	24.5	25.5
16:50	560	1.26	2.16	3.44	24.5	25.5
17:20	590	1.24	2.04	3.46	24.0	25.0
17:50	620	1.24	1.92	3.62	24.0	25.0
18:20	650	1.24	1.86	3.56	24.0	25.0
18:50	680	1.24	1.80	3.64	24.0	23.0
19:20	710	1.24	1.75	3.62	24.0	22.0
19:50	740	1.24	1.72	3.58	23.0	21.5
20:20	770	1.24	1.68	3.55	23.0	21.0
20:50	800	1.24	1.64	3.45	23.0	21.0
21:20	830	1.23	1.59	3.56	23.0	21.0
21:50	860	1.23	1.53	3.54	21.5	20.5
22:20	890	1.23	1.51	3.56	21.5	20.5
22:50	920	1.23	1.48	3.52	21.5	20.5
23:20	950	1.23	1.46	3.52	21.5	20.5
23:50	980	1.23	1.45	3.49	21.5	20.0
00:20	1010	1.23	1.43	3.47	21.0	19.5
00:50	1040	1.23	1.42	3.48	21.0	19.5
01:20	1070	1.22	1.41	3.51	19.5	19.0
01:50	1100	1.22	1.40	3.47	19.5	19.0
02:20	1130	1.22	1.39	3.49	19.5	19.0
02:50	1160	1.22	1.38	3.46	19.0	19.0
03:20	1190	1.22	1.37	3.48	19.0	19.0
03:50	1220	1.21	1.36	3.46	19.0	19.0
04:20	1250	1.21	1.35	3.48	19.0	19.0
04:50	1280	1.21	1.34	3.51	19.0	19.0
05:20	1310	1.21	1.33	3.49	19.0	19.0
05:50	1340	1.21	1.32	3.50	19.0	19.0
06:20	1370	1.21	1.31	3.52	19.0	19.0

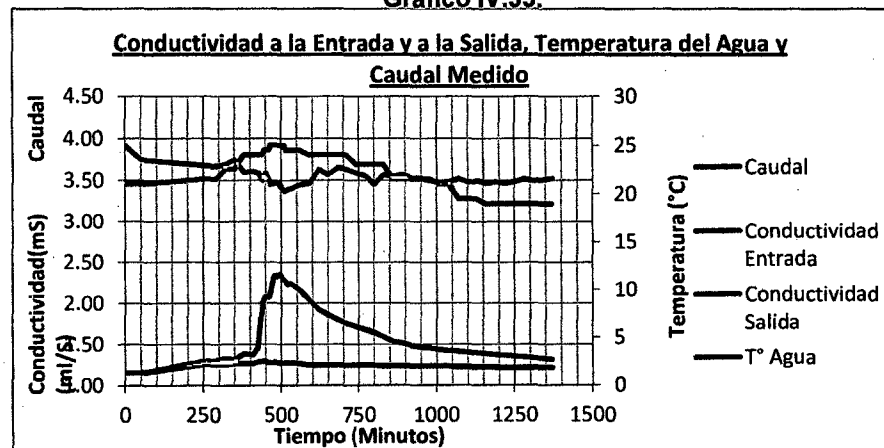
**F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

**Grafico IV.32.**



En el Grafico IV.32. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varia de forma directa con la temperatura del agua, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

**Grafico IV.33.**



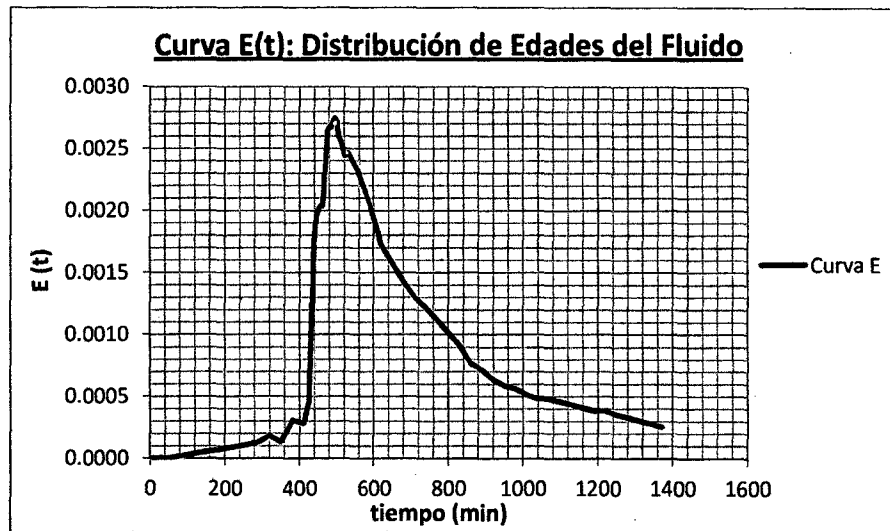
En el Grafico IV.33. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia a lo largo de la prueba, la temperatura a partir de  $t=590$  min (5:20 pm), la curva es descendente.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

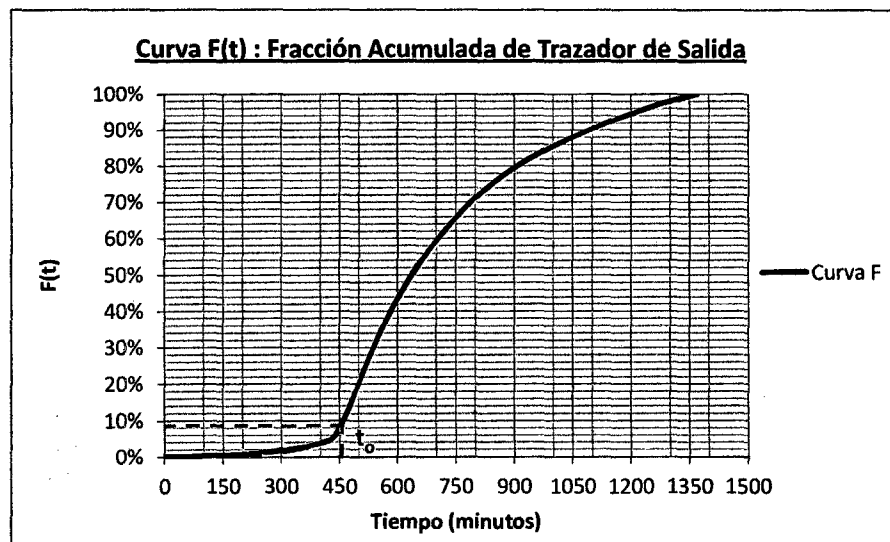
**Grafico IV.34.**



El Grafico IV.34. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

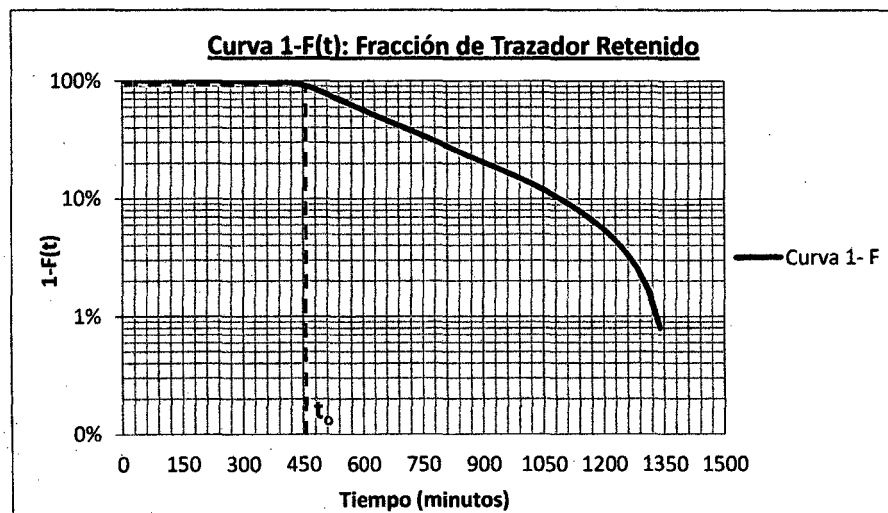
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

**Grafico IV.35.**



El Grafico IV.35. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 8.5% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.53 horas.

Grafico IV.36.



En el Grafico IV.36. que muestra la Curva 1-F(t) que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.53 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 91.5%.



**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 250.00 min.  
**4.17 horas**  
 $t_p$  : 495.00 min.  
**8.25 horas**  
 $t_m$  : 715.40 min.  
**11.92 horas**  
 $t_o$  : 451.89 min.  
**7.53 horas**  
 $t_c$  : 257.00 min.  
**4.28 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 11.92 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 11.92 horas

$$t_i/t_o = 0.55$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.58$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.10$$

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

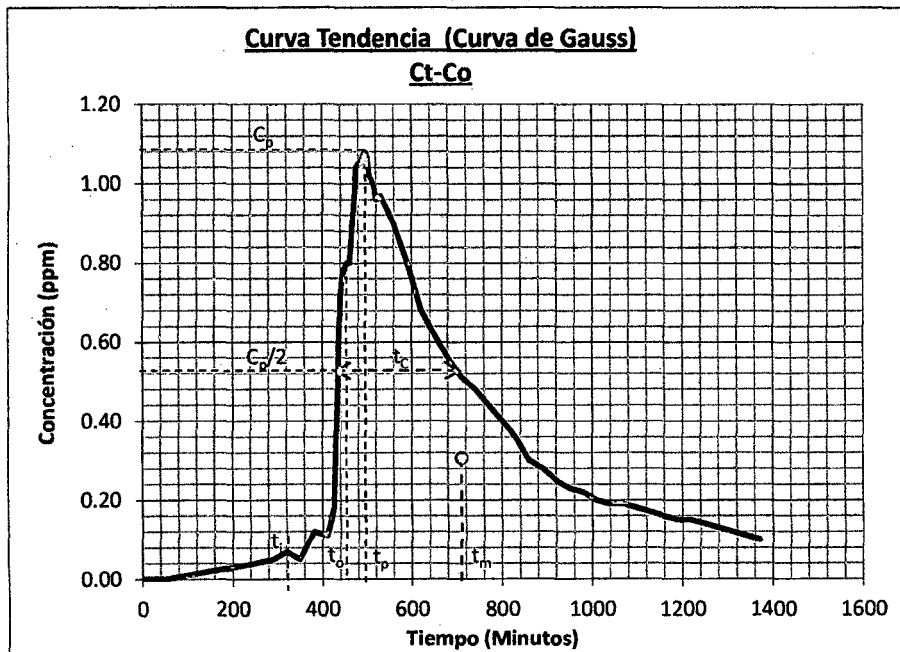
$$t_c/t_o = 0.57$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 11.92 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.37.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_0$  : tiempo de retención teórico.

### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.38. se encuentra que :

$$\theta = 0.970$$

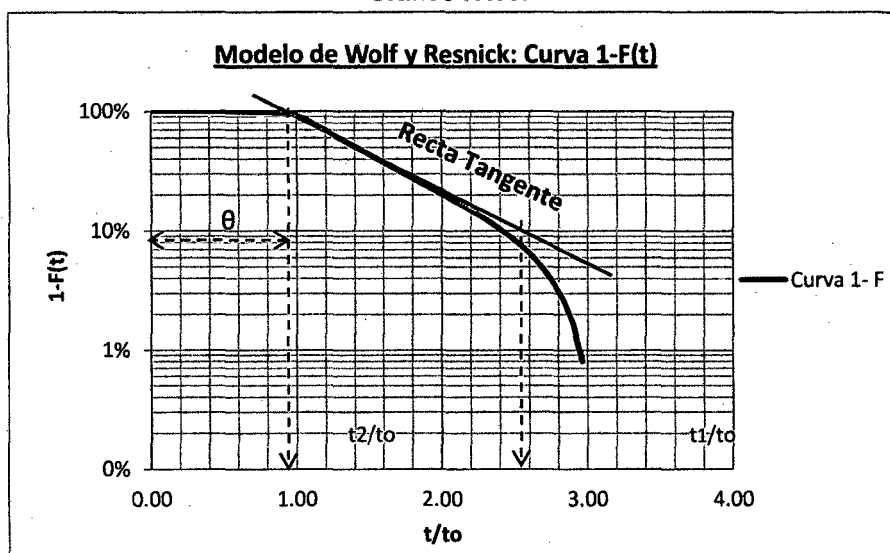
Además:

$$t_1/t_0 = 2.590$$

$$t_2/t_0 = 0.970$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.617$$

Grafico IV.38.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 57.96\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -67.35\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 42.04\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 57.96% y flujo mezclado 42.04% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -67.35 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 715.40 \text{ min.}$$

$$t_m = 11.92 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{24108696.09 \text{ min}^3}{393.575 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 17.02 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.1197$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1197$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0639 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

$$E_{(\theta)} = \frac{N(N * \theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N*\theta}$$

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

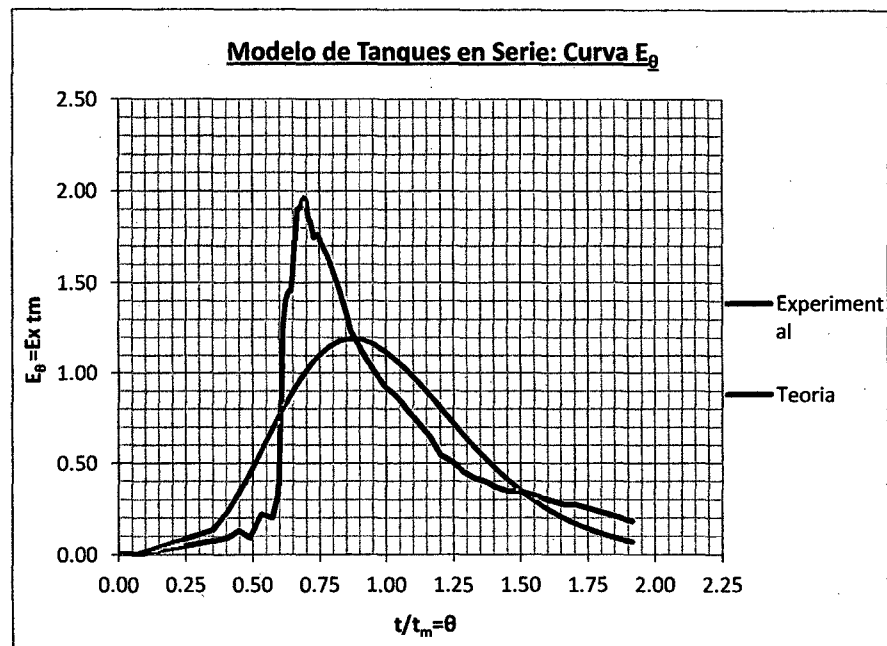
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 8$$

Grafico IV.39.



El Grafico IV.39. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

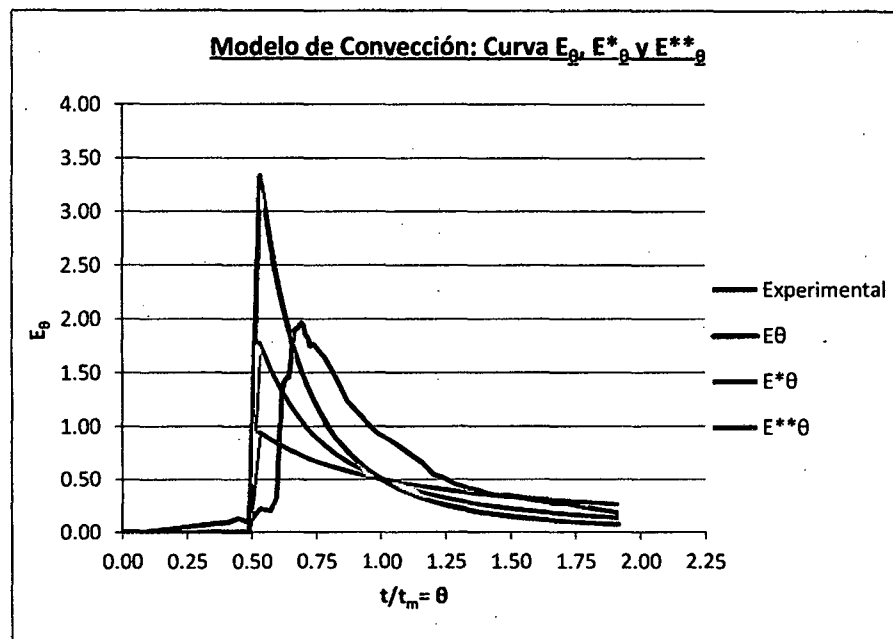
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.40.

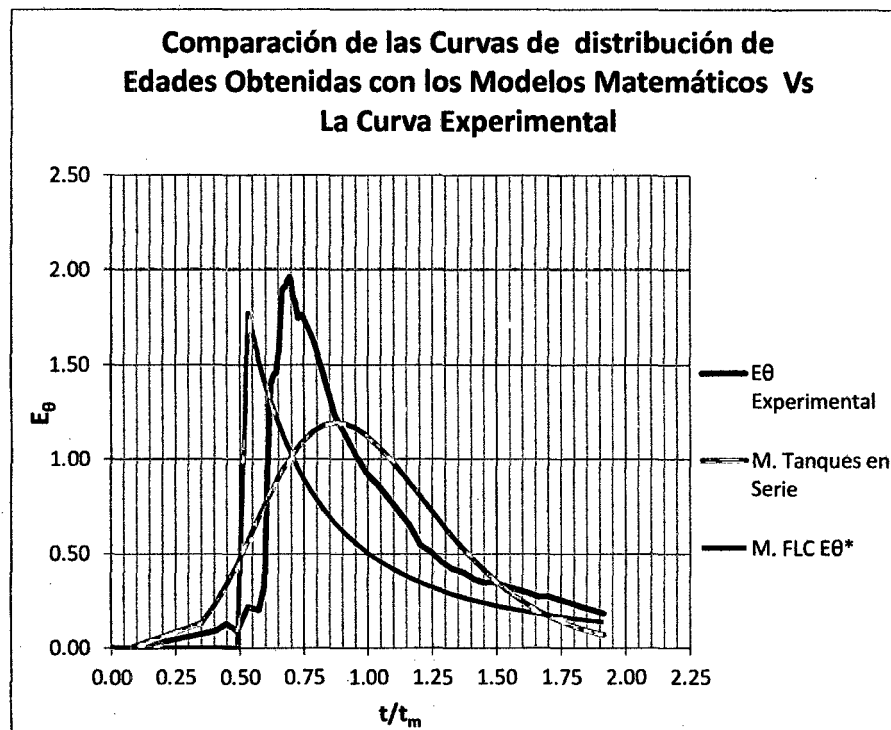


Del Grafico IV.40. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.41.



Del Gráfico IV.41. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°04, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la alplitud. El ancho de la curva se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**e) Ensayo de Trazadores con NaCl N°05**



**ENSAYO DE TRAZADORES N°05 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 05  
Fecha : 21/12/10  
T° Ambiental : 19°C / 26°C  
T° Agua : 19.5°C / 24°C

**B. CARACTERIZACIÓN DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
W de NaCl : 100.00 gr  
Volumen de : 3000.00 ml  
agua  
Concentración  
[ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
[ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
Conductividad : 1.16 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.73 ml/s  
Equivalente en el UASB-UNITRAR  
Qp : 10.87 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
Caudal : 3.73 ml/s  
Promedio  
To : 7.21 horas <> 432.30 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T° Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T° Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.13.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°05 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.16	1.16	4.65	21.5	22.5
07:40	10	1.16	1.16	3.87	21.5	22.5
12:00	270	1.16	1.16	3.90	22.0	25.5
12:30	300	1.24	1.24	3.62	23.0	24.5
12:40	310	1.24	1.24	3.48	23.0	24.5
13:00	330	1.25	1.25	3.51	23.0	24.5
13:30	360	1.23	1.25	3.49	23.0	24.5
14:10	400	1.26	1.28	3.55	23.5	26.0
14:40	430	1.25	1.60	3.59	23.5	26.0
14:50	440	1.27	2.11	3.60	24.0	26.0
15:00	450	1.27	2.21	3.81	24.0	26.0
15:10	460	1.26	2.33	3.81	24.0	26.0
15:15	465	1.26	2.34	3.81	24.0	26.0
15:20	470	1.27	2.40	3.81	24.0	26.0
15:25	475	1.27	2.39	3.62	24.0	26.0

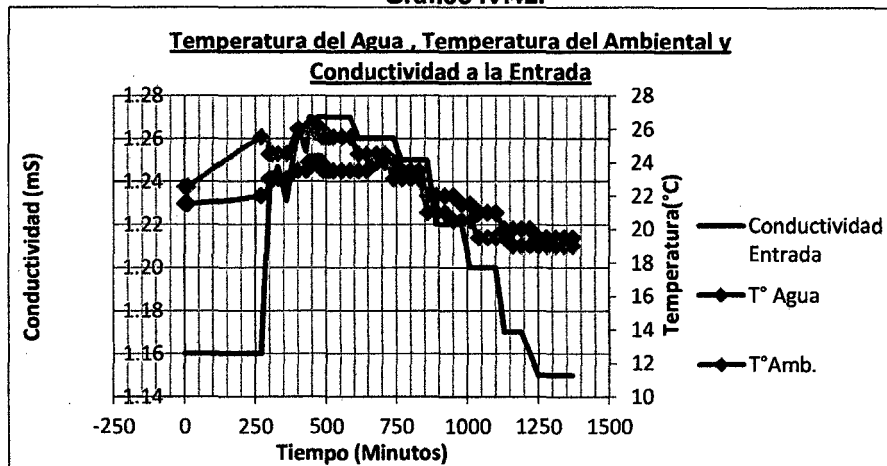
Continua en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.13.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:30	480	1.27	2.41	3.43	24.0	26.0
15:35	485	1.27	2.41	3.62	24.0	25.5
15:40	490	1.27	2.38	3.81	23.5	25.5
15:45	495	1.27	2.37	3.81	23.5	25.5
16:00	510	1.27	2.35	3.81	23.5	25.5
16:15	525	1.27	2.35	3.64	23.5	25.5
16:45	555	1.27	2.16	3.60	23.5	25.5
17:15	585	1.27	2.12	3.64	23.5	25.5
17:45	615	1.26	2.03	3.62	23.5	24.5
18:15	645	1.26	1.97	3.58	23.5	24.5
18:50	680	1.26	1.95	3.54	24.0	24.5
19:20	710	1.26	1.91	3.47	24.0	24.5
19:50	740	1.26	1.87	3.75	24.0	23.0
20:20	770	1.25	1.82	3.68	23.5	23.0
20:50	800	1.25	1.78	3.78	23.5	23.0
21:20	830	1.25	1.75	3.73	23.5	23.0
21:50	860	1.25	1.72	3.74	22.0	21.0
22:20	890	1.22	1.68	3.75	22.0	21.0
22:50	920	1.22	1.65	3.71	22.0	21.0
23:20	950	1.22	1.62	3.80	22.0	20.5
23:50	980	1.22	1.58	3.82	21.5	20.5
00:20	1010	1.20	1.56	3.73	21.5	20.5
00:50	1040	1.20	1.53	3.73	21.0	19.5
01:20	1070	1.20	1.52	3.75	21.0	19.5
01:50	1100	1.20	1.49	3.70	21.0	19.5
02:20	1130	1.17	1.46	3.68	20.0	19.5
02:50	1160	1.17	1.44	3.75	20.0	19.0
03:20	1190	1.17	1.41	3.73	20.0	19.0
03:50	1220	1.16	1.39	3.79	20.0	19.0
04:20	1250	1.15	1.36	3.72	19.5	19.0
04:50	1280	1.15	1.32	3.74	19.5	19.0
05:20	1310	1.15	1.30	3.76	19.5	19.0
05:50	1340	1.15	1.29	3.78	19.5	19.0
06:20	1370	1.15	1.28	3.74	19.5	19.0

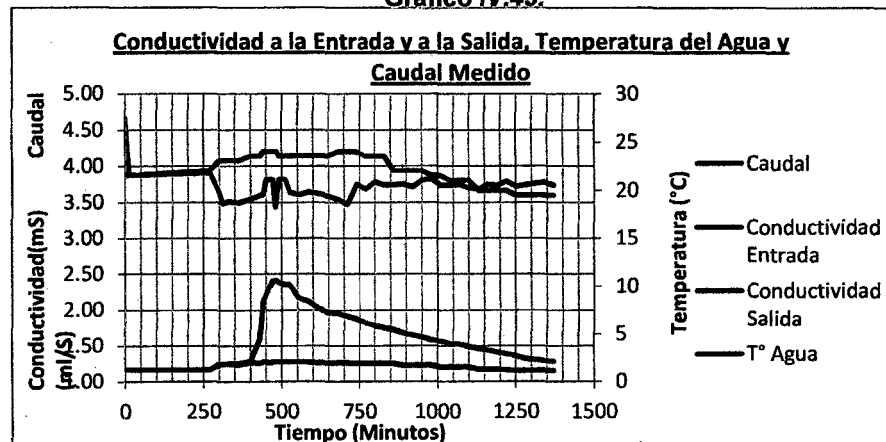
**F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

**Grafico IV.42.**



En el Grafico IV.42. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. Se observa una variación considerable de la conductividad de entrada, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

**Grafico IV.43.**



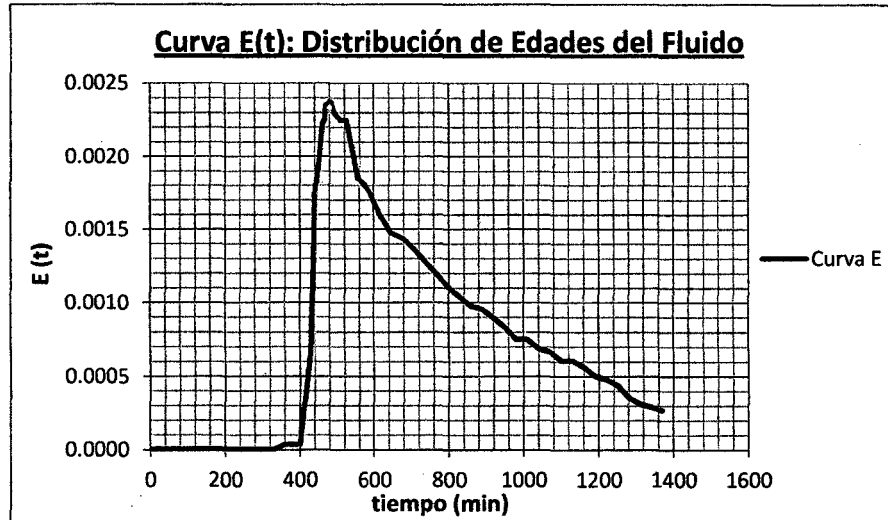
En el Grafico IV.43. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varía a lo largo de la prueba, entre las temperaturas de 19.5 a 24 °C.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

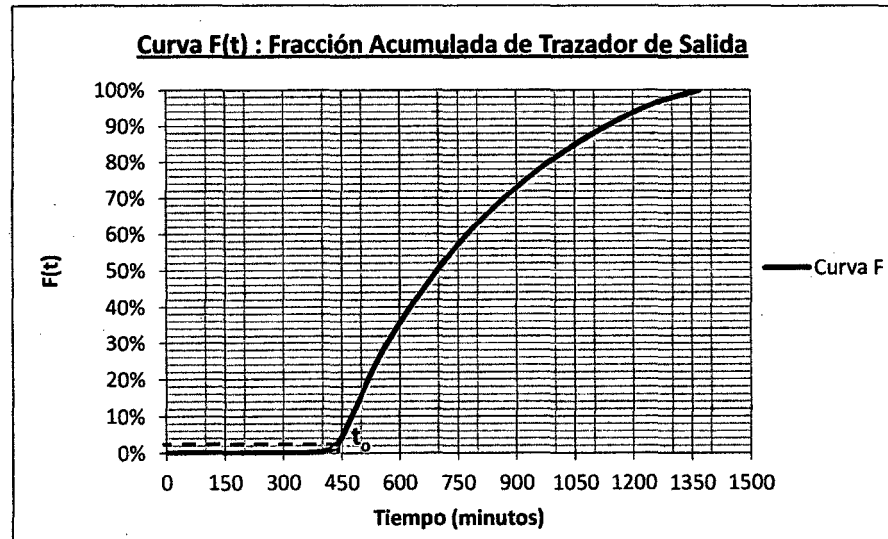
Grafico IV.44.



El Grafico IV.44. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

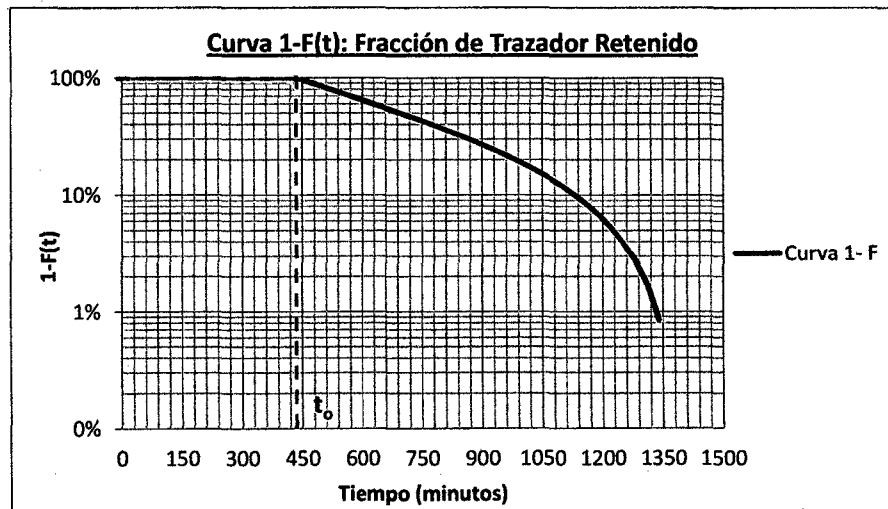
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

Grafico IV.45.



El Grafico IV.45. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 1.59% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.21 horas.

Grafico IV.46.



En el Grafico IV.46. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.21 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 98.41%.

**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)**

Parámetros :

$t_i$  : 360.00 min.  
**6.00 horas**  
 $t_p$  : 480.00 min.  
**8.00 horas**  
 $t_m$  : 764.62 min.  
**12.74 horas**  
 $t_o$  : 432.30 min.  
**7.21 horas**  
 $t_c$  : 335.43 min.  
**5.59 horas**

Análisis del Flujo :

**CRITERIO Y VALOR****ANALISIS** $t_m = 12.74$  horas

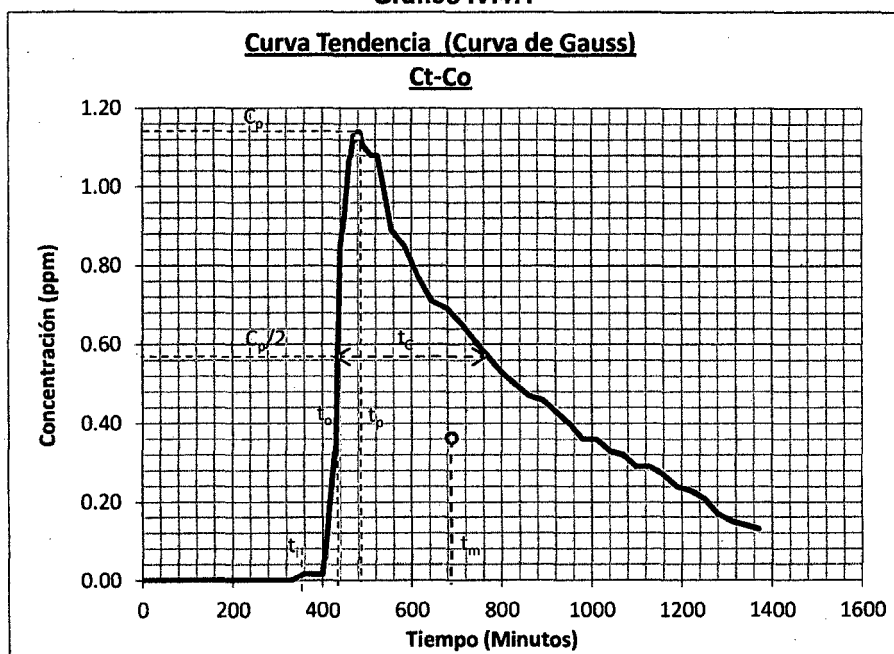
El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 12.74 horas

 $t_i/t_o = 0.83$ El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos. $t_m/t_o = 1.77$ El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador. $t_p/t_o = 1.11$ El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón. $t_c/t_o = 0.78$ El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 12.74 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.47.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.



### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.48. se encuentra que :

$$\theta = 1.100$$

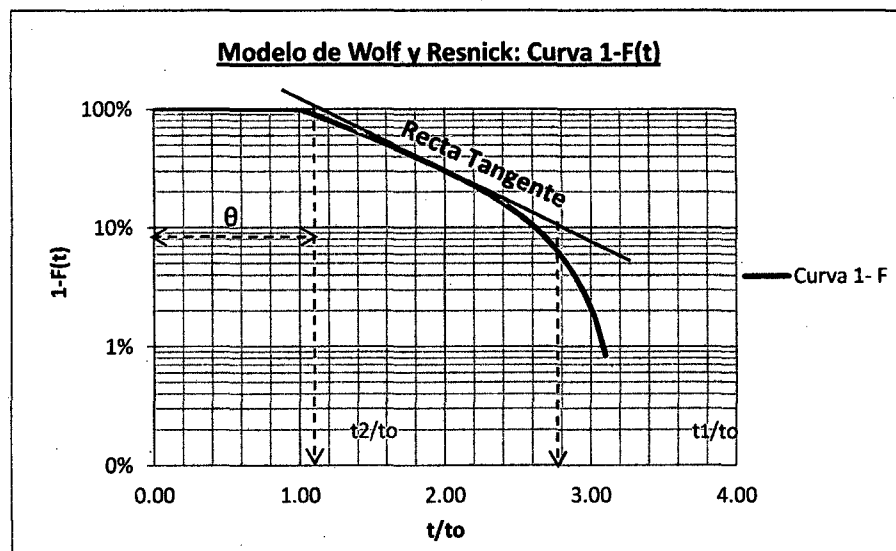
Además:

$$t_1/t_0 = 2.770$$

$$t_2/t_0 = 1.100$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.599$$

Grafico IV.48.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 60.27\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -82.53\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 39.73\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 60.27% y flujo mezclado 39.73% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -82.53 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**  
**1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ):

$$t_m = 764.62 \text{ min.}$$

$$t_m = 12.74 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{29405060.83 \text{ min}^3}{481.15 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 16.98 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.1045$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1045$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0553 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

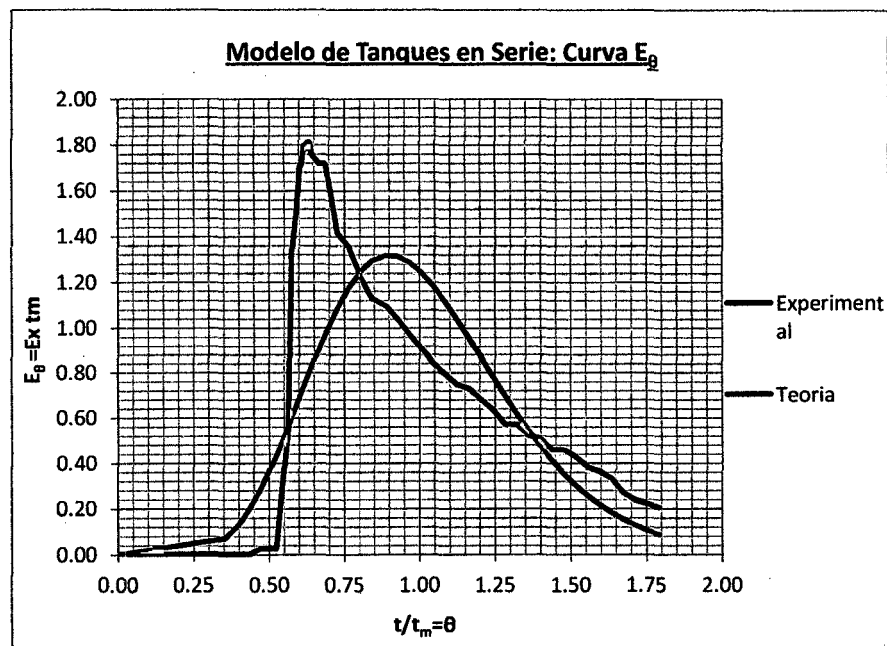
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 10$$

Grafico IV.49.



El Grafico IV.49. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial e intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

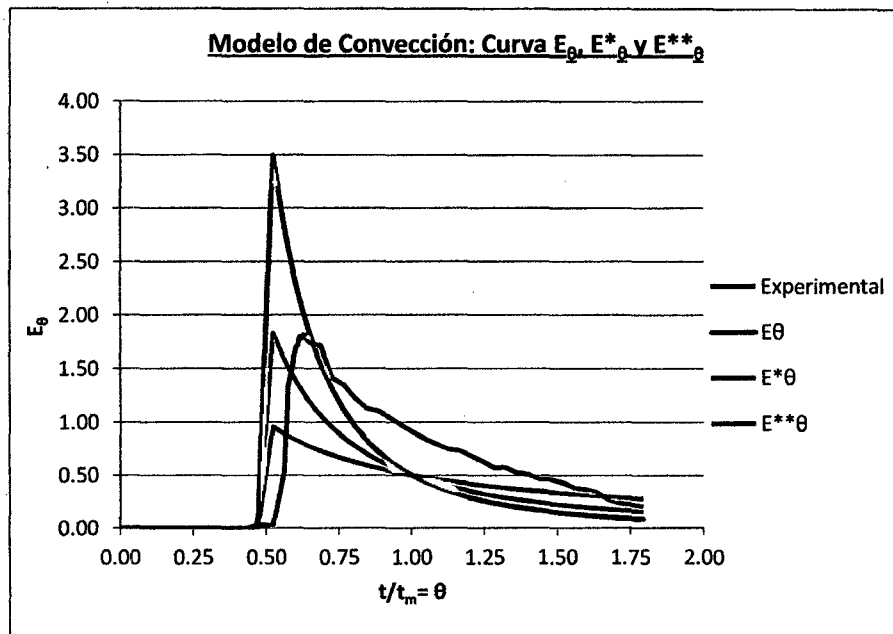
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.50.

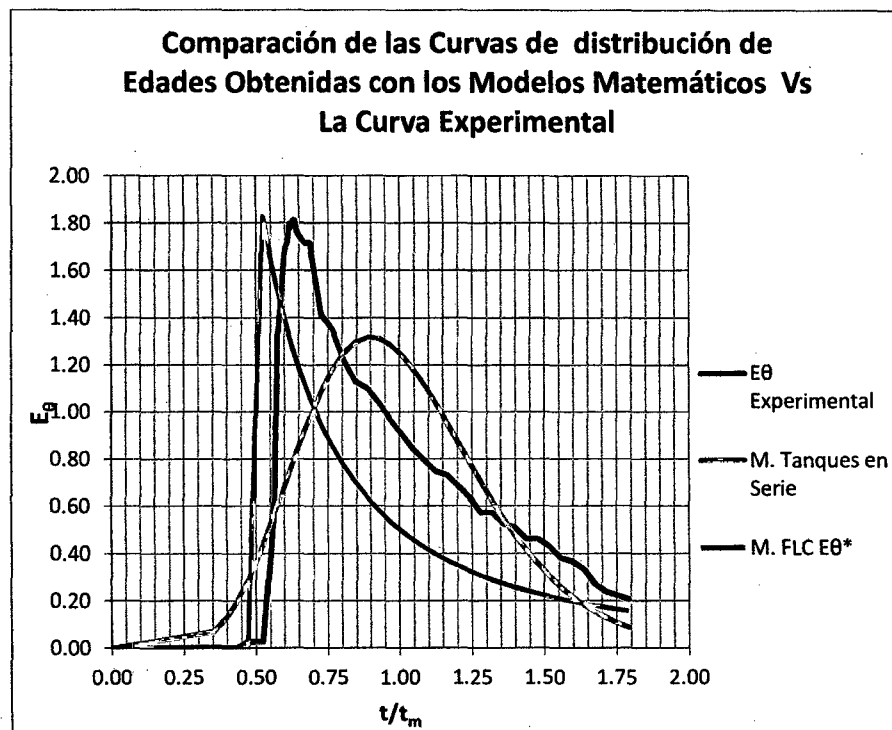


Del Grafico IV.50. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.51.



Del Grafico IV.51. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°05, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la alplitud. El ancho de la curva se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**f) Ensayo de Trazadores con NaCl N°06**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°06 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 06  
 Fecha : 23/12/10  
 T° Ambiental : 19°C / 28.5°C  
 T° Agua : 19°C / 26.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 1.20 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.56 ml/s  
 Equivalente en el UASB-UNITRAR  
 Qp : 10.37 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.56 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.55 horas <> 452.91 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T° Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T° Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.14.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°06 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.20	1.20	6.41	26.0	28.0
07:45	15	1.20	1.20	3.44	26.0	28.0
12:15	285	1.31	1.36	3.47	26.0	28.0
12:35	305	1.31	1.41	3.55	26.5	28.5
13:05	335	1.30	1.44	3.70	26.0	27.0
14:25	415	1.29	1.53	3.60	26.0	27.0
15:05	455	1.29	2.16	3.59	26.0	27.0
15:10	460	1.27	2.21	3.59	26.0	26.5
15:15	465	1.27	2.28	3.59	25.5	26.5
15:20	470	1.27	2.32	3.59	25.5	26.5
15:25	475	1.27	2.34	3.59	25.5	26.5
15:30	480	1.27	2.32	3.59	25.5	27.0
15:35	485	1.27	2.30	3.58	26.0	27.0
15:40	490	1.27	2.26	3.58	26.0	27.0
15:45	495	1.27	2.26	3.61	26.0	27.0

Continúa en la siguiente página

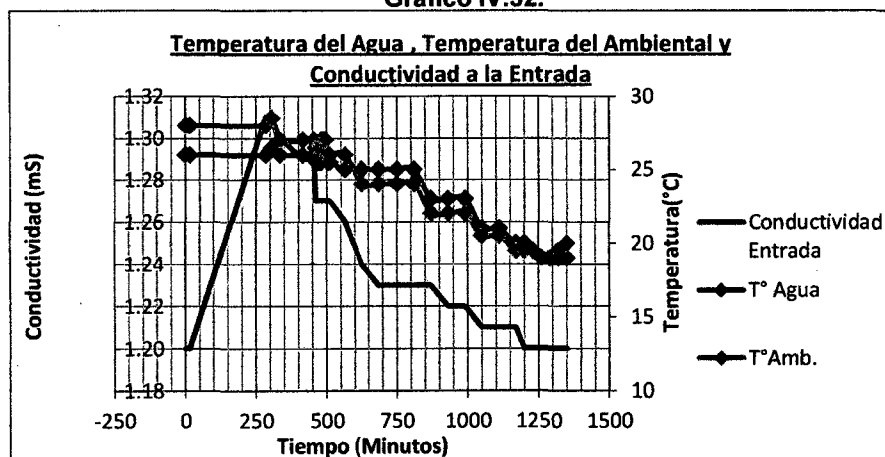


Continuación de la Tabla IV.14.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:50	500	1.27	2.26	3.65	26.0	26.0
15:55	505	1.27	2.22	3.68	25.5	26.0
16:00	510	1.27	2.21	3.70	25.5	26.0
16:55	565	1.26	2.15	3.55	25.0	26.0
17:55	625	1.24	1.97	3.51	25.0	24.0
18:55	685	1.23	1.86	3.44	25.0	24.0
20:00	750	1.23	1.76	3.53	25.0	24.0
21:00	810	1.23	1.68	3.57	25.0	24.0
22:00	870	1.23	1.60	3.55	23.0	22.0
23:00	930	1.22	1.56	3.58	23.0	22.0
00:00	990	1.22	1.51	3.59	23.0	22.0
01:00	1050	1.21	1.48	3.58	21.0	20.5
02:00	1110	1.21	1.45	3.53	21.0	20.5
03:00	1170	1.21	1.41	3.55	20.0	19.5
03:30	1200	1.20	1.39	3.55	20.0	19.5
04:00	1230	1.20	1.37	3.58	19.5	19.5
04:30	1260	1.20	1.35	3.59	19.0	19.0
05:00	1290	1.20	1.33	3.54	19.0	19.0
05:30	1320	1.20	1.32	3.57	19.0	19.5
06:00	1350	1.20	1.31	3.55	19.0	20.0

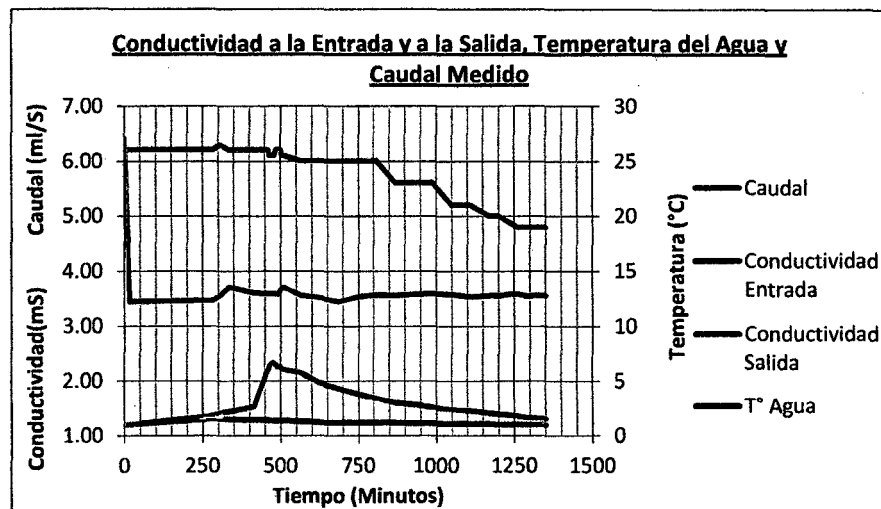
#### F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES

Grafico IV.52.



En el Grafico IV.52. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. Se observa una variación considerable de la conductividad de entrada, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

Grafico IV.53.



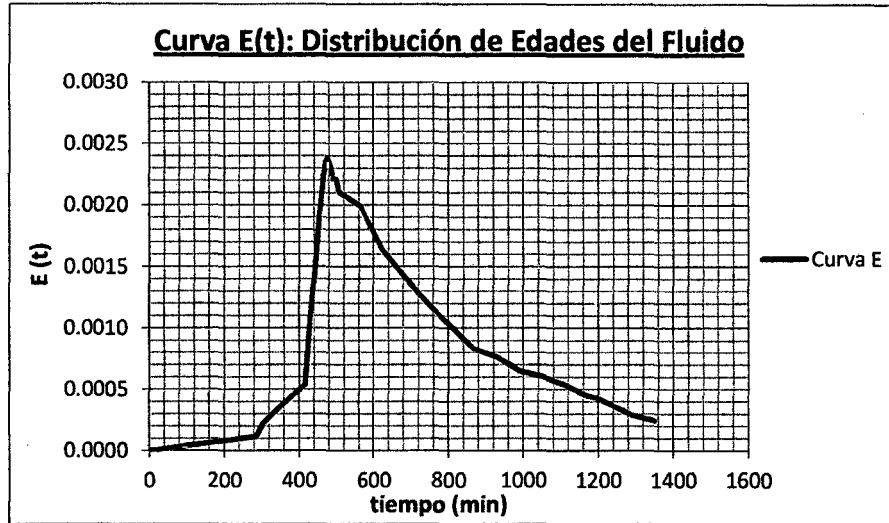
En el Grafico IV.53. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia a lo largo de la prueba, a partir de  $t=810$  min (9:00 pm) la curva tiende a disminuir de manera constante.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

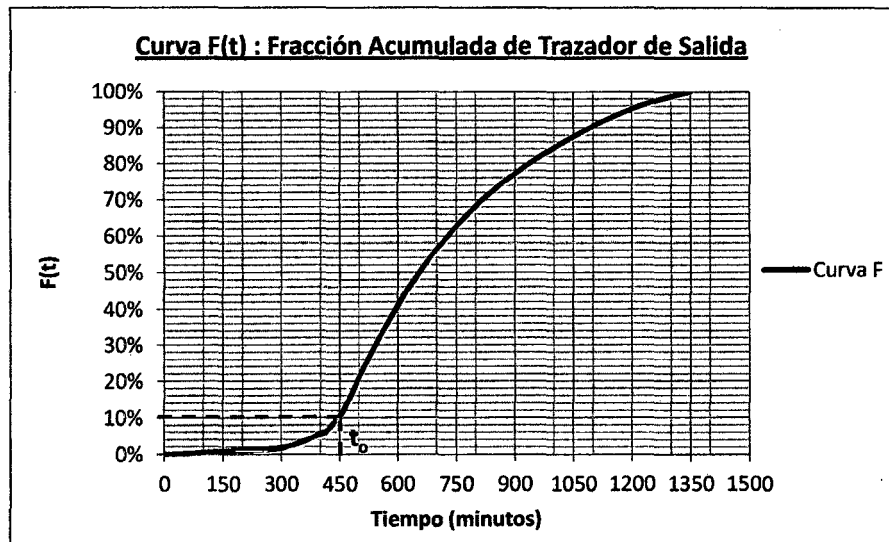
**Grafico IV.54.**



El Grafico IV.54. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

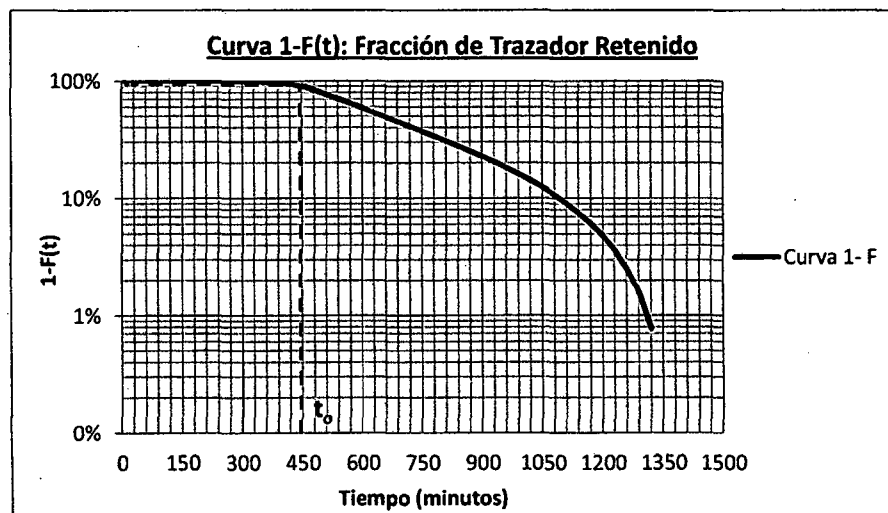
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

**Grafico IV.55.**



El Grafico IV.55. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 10.72% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.55 horas.

Grafico IV.56.



En el Grafico IV.56. que muestra la Curva 1-F(t) que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.55 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 89.28%.

**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 285.00 min.  
**4.75 horas**  
 $t_p$  : 475.00 min.  
**7.92 horas**  
 $t_m$  : 736.18 min.  
**12.27 horas**  
 $t_o$  : 452.91 min.  
**7.55 horas**  
 $t_c$  : 313.02 min.  
**5.22 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 12.27 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 12.27 horas

$$t/t_o = 0.63$$

El valor de  $t/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.63$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.05$$

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

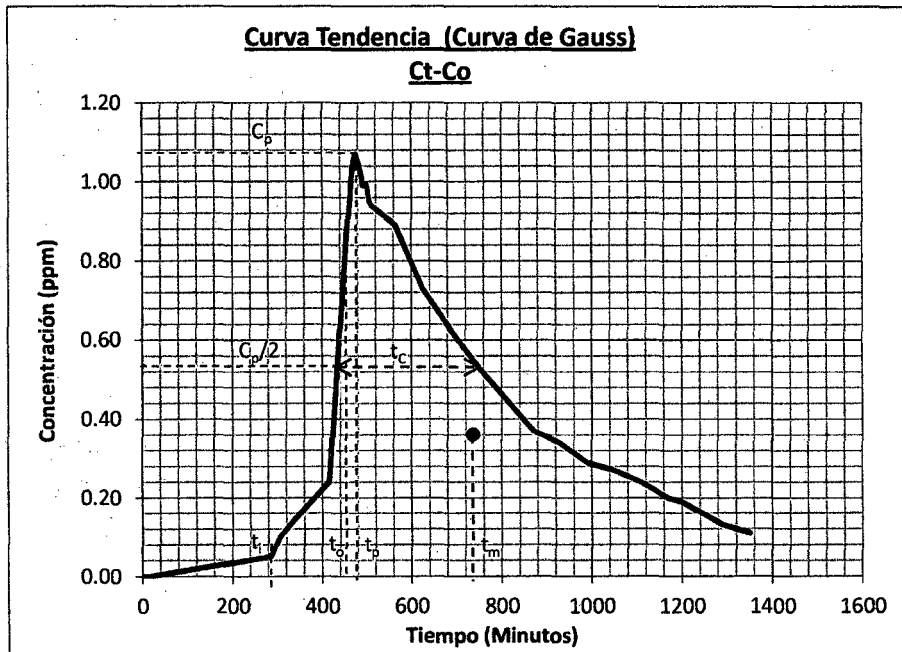
$$t_c/t_o = 0.69$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 12.27 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes cortocircuitos.

Grafico IV.57.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.58. se encuentra que :

$$\theta = 0.940$$

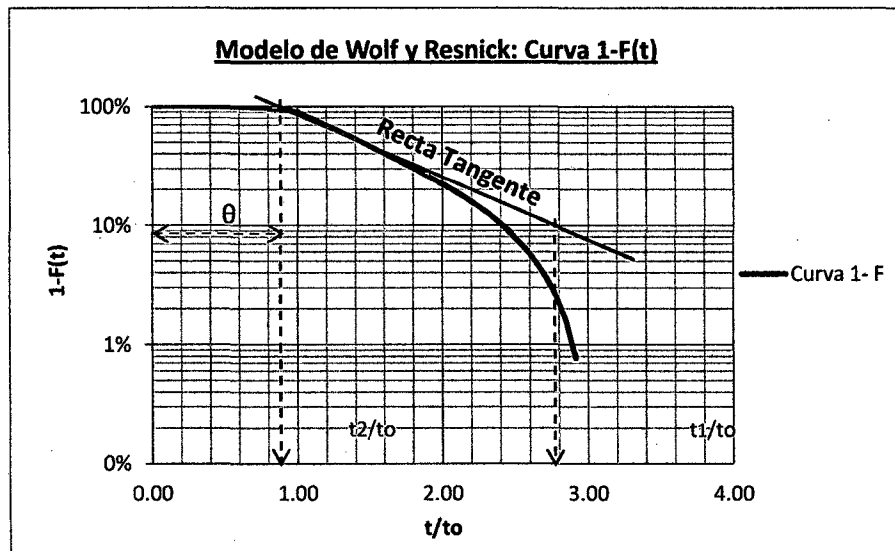
Además:

$$t_1/t_0 = 2.760$$

$$t_2/t_0 = 0.940$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.549$$

Grafico IV.58.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 54.32\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -73.04\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 45.68\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 54.32% y flujo mezclado 45.68% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -73.04 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 736.18 \text{ min.}$$

$$t_m = 12.27 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{27875937.44 \text{ min}^3}{448.5 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 17.26 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.1147$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1146$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0610 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a } 0.01.$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.



## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

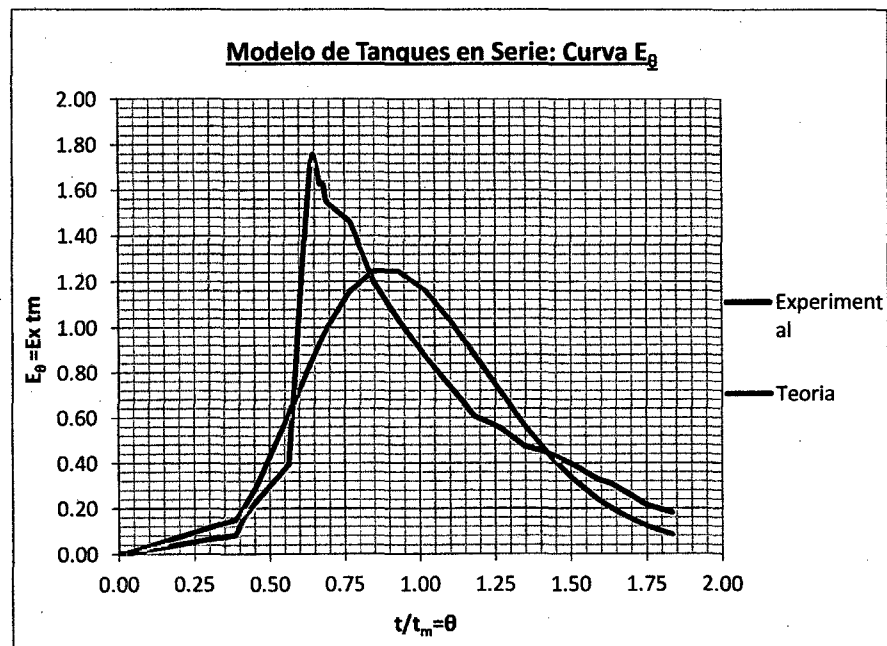
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 9$$

Grafico IV.59.



El Grafico IV.59. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial y final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

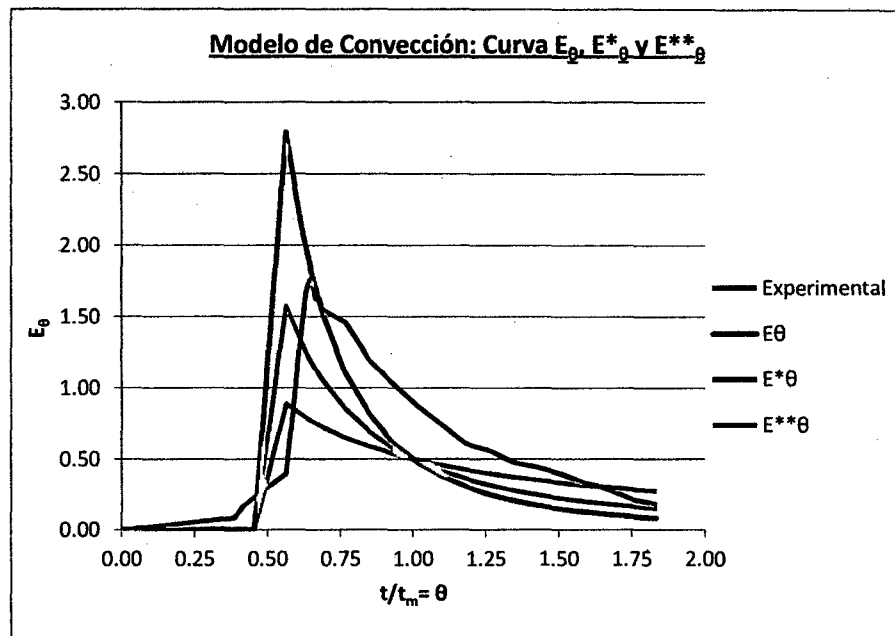
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.60.

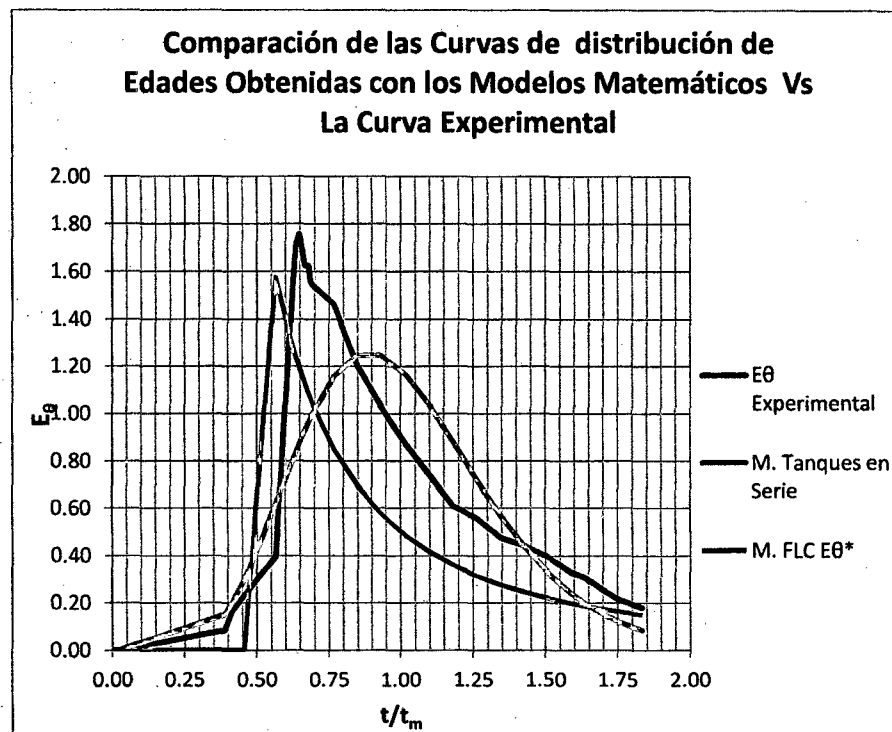


Del Grafico IV.60. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.61.



Del Grafico IV.61. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°06, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la amplitud, además se observa un desfase de la curva experimental, hacia la derecha con respecto a este modelo.

**g) Ensayo de Trazadores con NaCl N°07**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°07 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 07  
 Fecha : 28/12/10  
 T° Ambiental : 19°C / 25°C  
 T° Agua : 19°C / 26.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 1.30 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.25 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 9.49 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.25 ml/s  
 Promedio  
 To : 8.25 horas <> 495.27 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.15.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°07 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.30	1.30	3.43	21.0	20.5
08:30	60	1.30	1.30	3.50	24.0	22.0
09:20	110	1.30	1.30	3.38	26.0	23.5
10:25	175	1.31	1.31	3.26	25.5	23.5
11:25	235	1.31	1.33	3.26	26.0	23.5
12:25	295	1.32	1.37	3.36	26.5	23.5
14:25	415	1.32	1.42	3.20	26.0	23.5
14:55	445	1.26	1.48	3.67	26.5	23.5
15:10	460	1.26	1.50	3.27	26.5	23.5
15:20	470	1.27	1.67	3.25	26.0	24.0
15:25	475	1.27	1.91	3.24	26.0	24.0
15:30	480	1.27	2.13	3.24	26.0	24.0
15:35	485	1.27	2.24	3.23	26.0	24.0
15:40	490	1.27	2.31	3.22	26.0	24.0
15:45	495	1.27	2.41	3.21	26.0	24.0

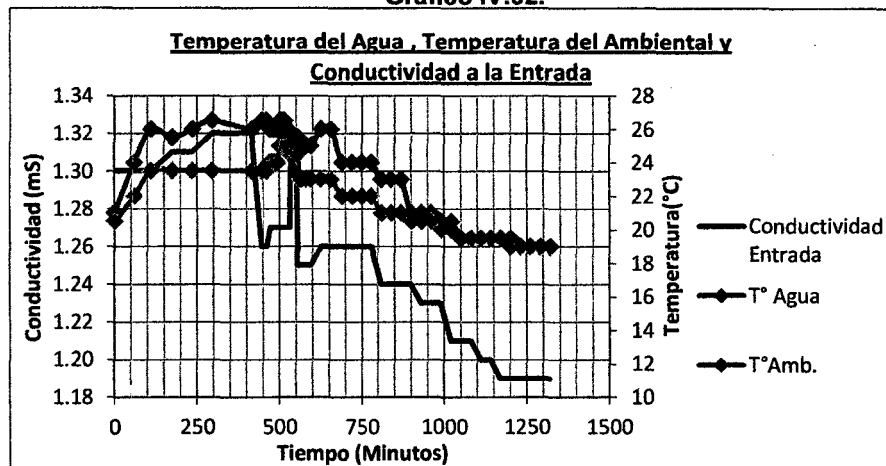
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.15.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:50	500	1.27	2.45	3.19	26.5	25.0
15:55	505	1.27	2.51	3.19	26.5	25.0
16:00	510	1.27	2.55	3.19	26.5	25.0
16:05	515	1.27	2.57	3.18	26.5	25.0
16:10	520	1.27	2.57	3.18	26.0	25.0
16:15	525	1.27	2.55	3.18	26.0	25.0
16:20	530	1.27	2.50	3.17	25.5	24.5
16:25	535	1.31	2.57	3.17	25.5	24.5
16:30	540	1.31	2.56	3.16	25.5	24.5
16:37	547	1.31	2.53	3.15	25.5	24.5
16:40	550	1.31	2.52	3.14	25.5	24.5
16:45	555	1.25	2.49	3.13	25.5	24.5
16:50	560	1.25	2.45	3.12	25.0	23.0
16:55	565	1.25	2.47	3.11	25.0	23.0
17:10	580	1.25	2.44	3.13	25.0	23.0
17:25	595	1.25	2.40	3.14	25.0	23.0
17:55	625	1.26	2.26	3.30	26.0	23.0
18:25	655	1.26	2.23	3.30	26.0	23.0
19:00	690	1.26	2.10	3.27	24.0	22.0
19:30	720	1.26	2.07	3.24	24.0	22.0
20:00	750	1.26	2.00	3.23	24.0	22.0
20:30	780	1.26	1.95	3.22	24.0	22.0
21:00	810	1.24	1.91	3.20	23.0	21.0
21:30	840	1.24	1.86	3.19	23.0	21.0
22:00	870	1.24	1.80	3.21	23.0	21.0
22:30	900	1.24	1.77	3.22	21.0	20.5
23:00	930	1.23	1.67	3.19	21.0	20.5
23:30	960	1.23	1.63	3.18	21.0	20.5
00:00	990	1.23	1.59	3.19	20.5	20.0
00:30	1020	1.21	1.56	3.18	20.5	20.0
01:00	1050	1.21	1.52	3.18	19.5	19.5
01:30	1080	1.21	1.48	3.19	19.5	19.5
02:00	1110	1.20	1.46	3.21	19.5	19.5
02:30	1140	1.20	1.43	3.20	19.5	19.5
03:00	1170	1.19	1.41	3.19	19.5	19.5
03:30	1200	1.19	1.39	3.18	19.0	19.5
04:00	1230	1.19	1.37	3.20	19.0	19.0
04:30	1260	1.19	1.35	3.20	19.0	19.0
05:00	1290	1.19	1.32	3.21	19.0	19.0
05:30	1320	1.19	1.30	3.21	19.0	19.0

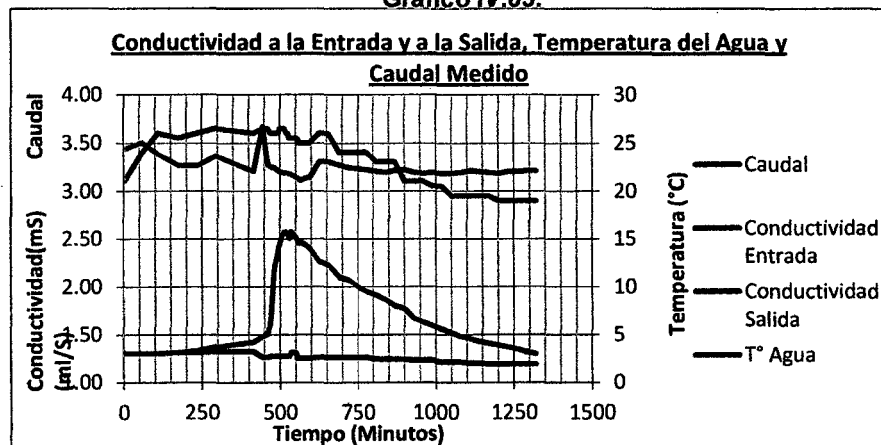
**F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

**Grafico IV.62.**



En el Grafico IV.62. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varía de forma directa con la temperatura del agua, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

**Grafico IV.63.**



En el Grafico IV.63. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, presencia de dos picos, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

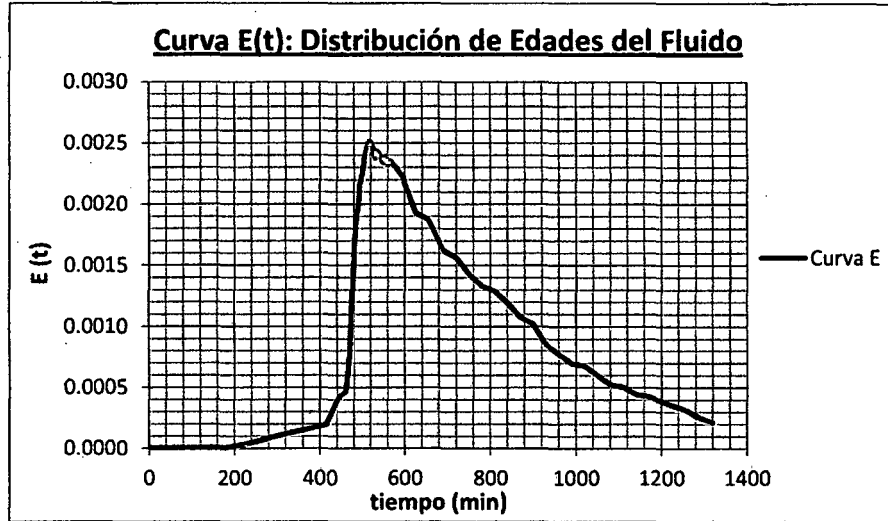
La temperatura del agua varía a lo largo de la prueba, la temperatura a partir de  $t=620$  min (5:20 pm) la curva es descendente.



**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

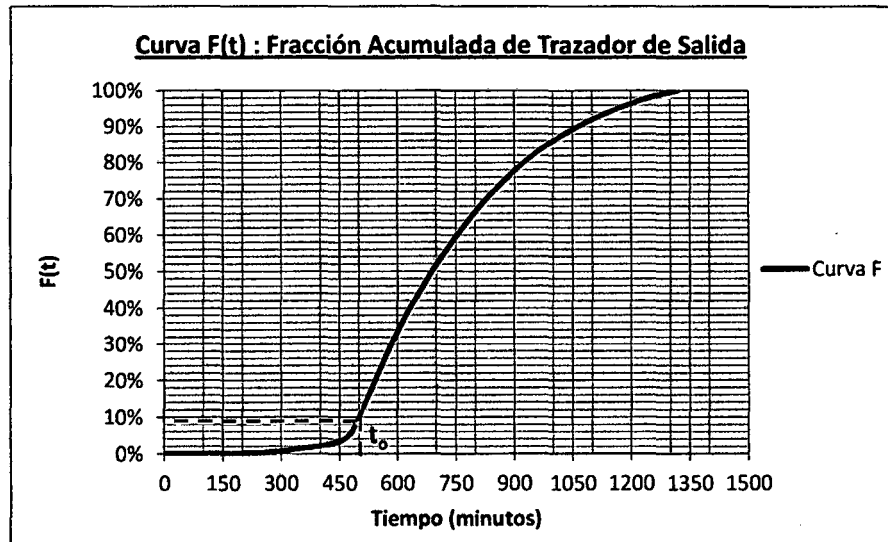
Grafico IV.64.



El Grafico IV.64. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

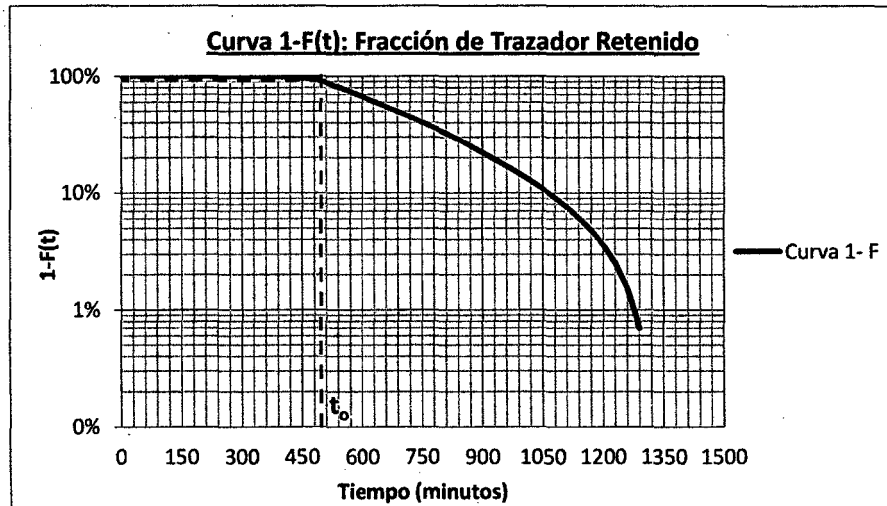
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

Grafico IV.65.



El Grafico IV.65. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 8.65% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 8.25 horas.

Grafico IV.66.



En el Grafico IV.66. que muestra la Curva 1-F(t) que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 8.25 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 91.35%.

**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 235.00 min.  
**3.92 horas**  
 $t_p$  : 515.00 min.  
**8.58 horas**  
 $t_m$  : 747.28 min.  
**12.45 horas**  
 $t_o$  : 495.27 min.  
**8.25 horas**  
 $t_c$  : 346.77 min.  
**5.78 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 12.45 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 12.45 horas

$$t_i/t_o = 0.47$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.51$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.04$$

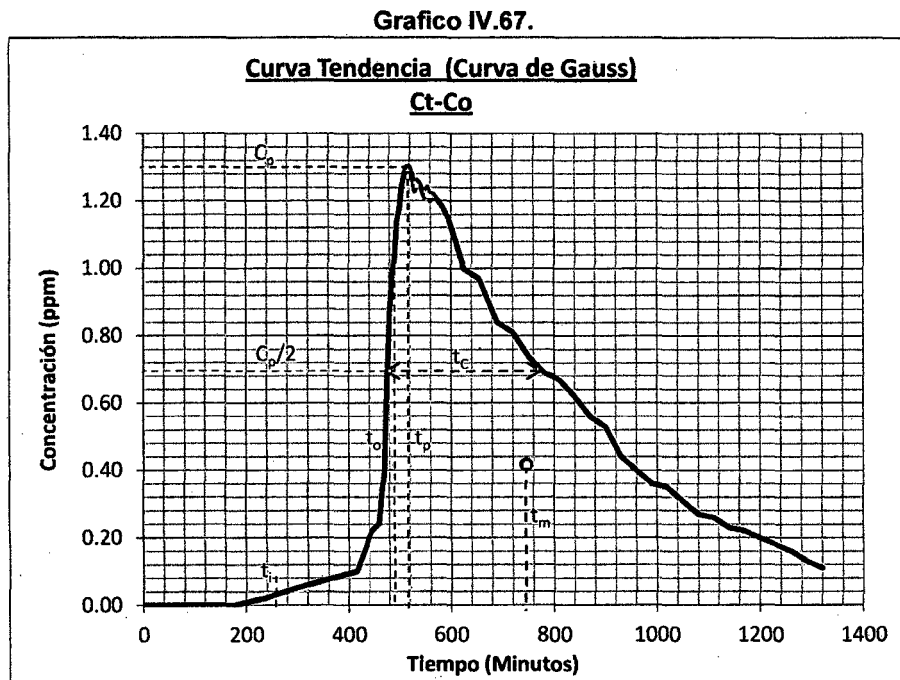
El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

$$t_c/t_o = 0.70$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indicada:

El tiempo medio de retención es 12.45 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

**I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK**

Del Grafico IV.68. se encuentra que :

$$\theta = 1.050$$

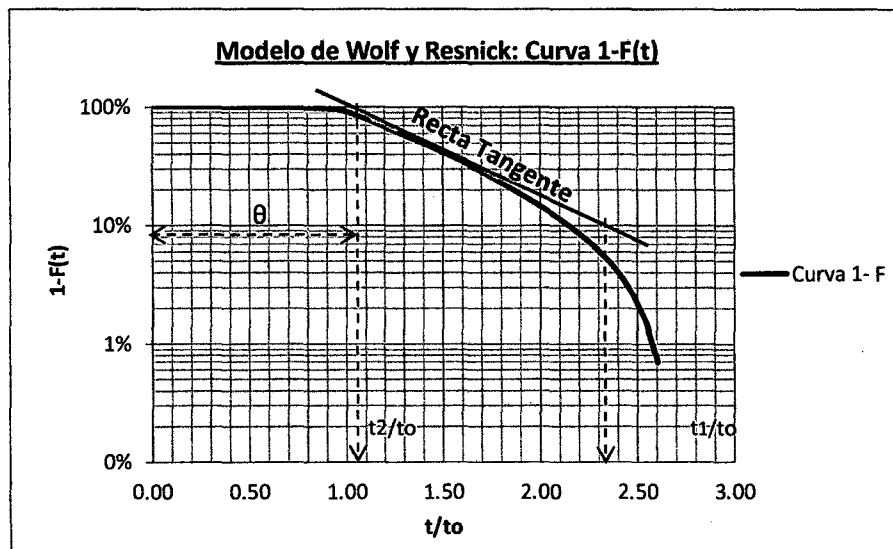
Además:

$$t_1/t_0 = 2.320$$

$$t_2/t_0 = 1.050$$

$$\tan \alpha = 0.787$$

Grafico IV.68.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 65.56\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -60.15\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 34.44\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 65.56% y flujo mezclado 34.44% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -60.15 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**  
**1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 747.28 \text{ min.}$$

$$t_m = 12.45 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{24932776.46 \text{ min}^3}{518.69 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 13.35 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.0861$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.0861$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0451 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

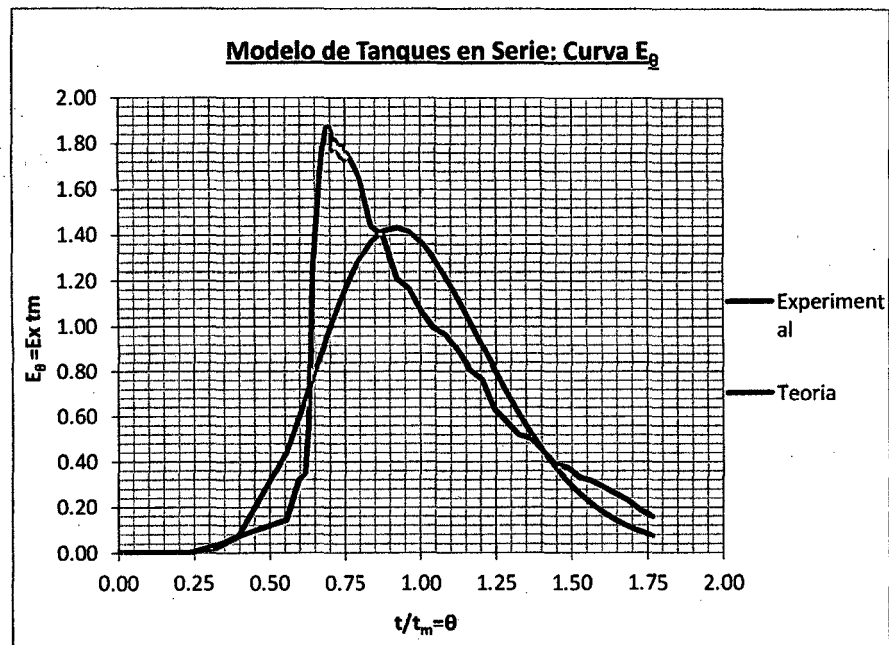
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 12$$

Grafico IV.69.



El Grafico IV.69. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial y final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

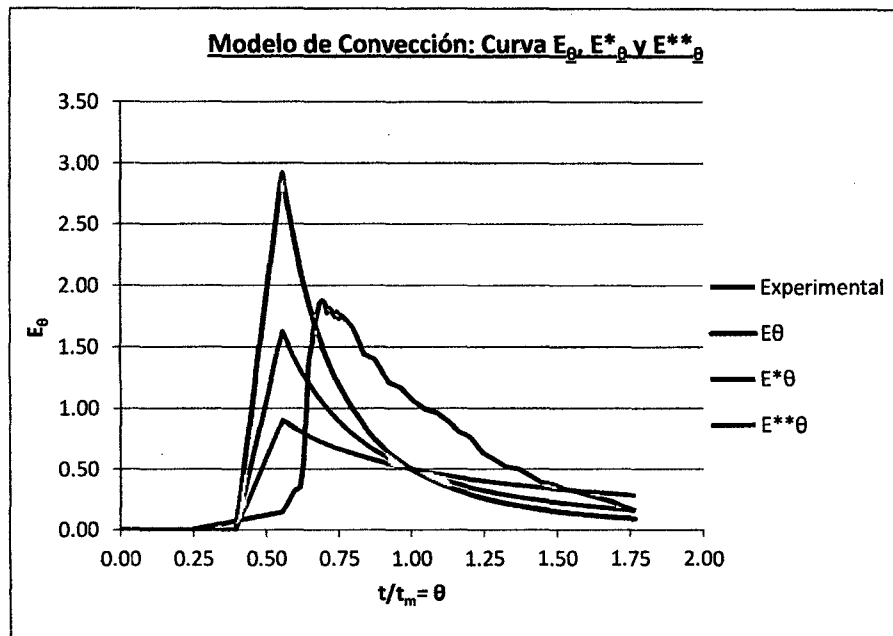
### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3}$ para $\theta \geq \frac{1}{2}$	Entrada Flux, Salida Flux
$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2}$ para $\theta \geq \frac{1}{2}$	Entrada Flux, Salida Plano
$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta}$ para $\theta \geq \frac{1}{2}$	Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \text{ Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.70.



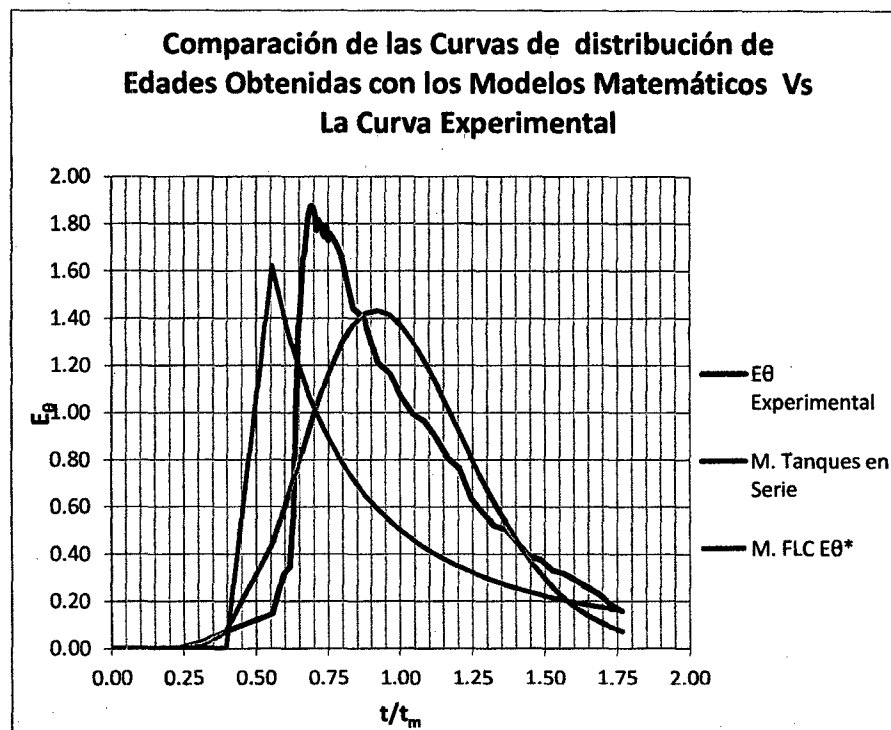
Del Grafico IV.70. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.



### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.71.



Del Grafico IV.71. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°07, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la alplitud. El ancho de la curva se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**h) Ensayo de Trazadores con NaCl N°08**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°08 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 08  
 Fecha : 02/01/11  
 T° Ambiental : 19°C / 29°C  
 T° Agua : 19.5°C / 25.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 1.16 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.61 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 10.52 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.61 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.45 horas <> 446.73 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

#### Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.16.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°08 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.16	1.16	4.90	21.0	24.0
07:50	20	1.16	1.16	3.69	21.5	25.0
08:30	60	1.19	1.18	3.66	23.0	25.0
09:30	120	1.20	1.20	3.68	23.0	25.0
10:30	180	1.23	1.22	3.67	23.0	26.0
11:30	240	1.24	1.24	3.61	23.0	26.0
12:30	300	1.24	1.27	3.67	24.0	26.0
13:30	360	1.24	1.31	3.66	24.0	26.5
14:10	400	1.26	1.36	3.70	24.0	26.5
14:30	420	1.26	1.40	3.70	24.0	26.5
14:55	445	1.27	1.61	3.59	24.0	27.0
15:10	460	1.27	1.87	3.60	24.5	27.0
15:20	470	1.27	2.13	3.61	24.5	27.0
15:25	475	1.27	2.41	3.60	24.5	26.0
15:30	480	1.27	2.46	3.60	24.5	27.0
15:35	485	1.27	2.48	3.59	24.5	28.0
15:40	490	1.27	2.47	3.58	25.0	28.0

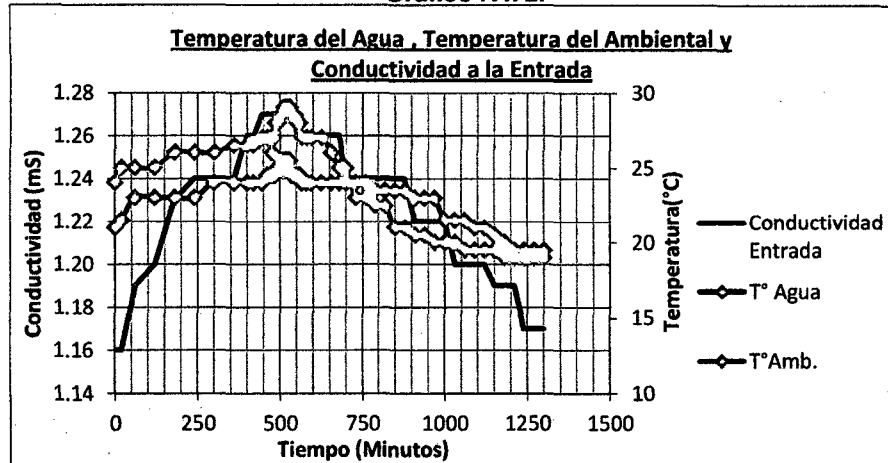
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.16.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:45	495	1.27	2.46	3.58	25.0	28.0
15:50	500	1.27	2.44	3.57	25.0	28.5
15:55	505	1.27	2.45	3.53	25.5	28.5
16:00	510	1.27	2.43	3.49	25.5	29.0
16:05	515	1.27	2.39	3.46	25.5	29.0
16:10	520	1.27	2.37	3.42	25.5	29.0
16:15	525	1.27	2.36	3.45	25.5	29.0
16:20	530	1.27	2.35	3.42	25.5	29.0
16:25	535	1.27	2.34	3.45	24.5	28.5
16:30	540	1.27	2.34	3.40	24.5	28.5
16:35	545	1.27	2.33	3.44	24.5	28.5
16:40	550	1.26	2.33	3.47	24.5	28.0
16:45	555	1.26	2.32	3.50	24.5	28.0
16:50	560	1.26	2.28	3.53	24.5	28.0
16:55	565	1.26	2.25	3.51	24.0	27.0
17:10	580	1.26	2.21	3.46	24.0	27.0
17:25	595	1.26	2.11	3.44	24.0	27.0
17:55	625	1.26	2.02	3.53	24.0	27.0
18:25	655	1.26	1.95	3.58	24.0	26.0
18:50	680	1.26	1.91	3.49	24.0	25.0
19:10	700	1.24	1.88	3.42	24.0	25.0
19:40	730	1.24	1.83	3.63	24.0	23.0
20:10	760	1.24	1.76	3.52	24.0	23.0
20:40	790	1.24	1.73	3.63	23.5	22.5
21:10	820	1.24	1.70	3.68	23.5	22.5
21:40	850	1.24	1.66	3.64	23.5	21.0
22:10	880	1.24	1.62	3.62	23.5	21.0
22:40	910	1.22	1.59	3.63	23.0	20.5
23:10	940	1.22	1.56	3.62	23.0	20.5
23:40	970	1.22	1.52	3.64	23.0	20.0
00:10	1000	1.22	1.49	3.47	21.5	20.0
00:40	1030	1.20	1.46	3.49	21.5	20.0
01:10	1060	1.20	1.41	3.53	21.5	19.5
01:40	1090	1.20	1.39	3.57	21.0	19.5
02:10	1120	1.20	1.36	3.63	21.0	19.5
02:40	1150	1.19	1.33	3.67	20.5	19.5
03:10	1180	1.19	1.31	3.49	20.0	19.0
03:40	1210	1.19	1.29	3.54	19.5	19.0
04:10	1240	1.17	1.27	3.58	19.5	19.0
04:40	1270	1.17	1.25	3.69	19.5	19.0
05:10	1300	1.17	1.25	3.49	19.5	19.0

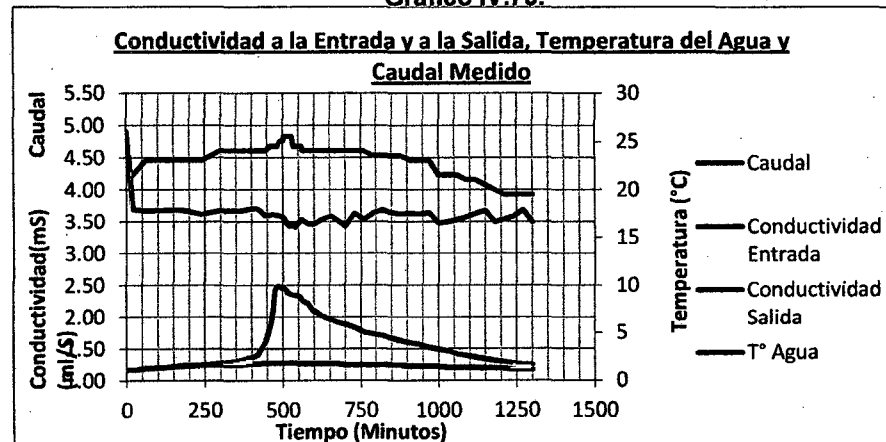
**F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

**Grafico IV.72.**



En el Grafico IV.72. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varía de forma directa con la temperatura del agua, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

**Grafico IV.73.**



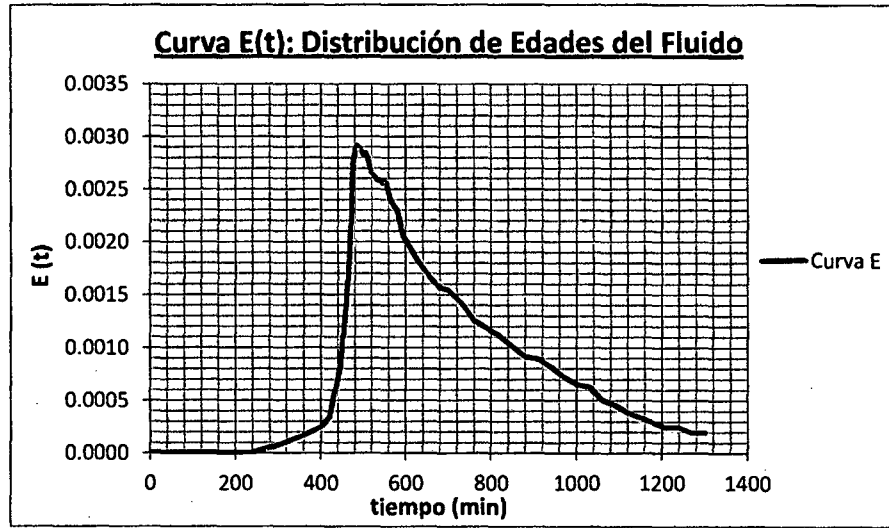
En el Grafico IV.73. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varía a lo largo de la prueba, la temperatura es más elevada para  $t=500$  min.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

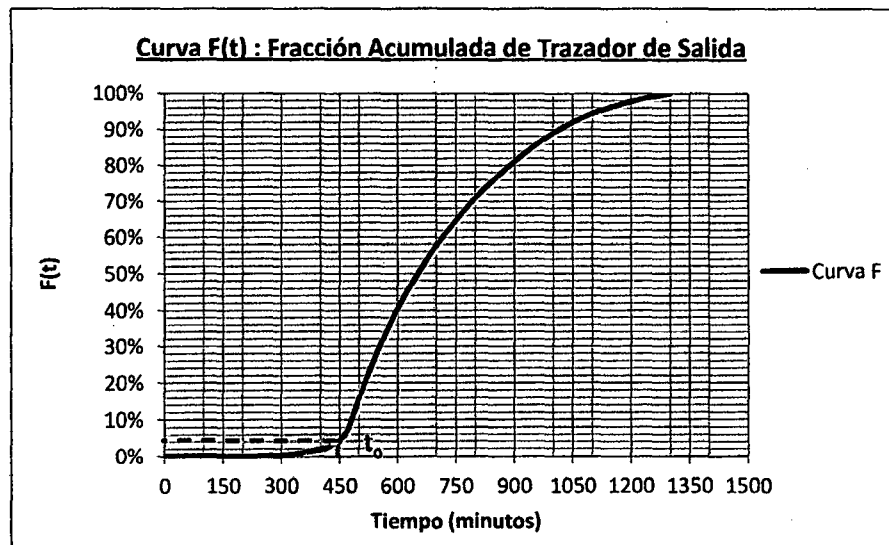
Grafico IV.74.



El Grafico IV.74. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

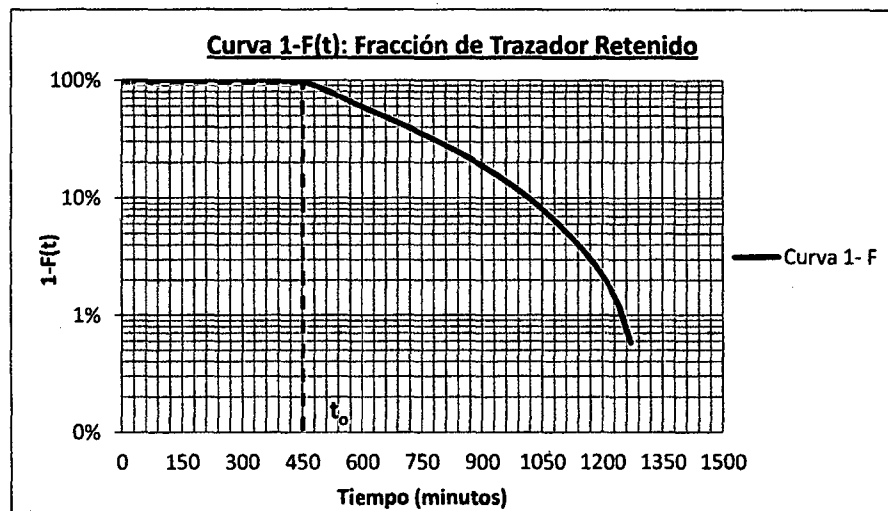
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

Grafico IV.75.



El Grafico IV.75. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 3.98% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.45 horas.

Grafico IV.76.



En el Grafico IV.76. que muestra la Curva 1-F(t) que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.45 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 96.02%.



**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 300.00 min.  
**5.00 horas**  
 $t_p$  : 485.00 min.  
**8.08 horas**  
 $t_m$  : 712.92 min.  
**11.88 horas**  
 $t_o$  : 446.73 min.  
**7.45 horas**  
 $t_c$  : 260.81 min.  
**4.35 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 11.88 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 11.88 horas

$$t_i/t_o = 0.67$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.60$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.09$$

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

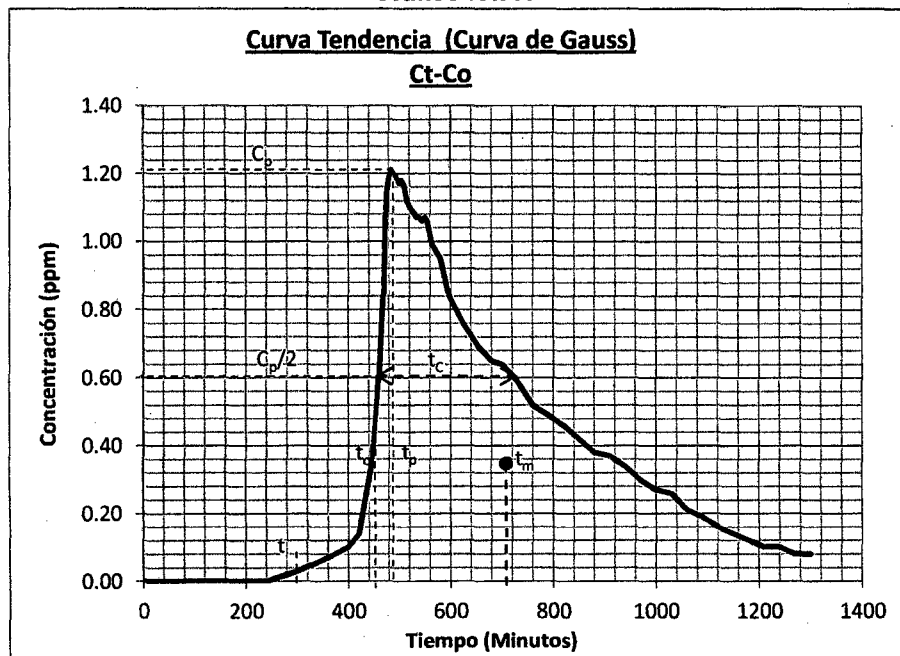
$$t_c/t_o = 0.58$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 11.88 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.77.



### I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.78. se encuentra que :

$$\theta = 1.020$$

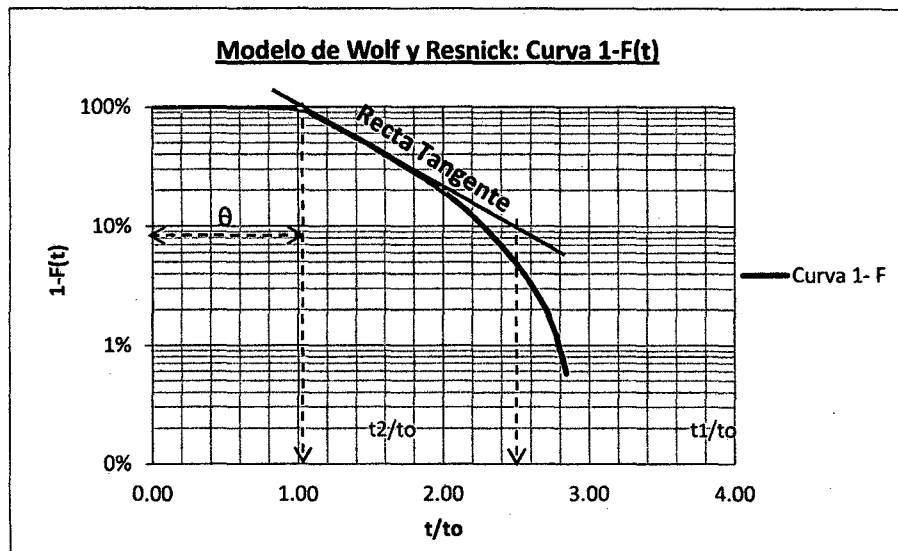
Además:

$$t_1/t_0 = 2.500$$

$$t_2/t_0 = 1.020$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.676$$

Grafico IV.78.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 61.34\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -66.27\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 38.66\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 61.34% y flujo mezclado 38.66% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -66.27 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ):

$$t_m = 712.92 \text{ min.}$$

$$t_m = 11.88 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{18750125.89 \text{ min}^3}{414.975 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 12.55 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.0889$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.0888$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0466 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a 0.01.}$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

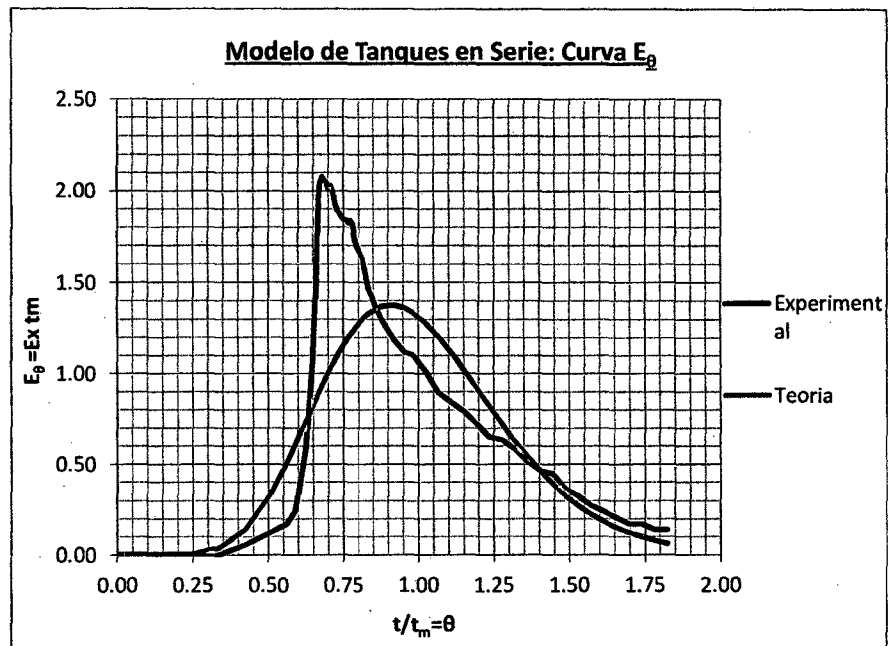
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 11$$

Grafico IV.79.



El Grafico IV.79. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial y final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

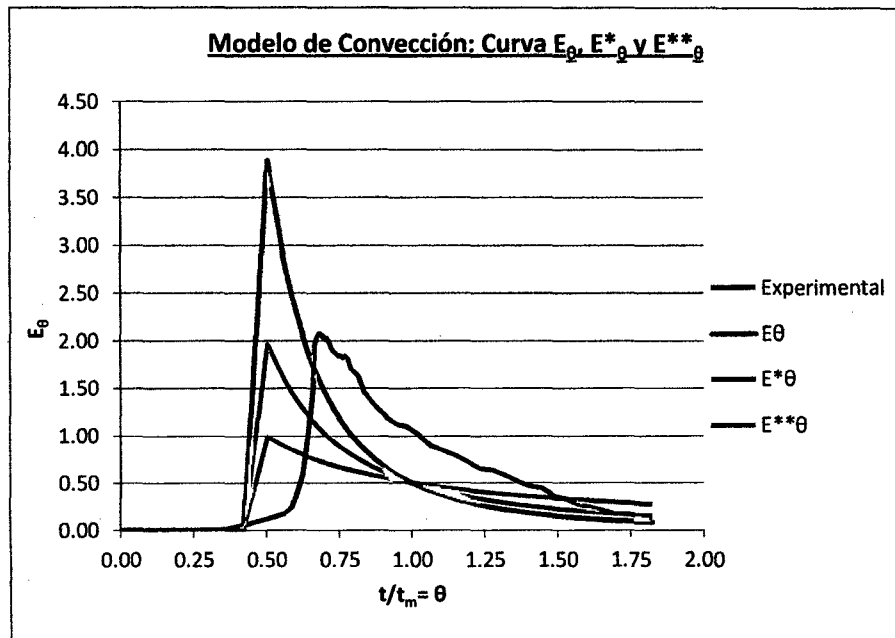
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.80.

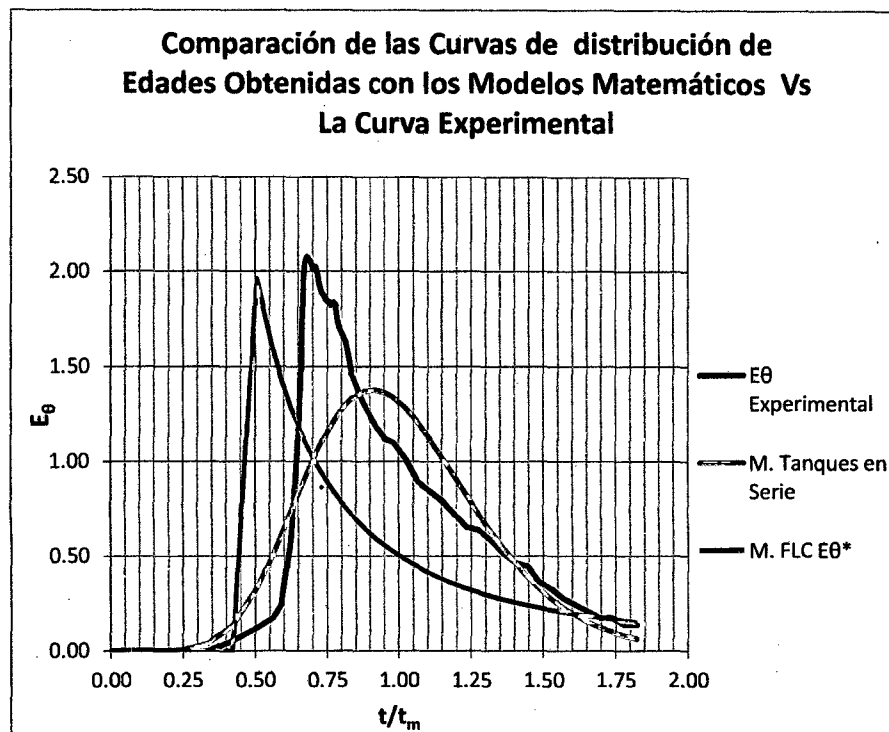


Del Grafico IV.80. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

**Grafico IV.81.**



Del Grafico IV.81. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°08, además se observa que el comportamiento de la curva experimental se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, respecto a la amplitud. El ancho de la curva se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**i) Ensayo de Trazadores con NaCl N°09**



**ENSAYO DE TRAZADORES N°09 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 09  
Fecha : 04/01/11  
T° Ambiental : 19°C / 30.5°C  
T° Agua : 19.5°C / 28°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
W de NaCl : 100.00 gr  
Volumen de : 3000.00 ml  
agua  
Concentración  
[ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
[ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
Conductividad : 1.17 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto:  
Qp : 3.33 ml/s  
Equivalente en el UASB-UNITRAR  
Qp : 9.69 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
Caudal : 3.33 ml/s  
Promedio  
To : 8.08 horas <> 484.67 min.

### **E. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de: Conductividad en la entrada y en la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los procedimientos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv). "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III. "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Co	: Conductividad medida a la entrada. (mS)
Ct	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T° Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T° Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.17.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°09 CON NaCl**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:30	0	1.17	1.17	4.55	21.5	24.0
07:50	20	1.17	1.17	3.32	22.0	25.0
08:30	60	1.23	1.18	3.34	25.0	27.0
09:30	120	1.24	1.19	3.28	25.0	27.0
10:30	180	1.24	1.21	3.33	25.0	27.0
11:30	240	1.24	1.24	3.31	24.5	27.0
12:30	300	1.25	1.26	3.37	25.0	27.0
13:30	360	1.26	1.27	3.36	26.0	28.0
14:10	400	1.26	1.29	3.38	26.0	28.0
14:30	420	1.26	1.32	3.36	26.0	28.5
14:55	445	1.27	1.36	3.31	25.0	28.5
15:10	460	1.27	1.47	3.27	25.0	29.0
15:20	470	1.27	1.71	3.25	26.0	29.0
15:25	475	1.27	1.91	3.25	26.0	29.0
15:30	480	1.27	2.22	3.26	26.0	29.0
15:35	485	1.27	2.25	3.26	26.5	29.0
15:40	490	1.27	2.31	3.26	27.0	29.5
15:45	495	1.27	2.46	3.27	27.0	29.5
15:50	500	1.27	2.55	3.27	27.0	29.0

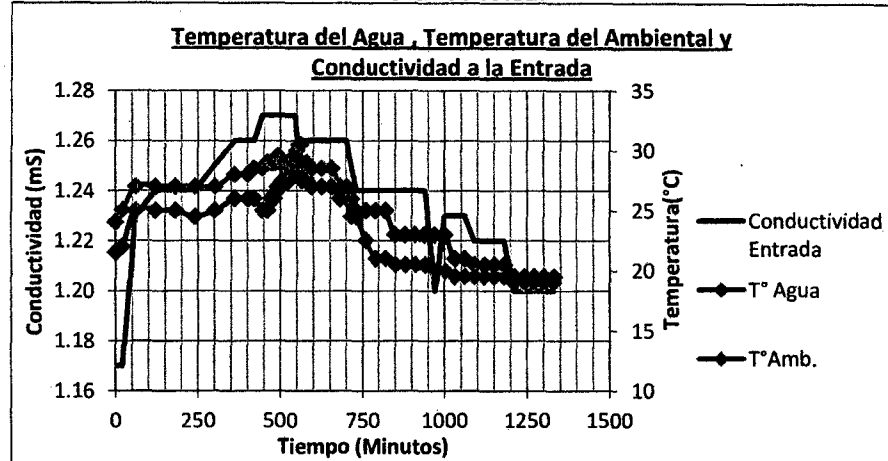
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.17.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	Co (mS) (3)	Ct (mS) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
15:55	505	1.27	2.57	3.26	27.5	29.0
16:00	510	1.27	2.59	3.26	27.5	29.0
16:05	515	1.27	2.61	3.25	27.5	28.5
16:10	520	1.27	2.62	3.24	27.5	28.5
16:15	525	1.27	2.57	3.24	27.5	28.5
16:20	530	1.27	2.53	3.23	28.0	29.0
16:25	535	1.27	2.54	3.25	28.0	29.0
16:30	540	1.27	2.53	3.26	28.0	29.5
16:35	545	1.27	2.53	3.28	28.0	29.5
16:40	550	1.26	2.46	3.29	28.0	30.0
16:45	555	1.26	2.42	3.31	28.0	30.5
16:50	560	1.26	2.38	3.32	28.0	30.5
16:55	565	1.26	2.37	3.31	27.5	29.0
17:10	580	1.26	2.35	3.29	27.5	29.0
17:25	595	1.26	2.30	3.28	27.0	28.5
17:55	625	1.26	2.28	3.30	27.0	28.5
18:25	655	1.26	2.19	3.32	27.0	28.5
18:50	680	1.26	2.11	3.30	26.0	27.0
19:10	700	1.26	2.08	3.29	26.0	27.0
19:25	715	1.25	1.99	3.33	26.0	24.5
19:40	730	1.24	1.97	3.33	25.0	24.5
20:10	760	1.24	1.90	3.36	25.0	22.5
20:40	790	1.24	1.84	3.28	25.0	21.0
21:10	820	1.24	1.79	3.29	25.0	21.0
21:40	850	1.24	1.73	3.34	23.0	20.5
22:10	880	1.24	1.68	3.32	23.0	20.5
22:40	910	1.24	1.62	3.35	23.0	20.5
23:10	940	1.24	1.53	3.33	23.0	20.5
23:40	970	1.20	1.47	3.28	23.0	20.0
00:10	1000	1.23	1.42	3.32	23.0	20.0
00:40	1030	1.23	1.39	3.27	21.0	19.5
01:10	1060	1.23	1.35	3.35	21.0	19.5
01:40	1090	1.22	1.31	3.31	20.5	19.5
02:10	1120	1.22	1.30	3.27	20.5	19.5
02:40	1150	1.22	1.29	3.36	20.5	19.5
03:10	1180	1.22	1.28	3.33	20.5	19.5
03:40	1210	1.20	1.27	3.35	19.5	19.0
04:10	1240	1.20	1.26	3.27	19.5	19.0
04:40	1270	1.20	1.26	3.29	19.5	19.0
05:10	1300	1.20	1.25	3.33	19.5	19.0
05:40	1330	1.20	1.25	3.31	19.5	19.0

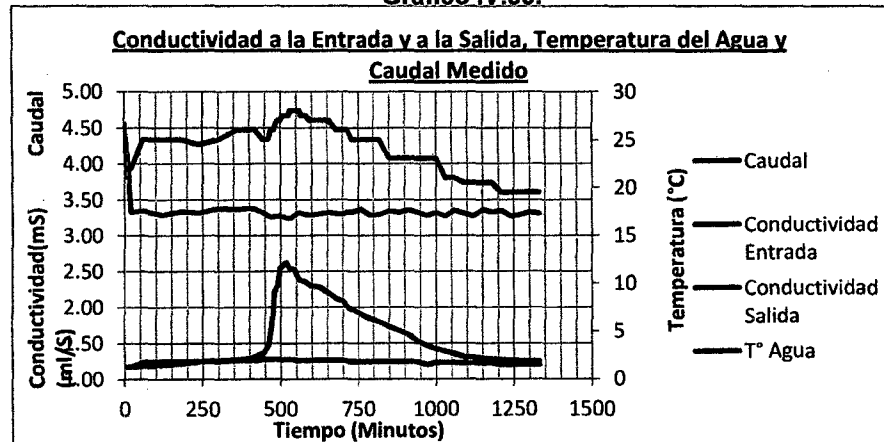
**F. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

**Grafico IV.82.**



En el Grafico IV.82. se observa que la variación de la temperatura del agua es menor que la variación de la temperatura del ambiente. La conductividad de entrada varia de forma directa con la temperatura del agua, por lo que se tendrá en cuenta la conductividad en la entrada para determinar el incremento de conductividad en la salida del reactor piloto.

**Grafico IV.83.**



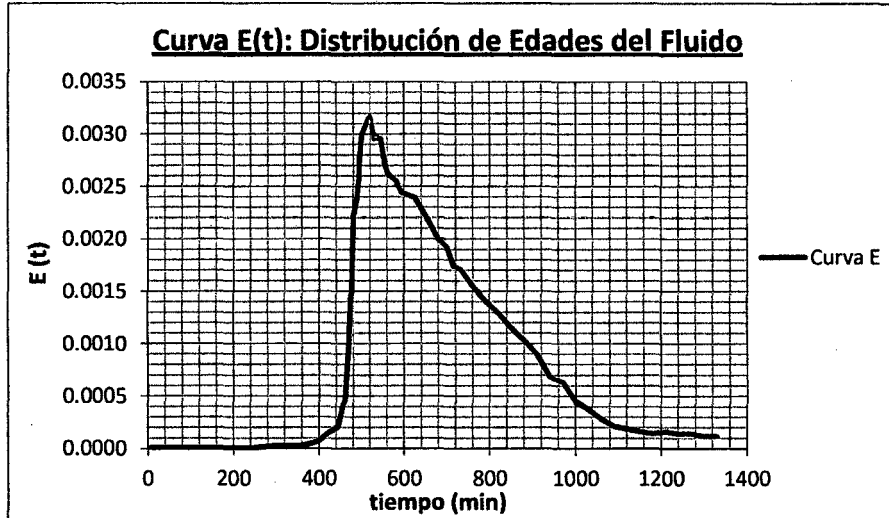
En el Grafico IV.83. al inicio el caudal es mayor debido a la inyección del trazador, posteriormente este se estabiliza y se mantiene constante. La conductividad mantiene un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones, además la curva de conductividad presenta una rama descendente alargada.

La temperatura del agua varia a lo largo de la prueba, la temperatura es más elevada para  $t=520$  min.

**G. CURVA E, F y 1-F**

**Curva E: Distribución de Edades del Fluido**

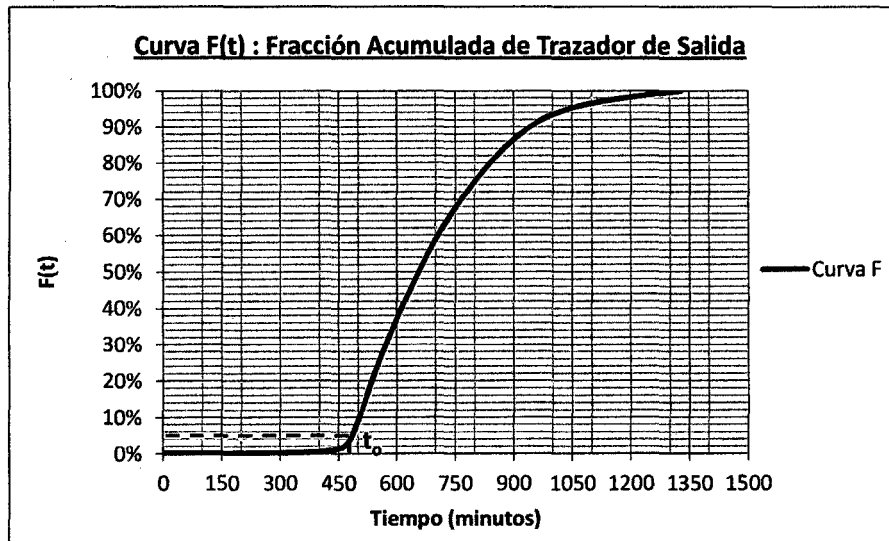
**Grafico IV.84.**



El Grafico IV.84. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido, que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

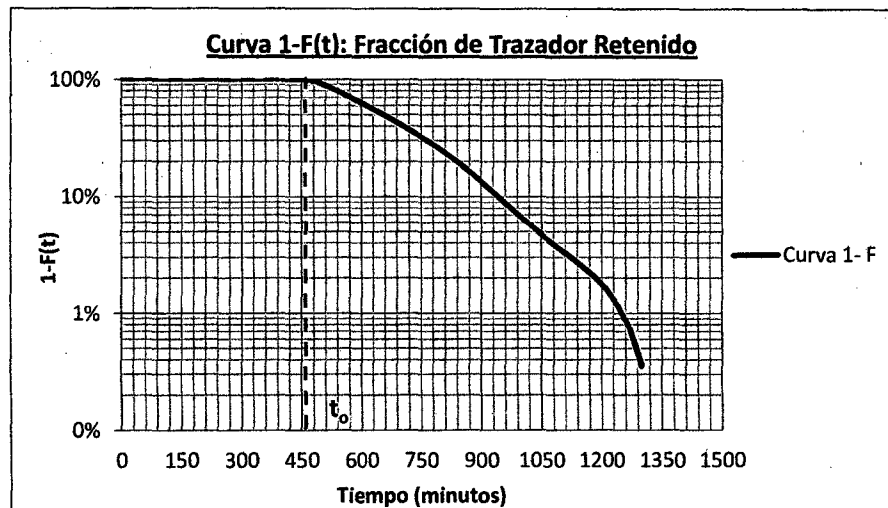
**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido**

**Grafico IV.85.**



El Grafico IV.85. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 4.93% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 8.08 horas.

Grafico IV.86.



En el Grafico IV.86. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 8.08 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 95.07%.

**H. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)****Parámetros :**

$t_i$  : 300.00 min.  
**5.00 horas**  
 $t_p$  : 520.00 min.  
**8.67 horas**  
 $t_m$  : 705.68 min.  
**11.76 horas**  
 $t_o$  : 484.67 min.  
**8.08 horas**  
 $t_c$  : 278.00 min.  
**4.63 horas**

**Análisis del Flujo :****CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 11.76 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 11.76 horas

$$t_i/t_o = 0.62$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 1.46$$

El valor de  $t_m/t_o$  igual a 1.47 es mayor a 1, debido a la presencia de zonas muertas donde el trazador es retenido para luego salir lentamente, alargando la cola de la rama descendente y al fenómeno de difusión del trazador.

$$t_p/t_o = 1.07$$

El valor de  $t_p/t_o$  cercano a 1 y  $t_i/t_o$  mayor a 0.5, indica predominio del flujo pistón.

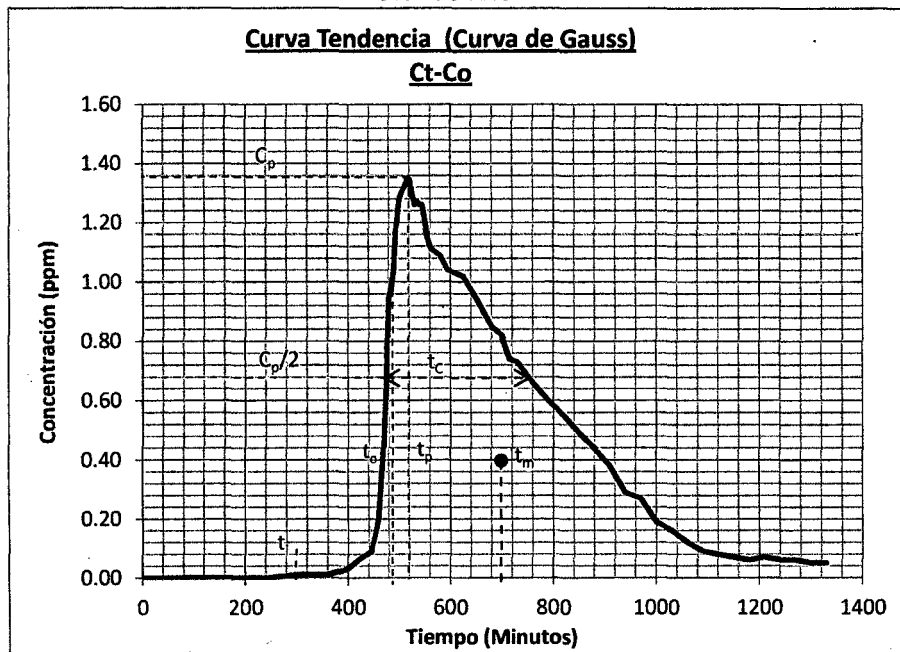
$$t_c/t_o = 0.57$$

El valores de  $t_c/t_o$  indican que el trazador tiene un alto grado de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones mencionadas se indica:

El tiempo medio de retención es 11.76 horas y el tiempo de retención teórico son lejanos, puede deberse a la existencia de zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la gráfica, desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha. El flujo predominante es flujo pistón y, además no hay presencia de grandes corotcircuitos.

Grafico IV.87.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_0$  : tiempo de retención teórico.



**I. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK**

Del Grafico IV.88. se encuentra que :

$$\theta = 1.050$$

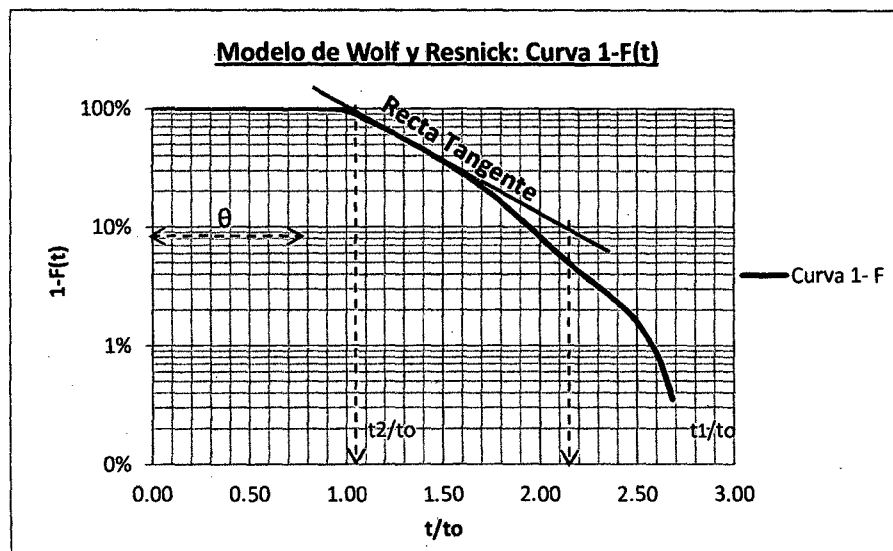
Además:

$$t_1/t_0 = 2.150$$

$$t_2/t_0 = 1.050$$

$$\text{Tan } \alpha = 0.909$$

Grafico IV.88.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 68.73\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -52.77\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 31.27\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 68.73% y flujo mezclado 31.27% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -52.77 %).

**J. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**  
**1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ):

$$t_m = 705.68 \text{ min.}$$

$$t_m = 11.76 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{14296146.27 \text{ min}^3}{426.5 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 9.31 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.0673$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\frac{uL}{D}})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.0674$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0349$$

El valor de D/uL es mayor a 0.01.

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

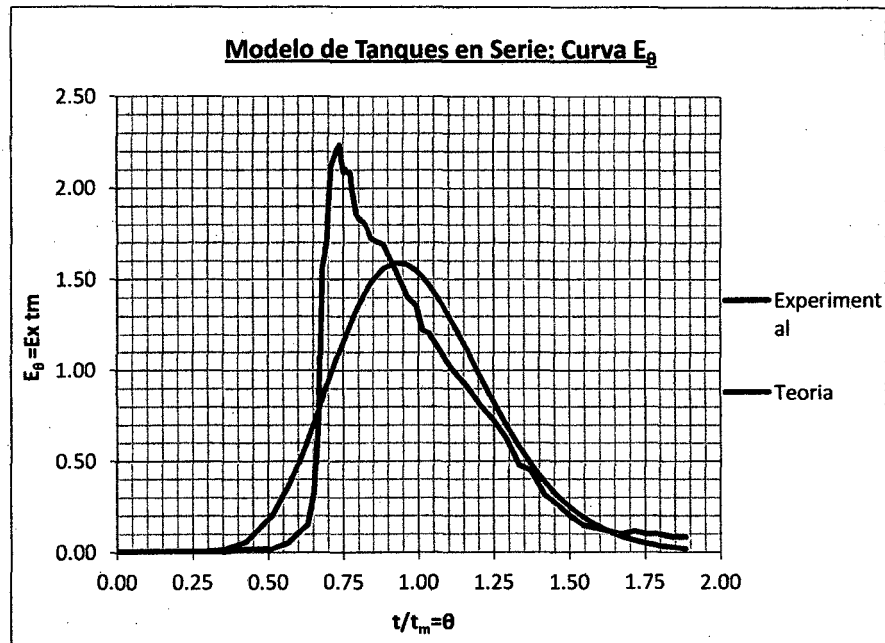
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 15$$

Grafico IV.89.



El Grafico IV.89. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte inicial y final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte intermedia, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

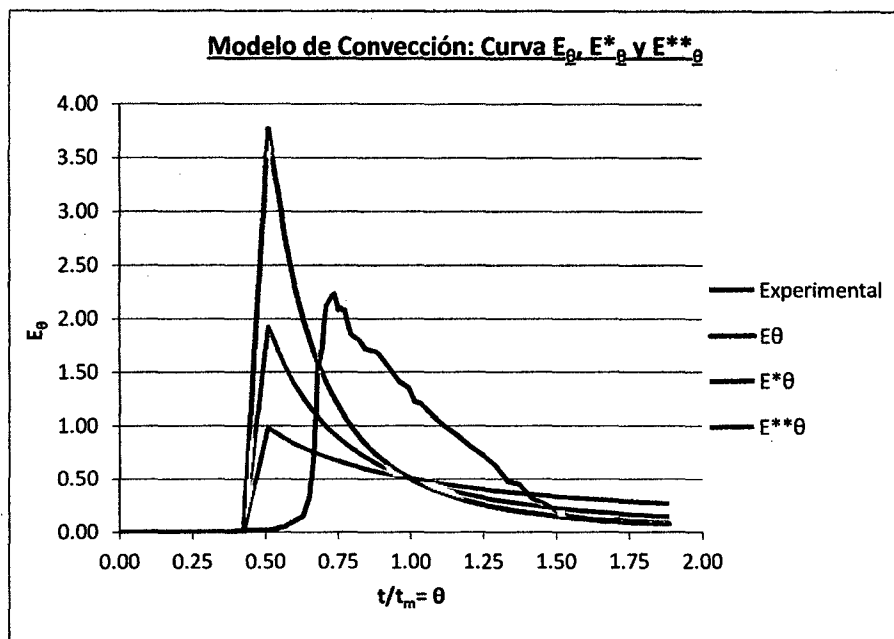
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.90.

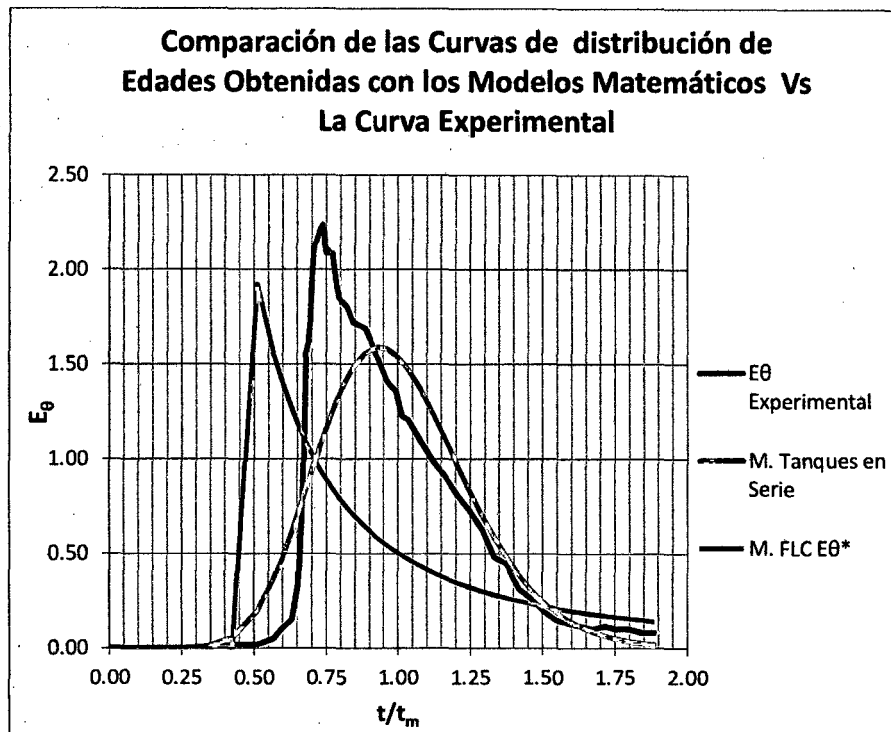


Del Grafico IV.90. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### K. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

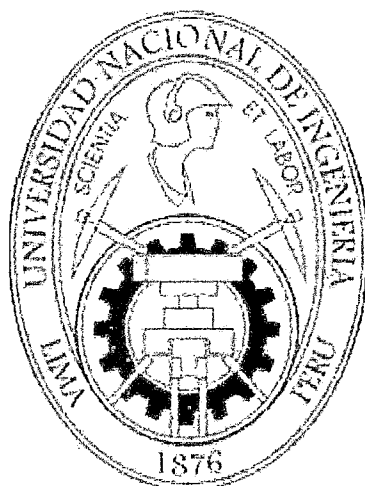
Grafico IV.91.



Del Grafico IV.91. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°09, además se observa que el comportamiento de la curva experimental en el tramo ascendente se asemeja en mayor grado al modelo de Convección para Flujo Laminar, mientras que en el tramo descendente se asemeja a la curva del modelo de Tanques en Serie.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“ENSAYOS DE TRAZADORES EN LA DETERMINACIÓN  
DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN REACTOR  
ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE  
LODO A NIVEL DE PLANTA PILOTO”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO SANITARIO**

**PRESENTADO POR:**

**ESPINOZA MEZA, JAKELIN VANESSA  
MORI ALVAREZ, FERNANDO**

**TOMO II**

**LIMA, PERÚ**

**AÑO 2011**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

## **2. ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl EN PRESENCIA DE MANTO DE LODOS.**

Estos ensayos se realizaron en el reactor piloto UASB con presencia de manto de lodos que simula las condiciones de operación de un reactor UASB con características similares al UASB-UNITRAR.

La altura del manto de lodos elegida está en función de la altura del manto de lodos del reactor UASB-UNITRAR en operación, de entre 2.50 y 2.75 metros de altura, siendo su equivalente, en el reactor piloto UASB, una altura promedio de 18cm con variación entre 17.5 y 19 cm.

Para fines de comparación de la influencia de la distribución y acomodamiento del manto de lodos en el comportamiento hidráulico, se realizaron cinco (05) ensayos de trazadores en presencia de manto de lodos, en los que el primer ensayo de esta sección (Ensayo de Trazadores con NaCl N°10) se realizó en presencia de un manto de lodos, que luego fue removido y reemplazado para el segundo (Ensayo de Trazadores con NaCl N°11) y tercer ensayo de esta sección (Ensayo de Trazadores con NaCl N°12), que a su vez fue removido y reemplazado para el cuarto (Ensayo de Trazadores con NaCl N°13) y quinto ensayo de esta sección (Ensayo de Trazadores con NaCl N°14), obteniendo así cinco (05) ensayos de trazadores agrupados en tres (03) acomodamientos diferentes del manto de lodos.

Los ensayos de trazadores de este grupo y los caudales promedios utilizados en cada uno se muestran a continuación:

- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 10 con  $Q_p = 4.03$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 11 con  $Q_p = 3.46$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 12 con  $Q_p = 3.38$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 13 con  $Q_p = 3.53$  ml/s
- Ensayo de Trazadores con NaCl N° 14 con  $Q_p = 3.41$  ml/s

**a) Ensayo de Trazadores con NaCl N°10**



**ENSAYO DE TRAZADORES N°10 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

El ensayo de trazadores N°10 se realizo con trazador tipo NaCl el 7/1/2011, iniciando a las 7:37 horas correspondiente a la aplicación del trazador de manera puntual y finalizando a las 21:00 horas con la ultima medición realizada.

A continuacion se muestra el resumen con los rangos de temperatura que se presentaron durante el ensayo.

Ensayo N° : 10  
Fecha : 07/01/2011  
T° Ambiental : 18°C / 32°C  
T° Agua : 23°C / 31°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

El trazador utilizado en el Ensayo de Trazadores N°10 es el NaCl. La preparación del trazador es 100 gr de NaCl (sal comun) diluido en 3 litros de agua con conductividad 3.66ms, resultando una mezcla con 33333 ppm de concentración y 47.27ms de conductividad.

**Trazador** : NaCl  
W de NaCl : 100.00 gr  
Volumen de : 3000.00 ml  
agua  
Concentración  
[] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
[] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
Conductividad : 3.66 ms

### **C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

Durante el Ensayo de Trazadores N°10 se obtuvo un caudal promedio de 4.03 ml/s, equivalente a 11.74 l/s en el reactor UASB-UNITRAR (calculado con el factor de escala 7:100), con mínimos de 3.81 ml/s y máximos de 5.56 ml/s.

En la planta piloto.

Qp : 4.03 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 11.74 l/s

### **D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

La determinación del Tiempo de Retención Teórico, se realizó en base al caudal promedio medido durante el ensayo y al volumen útil determinado en el Capítulo IV - B. "Determinación del Volumen Útil en el Reactor", según lo indicado en la sección B - 1. "Tiempo de Retención" en el Marco Teórico.

Volumen Útil : 96.70 L

Caudal : 4.03 ml/s

Promedio

To : 6.67 horas  $\leftrightarrow$  400.24 min.

### **E. CARACTERIZACION DEL MANTO DE LODOS**

La altura del manto de lodos utilizado en el Ensayo de Trazadores N°10 es de 16.44 cm, equivalente a 2.35 m de altura en el UASB-UNITRAR, el manto de lodos fue colocado de manera manual y buscando una altura homogénea.

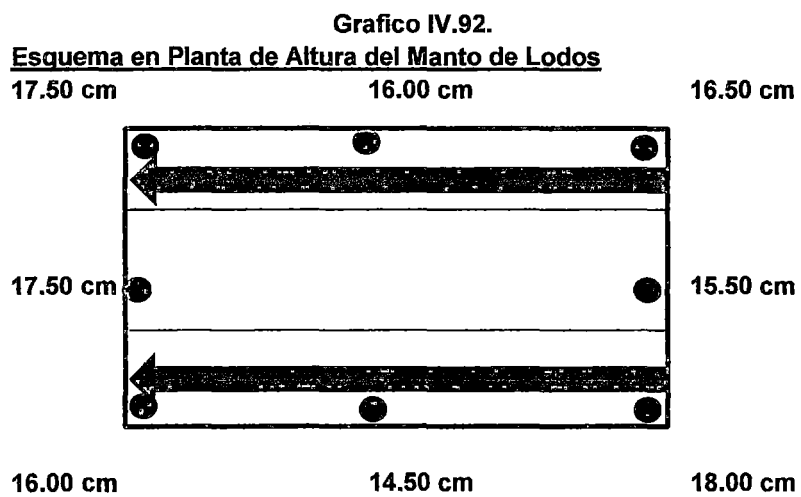
Altura : 16.44 cm

Promedio

Volumen del : 50.52 L

Manto

Se observó que el volumen del manto de lodos corresponde a más del 50% del volumen útil del reactor.



Donde :

● Punto de medición de altura

← Sentido del Flujo en la canaleta de recolección

\* Nota: el lodo fue saturado con una solución de NaCl durante 8 horas antes del inicio de la prueba para que el trazador no sea absorbido por el lodo y cause interferencias en el ensayo.

## **F. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de conductividad y concentración de cloruros a la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los mínimos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv) "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III "Metodología".

Parámetros Medidos:

ti	: Tiempo (min)
Conduc.	: Conductividad medida a la salida. (mS)
Ct	: Concentración de cloruros a la salida (ppm)
Qi	: Caudal medido (ml/s)
T°Agua	: Temperatura del agua a la salida. (°C)
T°Amb.	: Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.18.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°10CON NaCl**

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:37	0	3.66	80.00	5.56	28.0	29.0
07:46	9	3.60	80.00	5.56	28.0	29.0
07:50	13	3.60	80.00	4.47	28.0	29.5
08:10	33	3.60	80.00	3.86	28.0	31.0
08:50	73	3.60	80.00	3.97	28.5	30.0
10:00	143	3.60	80.00	4.35	28.5	30.0
11:00	203	4.52	107.50	3.82	28.5	32.0
11:15	218	5.04	123.00	4.12	29.0	32.0
11:35	238	5.23	129.00	4.17	29.0	31.5
11:45	248	5.40	134.00	4.13	29.5	31.5
11:55	258	5.42	134.00	4.03	29.5	31.5
12:05	268	5.38	133.00	4.03	30.0	31.0
12:15	278	5.39	133.00	4.07	30.5	30.5

Continua en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.18.

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
12:25	288	5.40	134.00	4.08	30.0	29.5
12:35	298	5.27	130.00	4.17	30.5	29.0
12:50	313	5.18	127.00	3.91	30.5	29.0
13:20	343	5.02	122.00	4.09	31.0	30.0
13:50	373	4.85	117.50	3.88	31.0	30.0
14:20	403	4.73	113.50	3.96	30.5	32.0
14:45	428	4.59	109.50	3.95	30.5	30.0
15:00	443	4.70	112.75	3.97	30.5	30.0
15:30	473	4.50	106.75	3.91	30.0	29.0
16:00	503	4.42	104.50	3.93	29.5	27.0
16:30	533	4.30	100.75	3.88	29.0	26.0
17:00	563	4.17	97.00	3.94	29.0	25.5
17:30	593	4.00	92.00	3.95	29.0	23.5
18:00	623	3.97	91.00	3.81	25.5	22.0
18:30	653	3.83	87.00	3.95	25.0	21.5
19:00	683	3.80	86.00	4.02	25.0	22.0
19:30	713	3.76	84.75	4.03	24.5	21.5
20:00	743	3.73	84.00	3.95	24.5	20.0
20:30	773	3.72	83.50	4.10	23.0	18.0
21:00	803	3.70	83.00	3.97	23.0	18.0

#### **G. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

En el Grafico IV.93.se observa que la variacion de la temperatura del agua es menor que la variacion de la temperatura del ambiente. La temperatura del agua se mantuvo en el rango de 23°C / 31°C durante toda la duraci3n del ensayo.

Grafico IV.93.

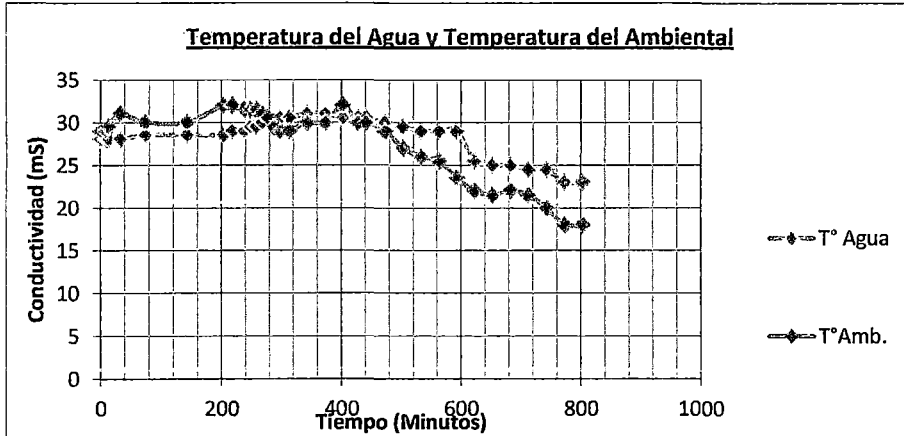
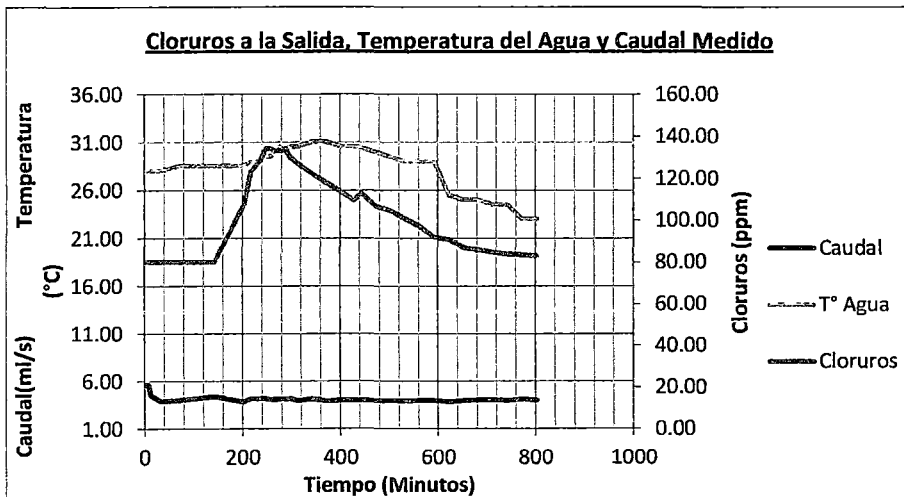


Grafico IV.94.



Del Grafico IV.94. se observa que el pico de caudal al inicio del ensayo corresponde a la aplicación del trazador, luego el caudal se mantiene constante con mínimas variaciones.

La temperatura del agua varía suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo en  $t=600$  min (5:30 pm). Los cloruros mantienen un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones como el segundo pico encontrado en  $t=400$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

## H. CURVA E, F y 1-F

Para facilitar el entendimiento y la descripción del tipo de flujo que se produce en el interior del reactor estudiado, es necesario la construcción de curvas que permitan observar la manera como se distribuye el trazador inyectado a lo largo del tiempo y además la fracción de trazador que permanece en el reactor a un determinado tiempo, estas curvas son:

- Curva E : Distribución de Edades del Fluido
- Curva F : Fracción Acumulada de Trazador de Salida
- Curva 1-F : Fracción de Trazador Retenido

### Curva E: Distribución de Edades del Fluido

De acuerdo con lo mencionado en el *Capítulo II "Marco Teórico"* en la sección E. "*Curva E, Distribución de Edad del Fluido*", para obtener la Curva E se utiliza la siguiente expresión, debido a que los intervalos de medición no son constantes.

$$E(t) = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(C_i + C_{i+1})\Delta t_i}{2}} \quad \dots \text{Columna (7)}$$

$$y \quad C_i = C_t - C_o$$

Donde:

- E(t) : Valor de la curva E para tiempo igual a "i"
- C<sub>i</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i"
- C<sub>i+1</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i+1"
- Δ t<sub>i</sub> : Intervalo de tiempo entre el tiempo "i" y el tiempo "i+1"
- C<sub>t</sub> : Concentración del trazador en el tiempo "i".
- C<sub>o</sub> : Concentración inicial del trazador.

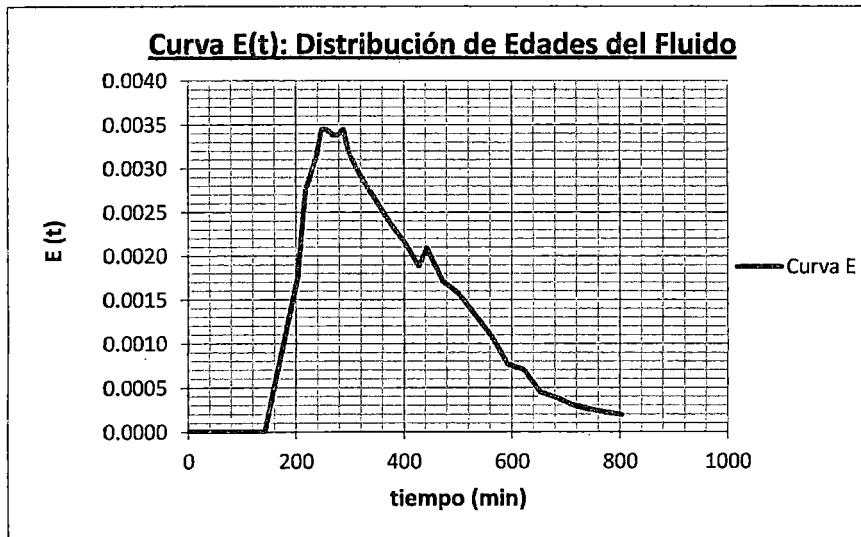
Con esta expresión, se elaboro la Tabla IV.19. con los valores de E(t) (Columna 7), que se presenta a continuación.

Tabla IV.19.  
DATOS PARA LA CURVA E(t)

Hora (1)	tiempo (min) (2)	ti/to (3)	$\Delta t$ (min) (4)	$C_i=C_t-C_o$ (5)	$(C_i+C_{i+1})/2$ $\times \Delta t$ (6)	E(t) (7)
07:37	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00E+00
07:46	9	0.02	9.00	0.00	0.00	0.00E+00
07:50	13	0.03	4.00	0.00	0.00	0.00E+00
08:10	33	0.08	20.00	0.00	0.00	0.00E+00
08:50	73	0.18	40.00	0.00	0.00	0.00E+00
10:00	143	0.36	70.00	0.00	0.00	0.00E+00
11:00	203	0.51	60.00	27.50	825.00	1.75E-03
11:15	218	0.54	15.00	43.00	528.75	2.74E-03
11:35	238	0.59	20.00	49.00	920.00	3.13E-03
11:45	248	0.62	10.00	54.00	515.00	3.44E-03
11:55	258	0.64	10.00	54.00	540.00	3.44E-03
12:05	268	0.67	10.00	53.00	535.00	3.38E-03
12:15	278	0.69	10.00	53.00	530.00	3.38E-03
12:25	288	0.72	10.00	54.00	535.00	3.44E-03
12:35	298	0.74	10.00	50.00	520.00	3.19E-03
12:50	313	0.78	15.00	47.00	727.50	3.00E-03
13:20	343	0.86	30.00	42.00	1335.00	2.68E-03
13:50	373	0.93	30.00	37.50	1192.50	2.39E-03
14:20	403	1.01	30.00	33.50	1065.00	2.14E-03
14:45	428	1.07	25.00	29.50	787.50	1.88E-03
15:00	443	1.11	15.00	32.75	466.88	2.09E-03
15:30	473	1.18	30.00	26.75	892.50	1.71E-03
16:00	503	1.26	30.00	24.50	768.75	1.56E-03
16:30	533	1.33	30.00	20.75	678.75	1.32E-03
17:00	563	1.41	30.00	17.00	566.25	1.08E-03
17:30	593	1.48	30.00	12.00	435.00	7.65E-04
18:00	623	1.56	30.00	11.00	345.00	7.02E-04
18:30	653	1.63	30.00	7.00	270.00	4.47E-04
19:00	683	1.71	30.00	6.00	195.00	3.83E-04
19:30	713	1.78	30.00	4.75	161.25	3.03E-04
20:00	743	1.86	30.00	4.00	131.25	2.55E-04
20:30	773	1.93	30.00	3.50	112.50	2.23E-04
21:00	803	2.01	30.00	3.00	97.50	1.91E-04



Grafico IV.95.



El Grafico IV.95. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido , que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

**Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F:Fracción de Trazador Retenido**

La curva  $F(t)$  representa al porcentaje acumulado de trazador que ha salido del reactor hasta el tiempo " $t$ ", mientras que la curva  $1-F(t)$  representa el porcentaje de trazador que se encuentra en el interior del reactor en el instante " $t$ ". La curva  $F(t)$  se halla sumando el área bajo la curva  $E$  entre los instantes  $t=0$  y  $t=i$ .

De acuerdo a lo indicado en la sección F. "Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F: Fracción de Trazador Retenido." *del Capítulo II "Marco Teórico"* se usa la siguiente expresión para hallar las curva  $F(t)$  y  $1-F(t)$  respectivamente.

$$F(t) = \int_0^t E dt \quad \dots \text{Columna (5)}$$

$$1-F(t) = 1 - \int_0^t E dt \quad \dots \text{Columna (6)}$$

Donde:

- F(t) : Valor de la curva F para tiempo igual a "t"  
 E : o E(t) es el valor de la curva E para tiempo igual a "t"  
 t : tiempo (min)  
 dt : diferencial de tiempo

Con estas expresiones, se elabora la siguiente tabla con los valores de F(t) (Columna 6) y 1-F(t) (Columna 7).

**Tabla IV.20.**  
**DATOS PARA LAS CURVAS F(t) y 1-F(t)**

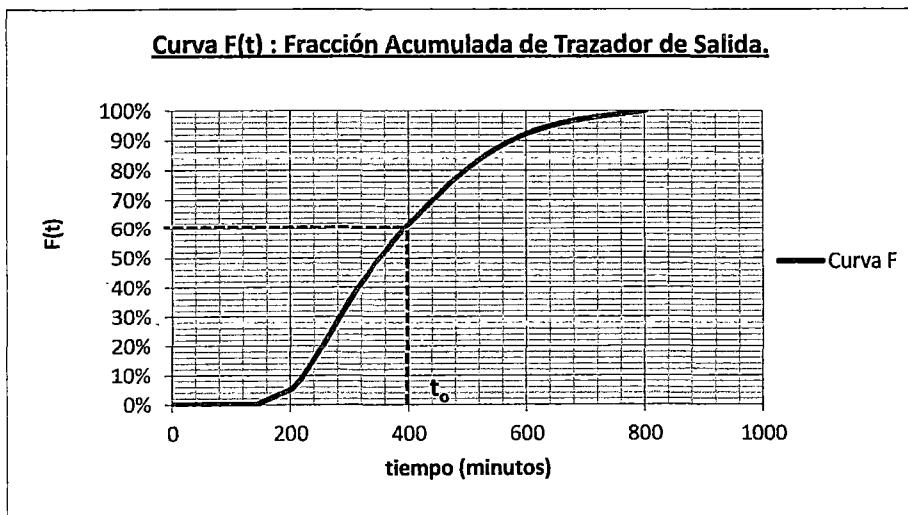
Hora (1)	tiempo (min) (2)	E(t) (3)	Δt (min) (4)	E(t)x Δt (5)	F(t) (6)	1-F(t) (7)
07:37	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00%	100.00%
07:46	9	0.00E+00	9	0.00E+00	0.00%	100.00%
07:50	13	0.00E+00	4	0.00E+00	0.00%	100.00%
08:10	33	0.00E+00	20	0.00E+00	0.00%	100.00%
08:50	73	0.00E+00	40	0.00E+00	0.00%	100.00%
10:00	143	0.00E+00	70	0.00E+00	0.00%	100.00%
11:00	203	1.75E-03	60	5.26E-02	5.26%	94.74%
11:15	218	2.74E-03	15	3.37E-02	8.64%	91.36%
11:35	238	3.13E-03	20	5.87E-02	14.50%	85.50%
11:45	248	3.44E-03	10	3.29E-02	17.79%	82.21%
11:55	258	3.44E-03	10	3.44E-02	21.23%	78.77%
12:05	268	3.38E-03	10	3.41E-02	24.65%	75.35%
12:15	278	3.38E-03	10	3.38E-02	28.03%	71.97%
12:25	288	3.44E-03	10	3.41E-02	31.44%	68.56%
12:35	298	3.19E-03	10	3.32E-02	34.76%	65.24%
12:50	313	3.00E-03	15	4.64E-02	39.40%	60.60%
13:20	343	2.68E-03	30	8.52E-02	47.91%	52.09%

Continua en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.20.

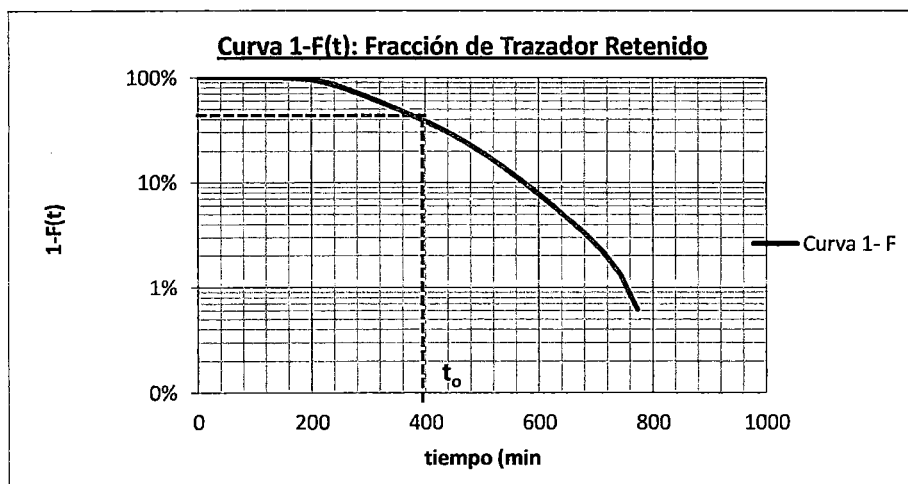
Hora (1)	tiempo (min) (2)	E(t) (3)	$\Delta t$ (min) (4)	E(t)x $\Delta t$ (5)	F(t) (6)	1-F(t) (7)
13:50	373	2.39E-03	30	7.61E-02	55.52%	44.48%
14:20	403	2.14E-03	30	6.79E-02	62.31%	37.69%
14:45	428	1.88E-03	25	5.02E-02	67.34%	32.66%
15:00	443	2.09E-03	15	2.98E-02	70.31%	29.69%
15:30	473	1.71E-03	30	5.69E-02	76.01%	23.99%
16:00	503	1.56E-03	30	4.90E-02	80.91%	19.09%
16:30	533	1.32E-03	30	4.33E-02	85.24%	14.76%
17:00	563	1.08E-03	30	3.61E-02	88.85%	11.15%
17:30	593	7.65E-04	30	2.77E-02	91.63%	8.37%
18:00	623	7.02E-04	30	2.20E-02	93.83%	6.17%
18:30	653	4.47E-04	30	1.72E-02	95.55%	4.45%
19:00	683	3.83E-04	30	1.24E-02	96.79%	3.21%
19:30	713	3.03E-04	30	1.03E-02	97.82%	2.18%
20:00	743	2.55E-04	30	8.37E-03	98.66%	1.34%
20:30	773	2.23E-04	30	7.18E-03	99.38%	0.62%
21:00	803	1.91E-04	30	6.22E-03	100.00%	0.00%

Grafico IV.96.



El Grafico IV.96. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 62.31% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 6.67 horas.

Grafico IV.97.



En el Grafico IV.97. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 6.67 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 37.69%.

## **I. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)**

En general los modelos matemáticos tratan de encontrar una expresión matemática para ajustarse al comportamiento real de la curva tendencia, la curva tendencia es la curva Concentración del Trazador (medido) Vs Tiempo, sin embargo el análisis de la curva tendencia es una herramienta que nos permite analizar la eficiencia hidráulica de un reactor, usando parámetros y relaciones entre los mismos sin la necesidad de aproximarlos a un modelo matemático. (ver G. "Análisis de la Curva Tendencia" en el Capítulo II "Marco Teórico").

### **Parámetros :**

Los parámetros para el análisis de la curva tendencia se obtienen del Grafico IV.98. Curva Tendencia , estos parámetros se presentan a continuación:

Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$$t_i : 203.00 \text{ min.}$$

$$\mathbf{3.38 \text{ horas}}$$

Tiempo modal, correspondiente a la presencia de la máxima concentración

$$t_p : 248.00 \text{ min.}$$

$$\mathbf{4.13 \text{ horas}}$$

Tiempo medio, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador.

$$t_m : 390.48 \text{ min.}$$

$$\mathbf{6.51 \text{ horas}}$$

Tiempo Teórico de Retención o Tiempo medio de retención Teórico.

$$t_o : 400.24 \text{ min.}$$

$$\mathbf{6.67 \text{ horas}}$$

Tiempo durante el cual la concentración en el efluente es mayor al 50% de la máxima concentración

$$t_c : 269.84 \text{ min.}$$

$$\mathbf{4.50 \text{ horas}}$$

**Análisis del Flujo :**

En el marco teórico indicado, se presentan algunos de los criterios para el análisis de la curva tendencia, con los cuales se realiza el siguiente análisis para este caso.

**CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 6.51 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 6.51 horas

$$t_i/t_o = 0.51$$

El valor de  $t_i/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 0.98$$

El valor de  $t_m/t_o$  es cercano a 1, lo que indica que el tiempo de retención teórico es muy parecido al tiempo de retención real.

$$t_p/t_o = 0.62$$

El valor de  $t_p/t_o$  es 0.62, indica que la mayor concentración a la salida del reactor se presenta aproximadamente al 60% del tiempo teórico.

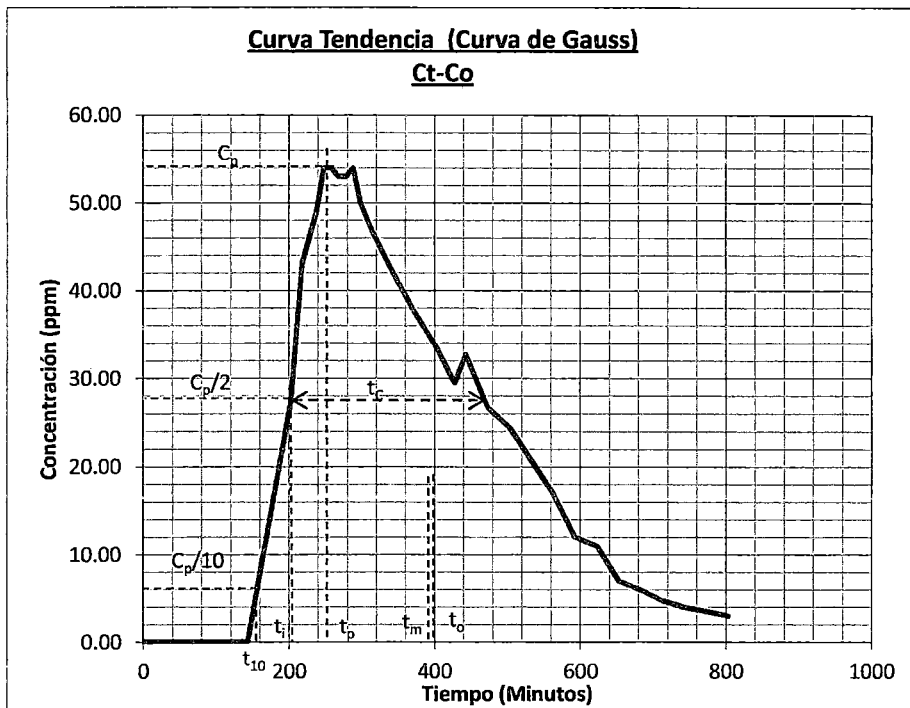
$$t_c/t_o = 0.67$$

El valores de  $t_c/t_o$  son indicadores del fenómeno de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 7.11 horas y el tiempo de retención teórico es muy cercano al tiempo medio de residencia a pesar de la existencia de grandes cortocircuitos, esto se debe a que hay zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la grafica y desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha.

Grafico IV.98.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### J. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

El modelo de Wolf y Resnick es utilizado con frecuencia para determinar el flujo predominante en un reactor, siendo una herramienta muy útil en reactores donde no existen corrientes de recirculación. El modelo simplificado de Wolf y Resnick se encuentra en la sección H. "Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf y Resnick" del Capítulo II "Marco Teórico" e indica las siguientes expresiones que sirven para calcular el porcentaje de flujo pistón (p), mezclado (M) y espacios muertos dentro de un reactor (m):

El porcentaje de Flujo Pistón esta dado por:

$$p = \frac{\theta * \text{Tan } \alpha}{0.43429 + \theta * \text{Tan } \alpha}$$

El porcentaje de espacios muertos esta dado por la siguiente expresión, indicada en el marco teórico:

$$m = 1 + \frac{\theta}{p}$$

Y el porcentaje de Mezcla Completa se calcula con la expresión:

$$M + p + m = 1$$

Donde:

" Tan  $\alpha$  " esta dado por la pendiente de la recta tangente a la curva 1-F(t) donde la curva empieza a volverse vertical, y esta dado por la siguiente expresión :

$$\text{Tan } \alpha = \frac{1}{\frac{t_1}{t_o} + \frac{t_2}{t_o}}$$

Y "  $\theta$  " es la distancia desde el eje de las ordenadas hasta el punto donde la recta tangente a la curva 1-F(t) intersecta a Y=100%.

Del Grafico IV.99. se encuentra que :

$$\theta = 0.630$$

Además:

$$\begin{aligned} t_1/t_o &= 1.560 \\ t_2/t_o &= 0.630 \end{aligned}$$

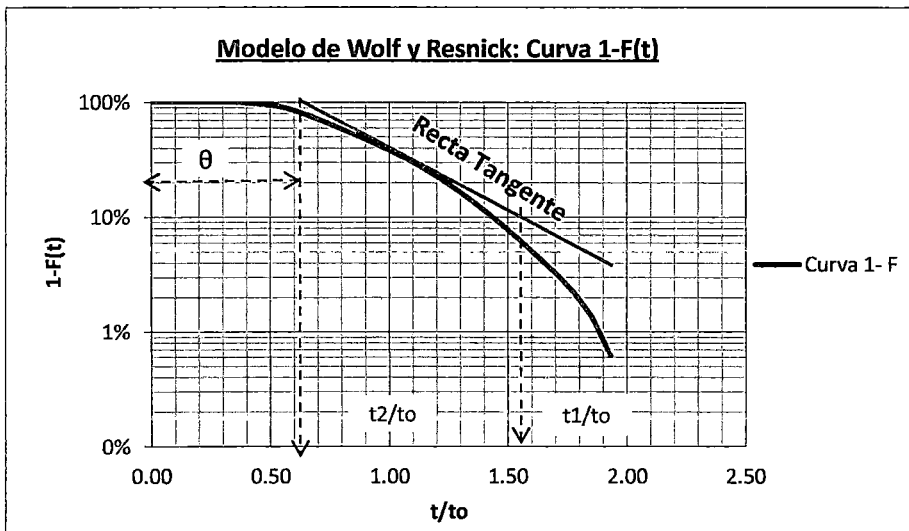


Hallamos  $\tan \alpha$  :

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1}{t_0} - \frac{t_2}{t_0}}$$

$$\tan \alpha = 1.075$$

Grafico IV.99.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 60.93\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = -3.39\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 39.07\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 60.93% y flujo mezclado 39.07% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa -3.39 %).

## **K. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**

La aplicación de los modelos matemáticos para flujo no ideal tiene como finalidad encontrar la curva teórica que mejor se ajuste hacia la curva tendencia, como parte de la discusión de esta investigación se hará la comparación de la curva E experimental con tres (03) modelos matemáticos para flujos no ideales.

- Modelo de Dispersión
- Modelo de Tanques en Serie
- Modelo de Convección para Flujo Laminar

Los métodos mencionados utilizan la comparación con la Curva de Edades del Fluido Normalizada (Curva E Normalizada), por lo cual a continuación se normalizará la Curva E, haciendo que el área bajo la curva sea igual a 1.

### **Curva Eθ: Curva E Normalizada**

En el Capítulo II "Marco Teórico" en la sección E. "Curva E, Distribución de Edad de Fluido", se indica la ecuación Ec.II.11 para obtener la curva E Normalizada cuya área bajo la curva es igual a 1, que es la siguiente:

$$E_{\theta} = t_m \times E(t)$$

Además:

$$t_m \approx \frac{\sum C_i \cdot t_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$y \quad C_i = C_t - C_o$$

Donde:

- E<sub>θ</sub> : Valor de la Curva E Normalizada para el tiempo "i"
- E(t) : Valor de la Curva E para el tiempo "i"
- t<sub>m</sub> : Tiempo medio correspondiente al paso del 50% del trazador
- C<sub>i</sub> : Concentración del trazador para el tiempo igual a "i"
- t<sub>i</sub> : Tiempo "i"
- Δ t<sub>i</sub> : Intervalo de tiempo entre el tiempo "i" y el tiempo "i+1"
- C<sub>t</sub> : Concentración del trazador en el tiempo "i".
- C<sub>o</sub> : Concentración inicial del trazador.

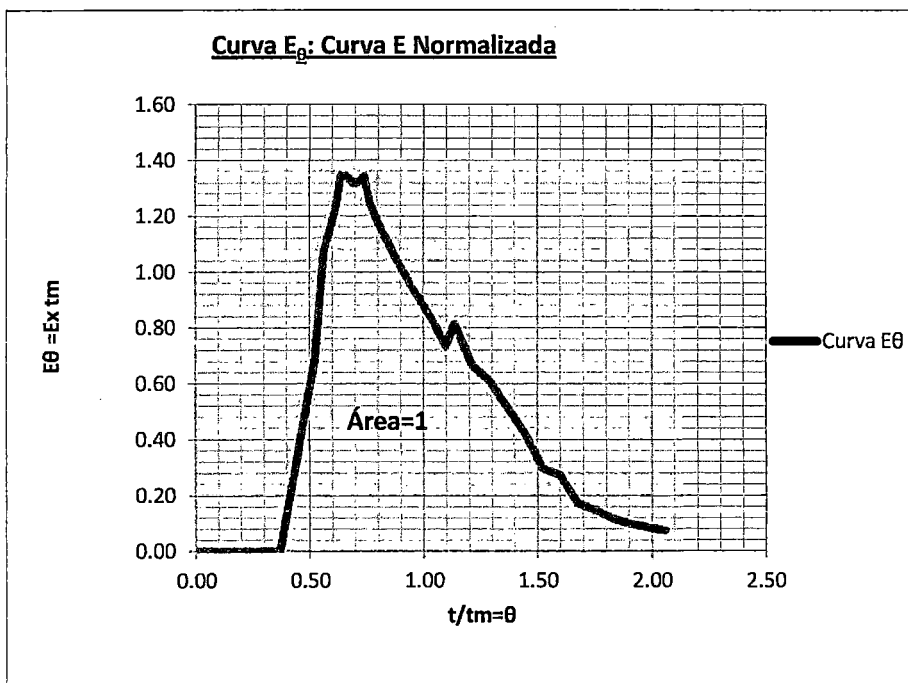
**Tabla IV.21.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA E(θ) y t<sub>m</sub>**

Columna 3 y Columna 4 , datos para hallar el Tiempo Medio "t<sub>m</sub>".

Columna 5 , valores para la Curva E Normalizada

Hora (1)	tiempo (min) (2)	txCixΔt (3)	CixΔt (4)	E <sub>θ</sub> =E(t)xt <sub>m</sub> (5)
07:37	0	0	0.00	0.000
07:46	9	0	0.00	0.000
07:50	13	0	0.00	0.000
08:10	33	0	0.00	0.000
08:50	73	0	0.00	0.000
10:00	143	0	0.00	0.000
11:00	203	167475	825.00	0.685
11:15	218	115268	528.75	1.071
11:35	238	218960	920.00	1.220
11:45	248	127720	515.00	1.345
11:55	258	139320	540.00	1.345
12:05	268	143380	535.00	1.320
12:15	278	147340	530.00	1.320
12:25	288	154080	535.00	1.345
12:35	298	154960	520.00	1.245
12:50	313	227707	727.50	1.171
13:20	343	457905	1335.00	1.046
13:50	373	444803	1192.50	0.934
14:20	403	429195	1065.00	0.834
14:45	428	337050	787.50	0.735
15:00	443	206826	466.88	0.816
15:30	473	422153	892.50	0.666
16:00	503	386681	768.75	0.610
16:30	533	361774	678.75	0.517
17:00	563	318799	566.25	0.423
17:30	593	257955	435.00	0.299
18:00	623	214935	345.00	0.274
18:30	653	176310	270.00	0.174
19:00	683	133185	195.00	0.149
19:30	713	114971	161.25	0.118
20:00	743	97519	131.25	0.100
20:30	773	86963	112.50	0.087
21:00	803	78293	97.50	0.075

Grafico IV.100.



La curva E Normalizada, representada en el Grafico IV.100., tiene la característica de mantener la tendencia de la curva E, pero con el área bajo la curva igual a 1, lo que permite la comparación directa con los modelos matemáticos que se aplicaran. El eje x es adimensional y esta dado por la razón entre el tiempo medido y el tiempo medio.

### 1) Modelo de Dispersión Axial

El modelo de dispersión Axial supone un proceso similar a la difusión que esta superpuesto al flujo pistón. Se usaran las expresiones indicadas en la sección 2. "Modelo de Dispersión" del Anexo N° 1, donde se indica la siguiente expresión para la construcción de la curva analítica:

Para un valor de  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01), la curva analítica se construye usando la siguiente ecuación:

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp\left(\frac{-(1-\theta)^2}{4(D/uL)}\right)$$

Donde:

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

$\left(\frac{D}{uL}\right)$  : Coeficiente de Dispersión del recipiente.

$\sigma^2$ : Varianza de la Curva Analítica.

$t_m$  : Tiempo Medio, correspondiente al paso del 50% del trazador.

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \approx \frac{\sum C_i * t_i * \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$t_m = 390.48 \text{ min.}$$

$$t_m = 6.51 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - t_m)^2 * C_i * \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$\sigma^2 = \frac{305526131.2 \text{ min}^3}{15676.875 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 5.41 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva E<sub>θ</sub>):

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 0.1278$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_{\theta}^2 = 0.1278$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0686 \quad \text{El valor de D/uL es mayor a 0.01.}$$

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

Cuando la desviación respecto del flujo pistón no es demasiado grande, el uso de este modelo es complementario al Modelo de Dispersión, los resultados son idénticos para fines prácticos. Para la comparación con los demás modelos matemáticos, se usara la expresión adimensional (relacionado a la Curva E Normalizada).

La curva  $E_\theta$  para el modelo de tanques, se puede obtener usando la siguiente ecuación. (Levenspiel, 1998) según lo mencionado en la sección G - 3 "Modelo de Tanques en Serie" del Capítulo II "Marco Teórico".

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

Además:

$$\sigma^2_\theta = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 8$$

**Tabla IV.22.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA ANALITICA DEL MODELO**  
**DE TANQUES EN SERIE**

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Tanques en Serie $E_\theta$ (4)	Curva $E_\theta$ Experimental (5)
07:37	0	0.000	0.000	0.000
07:46	9	0.023	0.000	0.000
07:50	13	0.033	0.000	0.000
08:10	33	0.085	0.000	0.000

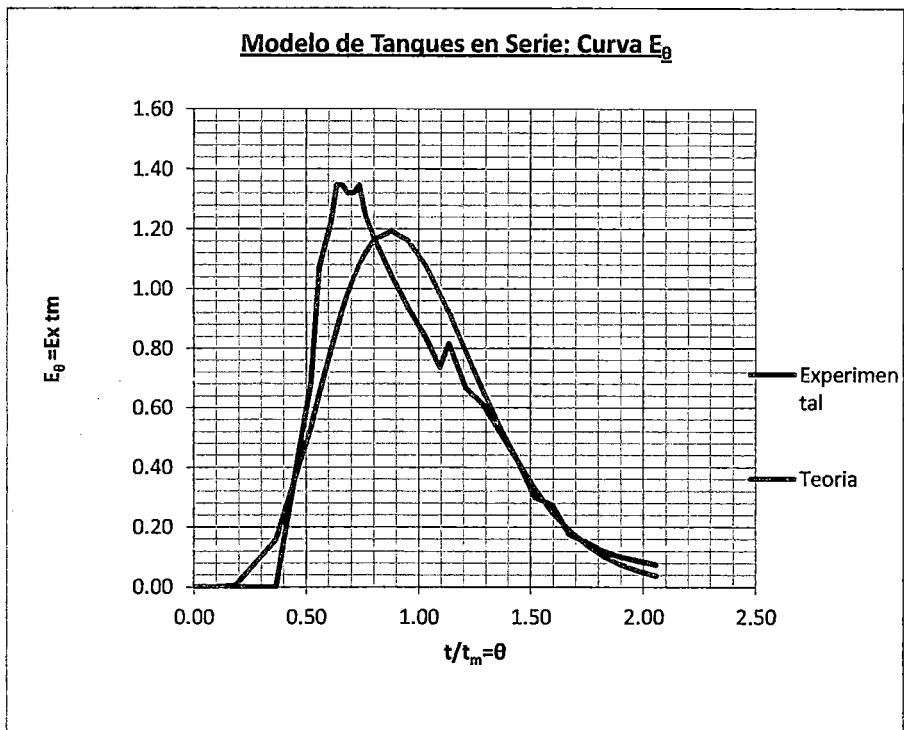
Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.22.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Tanques en Serie $E_\theta$ (4)	Curva $E_\theta$ Experimental (5)
08:50	73	0.187	0.006	0.000
10:00	143	0.366	0.157	0.000
11:00	203	0.520	0.534	0.685
11:15	218	0.558	0.647	1.071
11:35	238	0.610	0.793	1.220
11:45	248	0.635	0.862	1.345
11:55	258	0.661	0.926	1.345
12:05	268	0.686	0.985	1.320
12:15	278	0.712	1.037	1.320
12:25	288	0.738	1.082	1.345
12:35	298	0.763	1.120	1.245
12:50	313	0.802	1.161	1.171
13:20	343	0.878	1.192	1.046
13:50	373	0.955	1.159	0.934
14:20	403	1.032	1.078	0.834
14:45	428	1.096	0.984	0.735
15:00	443	1.134	0.921	0.816
15:30	473	1.211	0.788	0.666
16:00	503	1.288	0.655	0.610
16:30	533	1.365	0.532	0.517
17:00	563	1.442	0.422	0.423
17:30	593	1.519	0.328	0.299
18:00	623	1.595	0.251	0.274
18:30	653	1.672	0.189	0.174
19:00	683	1.749	0.140	0.149
19:30	713	1.826	0.102	0.118
20:00	743	1.903	0.074	0.100
20:30	773	1.980	0.053	0.087
21:00	803	2.056	0.037	0.075



Grafico IV.101.



El Grafico IV.101. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

El modelo de convección supone que cada partícula del fluido se desliza mas allá de su vecino sin interactuar con el por difusión molecular. La amplitud de los tiempos de residencia se debe únicamente a las variaciones de velocidad.

Para la construcción de las curvas analíticas se propone el uso de las siguientes expresiones (ver Anexo N°1 Sección 4. "Modelo de Convección para Flujo Laminar").

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Según la descripción de los tipos de entrada y salida (ver Capítulo II "Marco Teórico" Sección G - 5. "Modelo de Convección para Flujo Laminar"), el ingreso al reactor es tipo FLUX y la salida del reactor es tipo PLANO, con lo cual, la ecuación a usar es  $E^*_{\theta}$ .

**Tabla IV.23.**  
**DATOS PARA CALCULAR LA CURVA ANALITICA DEL MODELO DE CONVECCION PARA FLUJO LAMINAR**

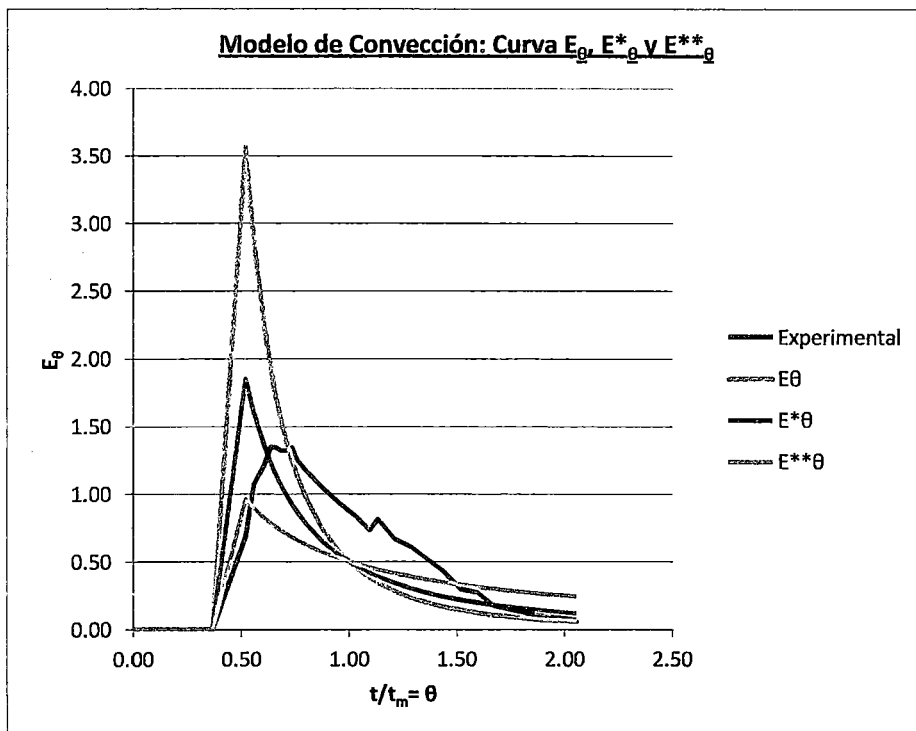
Hora (1)	tiempo (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Modelo Laminar con Convección			Curva $E_{\theta}$ Experime ntal (5)
			$E_{\theta}$	$E^*_{\theta}$	$E^{**}_{\theta}$	
07:37	0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000
07:46	9	0.023	0.00	0.00	0.00	0.000
07:50	13	0.033	0.00	0.00	0.00	0.000
08:10	33	0.085	0.00	0.00	0.00	0.000
08:50	73	0.187	0.00	0.00	0.00	0.000
10:00	143	0.366	0.00	0.00	0.00	0.000

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.23.

Hora (1)	tiempo (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Modelo Laminar con Convección			Curva $E_\theta$ Experime ntal (5)
			$E_\theta$	$E^*_\theta$	$E^{**}_\theta$	
11:00	203	0.520	3.56	1.85	0.96	0.685
11:15	218	0.558	2.87	1.60	0.90	1.071
11:35	238	0.610	2.21	1.35	0.82	1.220
11:45	248	0.635	1.95	1.24	0.79	1.345
11:55	258	0.661	1.73	1.15	0.76	1.345
12:05	268	0.686	1.55	1.06	0.73	1.320
12:15	278	0.712	1.39	0.99	0.70	1.320
12:25	288	0.738	1.25	0.92	0.68	1.345
12:35	298	0.763	1.12	0.86	0.66	1.245
12:50	313	0.802	0.97	0.78	0.62	1.171
13:20	343	0.878	0.74	0.65	0.57	1.046
13:50	373	0.955	0.57	0.55	0.52	0.934
14:20	403	1.032	0.45	0.47	0.48	0.834
14:45	428	1.096	0.38	0.42	0.46	0.735
15:00	443	1.134	0.34	0.39	0.44	0.816
15:30	473	1.211	0.28	0.34	0.41	0.666
16:00	503	1.288	0.23	0.30	0.39	0.610
16:30	533	1.365	0.20	0.27	0.37	0.517
17:00	563	1.442	0.17	0.24	0.35	0.423
17:30	593	1.519	0.14	0.22	0.33	0.299
18:00	623	1.595	0.12	0.20	0.31	0.274
18:30	653	1.672	0.11	0.18	0.30	0.174
19:00	683	1.749	0.09	0.16	0.29	0.149
19:30	713	1.826	0.08	0.15	0.27	0.118
20:00	743	1.903	0.07	0.14	0.26	0.100
20:30	773	1.980	0.06	0.13	0.25	0.087
21:00	803	2.056	0.06	0.12	0.24	0.075

Grafico IV.102.



Del Grafico IV.102. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

**L. COMPARACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS.**

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

**Tabla IV.24.**  
**DATOS PARA COMPARACION DE LAS CURVAS ANALITICAS DE LOS**  
**MODELOS MATEMATICOS ANALIZADOS**

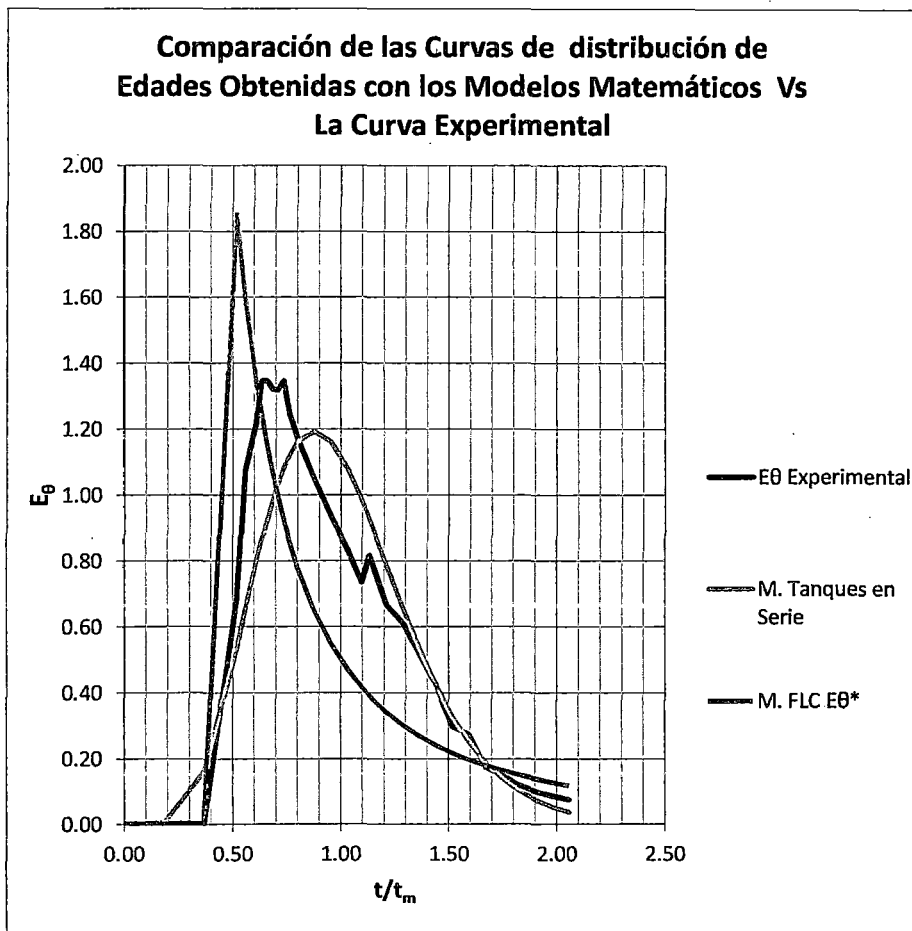
Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Curva Experimental $E_s$ (4)	Modelo	
				Tanques en Serie (6)	Convección $E^*_\theta$ (7)
07:37	0	0.00	0.00	0.00	0.00
07:46	9	0.02	0.00	0.00	0.00
07:50	13	0.03	0.00	0.00	0.00
08:10	33	0.08	0.00	0.00	0.00
08:50	73	0.19	0.00	0.00	0.00
10:00	143	0.37	0.00	0.00	0.00
11:00	203	0.52	0.68	0.05	1.85
11:15	218	0.56	1.07	0.09	1.60
11:35	238	0.61	1.22	0.15	1.35
11:45	248	0.64	1.35	0.18	1.24
11:55	258	0.66	1.35	0.21	1.15
12:05	268	0.69	1.32	0.25	1.06
12:15	278	0.71	1.32	0.28	0.99
12:25	288	0.74	1.35	0.31	0.92
12:35	298	0.76	1.25	0.35	0.86
12:50	313	0.80	1.17	0.39	0.78
13:20	343	0.88	1.05	0.48	0.65
13:50	373	0.96	0.93	0.56	0.55
14:20	403	1.03	0.83	0.62	0.47
14:45	428	1.10	0.73	0.67	0.42
15:00	443	1.13	0.82	0.70	0.39
15:30	473	1.21	0.67	0.76	0.34
16:00	503	1.29	0.61	0.81	0.30

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.24.

Hora (1)	tiempo (min) (2)	$\theta=t/t_m$ (3)	Curva Experimental $E_\theta$ (4)	Modelo	
				Tanques en Serie (6)	Convección $E^*_\theta$ (7)
16:30	533	1.36	0.52	0.85	0.27
17:00	563	1.44	0.42	0.89	0.24
17:30	593	1.52	0.30	0.92	0.22
18:00	623	1.60	0.27	0.94	0.20
18:30	653	1.67	0.17	0.96	0.18
19:00	683	1.75	0.15	0.97	0.16
19:30	713	1.83	0.12	0.98	0.15
20:00	743	1.90	0.10	0.99	0.14
20:30	773	1.98	0.09	0.99	0.13
21:00	803	2.06	0.07	1.00	0.12

Grafico IV.103.



Del Grafico IV.103. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°10, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**b) Ensayo de Trazadores con NaCl N°11**



**ENSAYO DE TRAZADORES N°11 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 11  
 Fecha : 11/01/2011  
 T° Ambiental : 19°C / 36°C  
 T° Agua : 26°C / 30.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 3.13 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.46 ml/s  
 Equivalente en el UASB-UNITRAR  
 Qp : 10.09 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

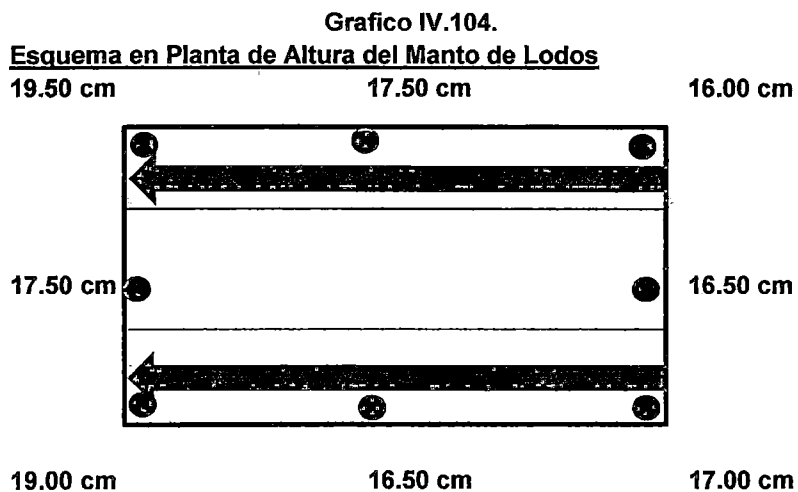
Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.46 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.76 horas <> 465.63 min.

### E. CARACTERIZACION DEL MANTO DE LODOS

La altura del manto de lodos utilizado en el Ensayo de Trazadores N°11 es de 17.44 cm, equivalente a 2.49 m de altura en el UASB-UNITRAR, el manto de lodos fue colocado de manera manual y buscando una altura homogénea.

Altura : 17.44 cm  
 Promedio  
 Volumen del : 53.59 L  
 Manto

Se observó que el volumen del manto de lodos corresponde a más del 50% del volumen útil del reactor.



Donde :

- Punto de medición de altura
- ← Sentido del Flujo en la canaleta de recolección

\* Nota: el lodo fue saturado con una solución de NaCl durante 8 horas antes del inicio de la prueba para que el trazador no sea absorbido por el lodo y cause interferencias en el ensayo.

## **F. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de conductividad y concentración de cloruros a la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los mínimos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv) "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III "Metodología".

Parámetros Medidos:

- ti : Tiempo (min)
- Conduc. : Conductividad medida a la salida. (mS)
- Ct : Concentración de cloruros a la salida (ppm)
- Qi : Caudal medido (ml/s)
- T°Agua : Temperatura del agua a la salida. (°C)
- T°Amb. : Temperatura ambiental (°C)

**Tabla IV.25.**  
**RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°11CON**  
**NaCl**

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
08:35	0	3.13	66.00	6.06	27.0	27.2
08:42	7	3.13	66.00	3.51	27.0	27.2
09:50	75	3.13	66.00	3.51	27.0	27.5
10:45	130	3.28	70.50	3.52	27.0	28.0
11:10	155	3.28	70.50	3.50	27.0	28.5
11:30	175	3.40	74.00	3.68	27.5	29.0
11:45	190	4.11	95.00	3.46	27.5	28.0
12:00	205	4.65	111.50	3.52	27.5	29.5
12:10	215	5.15	126.00	3.51	27.5	30.0
12:30	235	5.03	123.00	3.54	28.0	33.5
12:40	245	5.34	132.00	3.37	28.0	32.5
12:50	255	5.52	137.00	3.56	28.0	33.0
13:00	265	5.62	140.00	3.44	28.5	33.0

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.25.

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
13:10	275	5.61	140.00	3.50	28.5	33.0
13:20	285	5.62	140.00	3.40	28.5	33.0
13:30	295	5.58	139.00	3.36	28.5	33.0
13:40	305	5.53	138.00	3.36	29.0	34.0
13:50	315	5.51	137.00	3.32	29.5	34.0
14:00	325	5.44	135.00	3.33	29.5	34.0
14:15	340	5.26	130.00	3.21	30.0	35.0
14:30	355	5.27	130.00	3.34	30.0	35.5
14:45	370	5.25	129.00	3.39	30.0	36.0
15:00	385	5.25	129.00	3.37	30.5	35.5
15:30	415	5.25	129.00	3.33	30.5	34.0
16:00	445	4.91	119.00	3.47	30.5	34.0
16:30	475	4.67	112.00	3.45	30.5	33.5
17:00	505	4.61	110.00	3.44	30.5	32.0
17:30	535	4.37	103.00	3.48	30.5	30.0
18:00	565	4.20	98.00	3.51	30.0	28.0
18:30	595	4.07	94.00	3.50	30.0	27.0
19:00	625	4.00	92.00	3.46	30.0	26.5
19:30	655	3.83	87.00	3.42	29.5	26.5
20:00	685	3.70	83.00	3.48	29.5	24.0
20:30	715	3.77	85.00	3.43	29.0	25.0
21:00	745	3.53	78.00	3.44	28.5	22.5
21:30	775	3.45	75.50	3.36	29.0	19.5
22:00	805	3.40	74.00	3.42	28.0	19.0
22:30	835	3.36	73.00	3.45	27.5	19.5
23:00	865	3.33	72.00	3.42	26.0	19.0

### G. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES

Grafico IV.105.

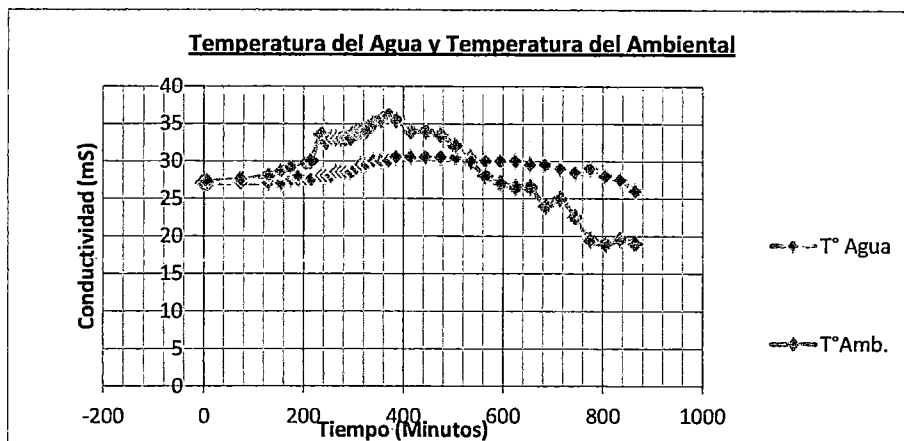
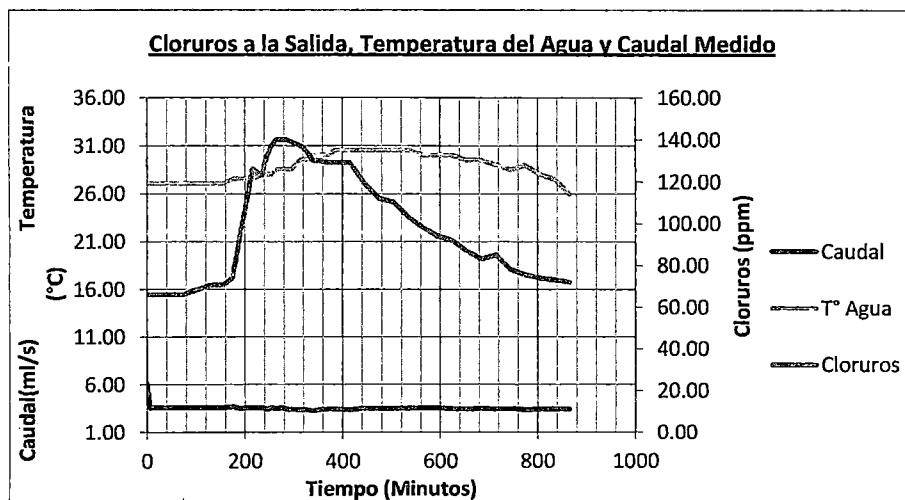


Grafico IV.106.



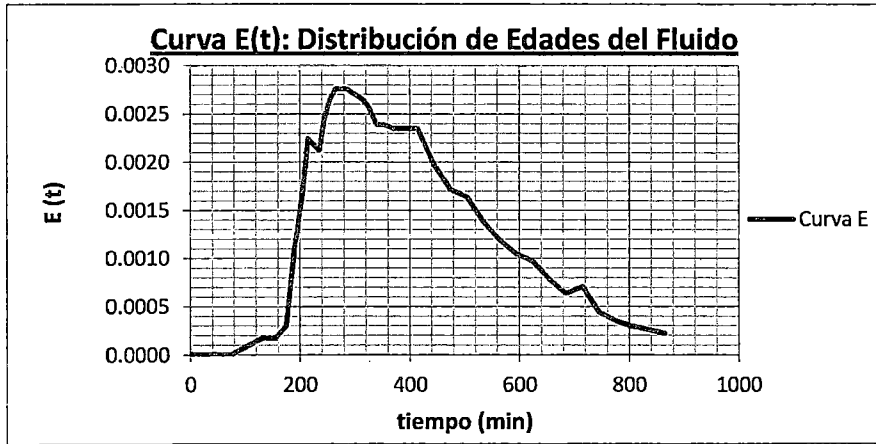
Del Grafico IV.106. se observa que el pico de caudal al inicio del ensayo corresponde a la aplicación del trazador, luego el caudal se mantiene constante con mínimas variaciones.

La temperatura del agua varía suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo en  $t=600$  min (5:30 pm). Los cloruros mantienen un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones como el segundo pico encontrado en  $t=400$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

H. CURVA E, F y 1-F

Curva E: Distribución de Edades del Fluido

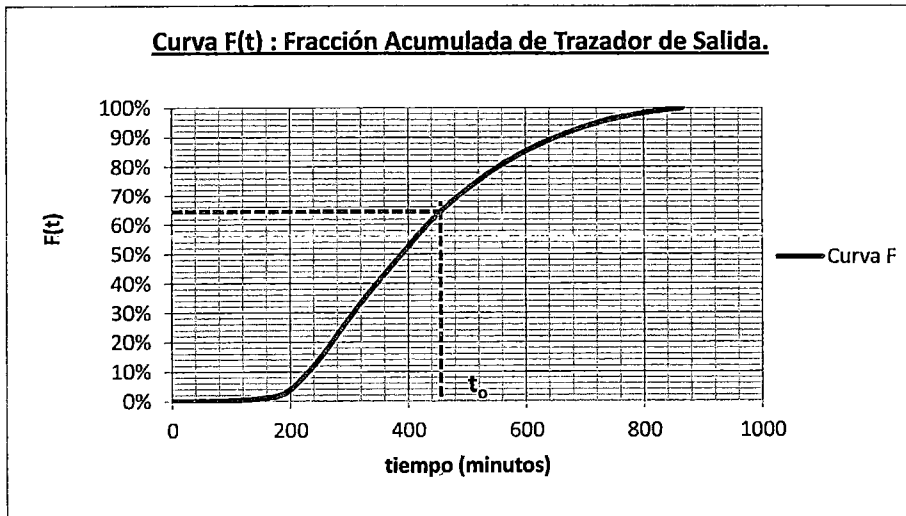
Grafico IV.107.



El Grafico IV.107. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido , que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

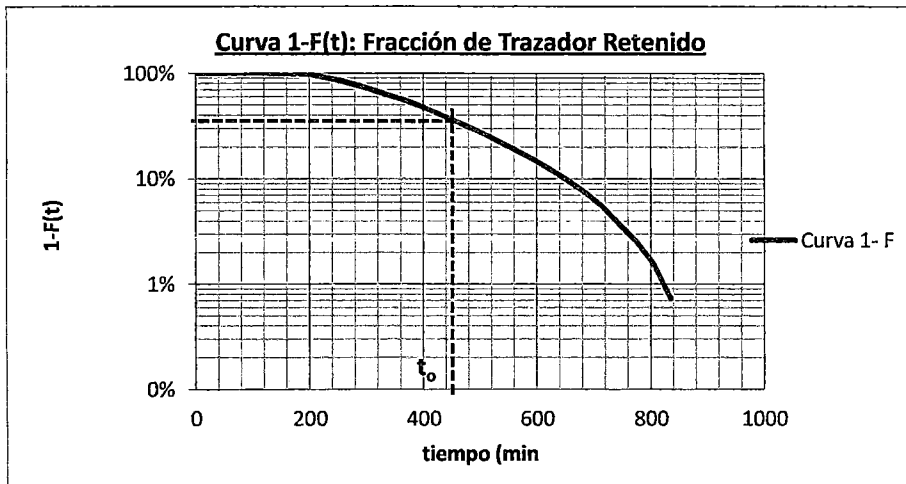
Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F:Fracción de Trazador Retenido

Grafico IV.108.



El Grafico IV.108. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 65.21% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.76 horas.

Grafico IV.109.



En el Grafico IV.109. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.76 horas (correspondiente al tiempo teórico) es 34.79%.

### I. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)

**Parámetros :**

$t_i$  : 130.00 min.  
**2.17 horas**  
 $t_p$  : 265.00 min.  
**4.42 horas**  
 $t_m$  : 426.78 min.  
**7.11 horas**  
 $t_o$  : 465.63 min.  
**7.76 horas**  
 $t_c$  : 337.73 min.  
**5.63 horas**

**Análisis del Flujo :**

**CRITERIO Y VALOR**

**ANALISIS**

$t_m = 7.11$  horas

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 7.11 horas

$t_p/t_o = 0.28$

El valor de  $t_p/t_o$  mayor a 0.30 indica que no hay presencia de grandes cortocircuitos.

$t_m/t_o = 0.92$

El valor de  $t_m/t_o$  es cercano a 1, lo que indica que el tiempo de retención teórico es muy parecido al tiempo de retención real.

$t_p/t_o = 0.57$

El valor de  $t_p/t_o$  es 0.62, indica que la mayor concentración a la salida del reactor se presenta aproximadamente al 60% del tiempo teórico.

$t_c/t_o = 0.73$

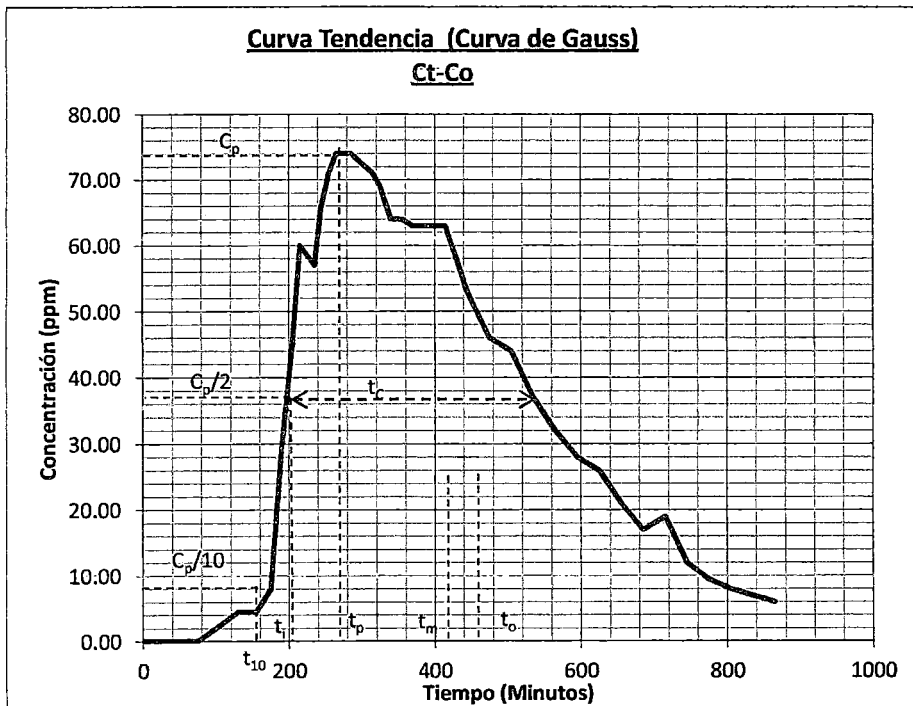
El valores de  $t_c/t_o$  son indicadores del fenómeno de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.



Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 7.11 horas y el tiempo de retención teórico es muy cercano al tiempo medio de residencia a pesar de la existencia de grandes cortocircuitos, esto se debe a que hay zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la grafica y desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha.

Grafico IV.110.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### J. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.111. se encuentra que :

$$\theta = 0.580$$

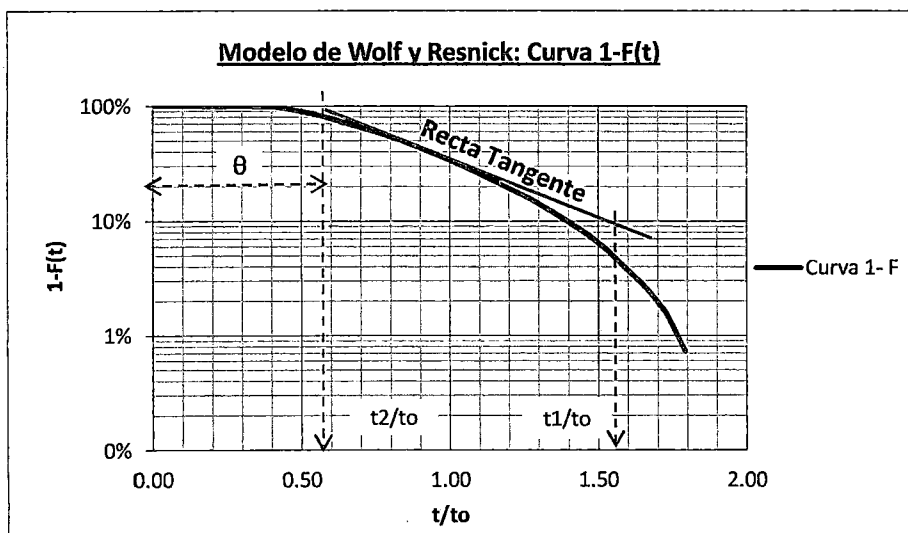
Además :

$$t_1/t_0 = 1.540$$

$$t_2/t_0 = 0.580$$

$$\tan \alpha = 1.042$$

Grafico IV.111.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 58.18\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = 0.31\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 41.51\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 58.18% y flujo mezclado 41.51% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa 0.31 %).

## **K. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL**

### **1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis: D/uL pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 426.78 \text{ min.}$$

$$t_m = 7.11 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{707297664.3 \text{ min}^3}{26840 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 7.32 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2}$$

$$\sigma_\theta^2 = 0.1447$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de D/uL es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1447$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0785$$

El valor de D/uL es mayor a 0.01.

Un valor de D/uL mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis (D/uL menor a 0.01).

Para valores de D/uL mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$ : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

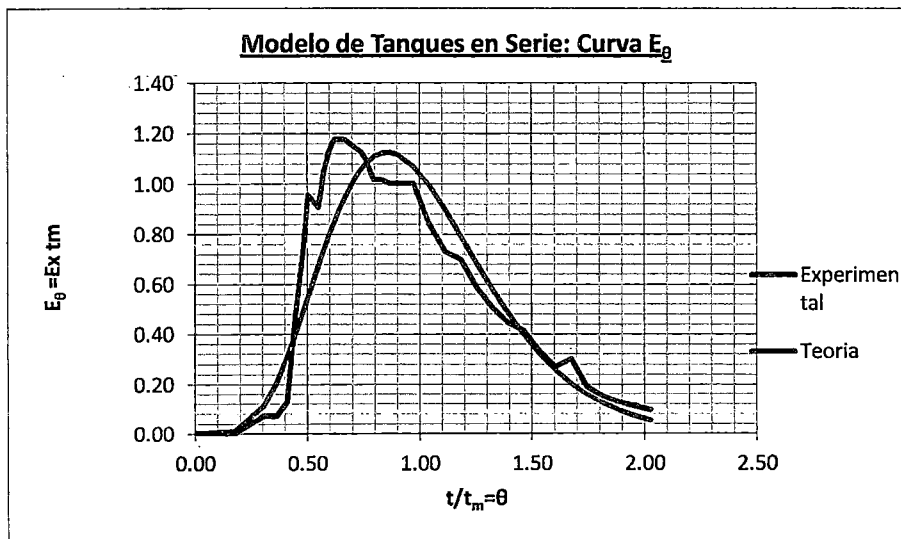
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 7$$

Grafico IV.112.



El Grafico IV.112. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

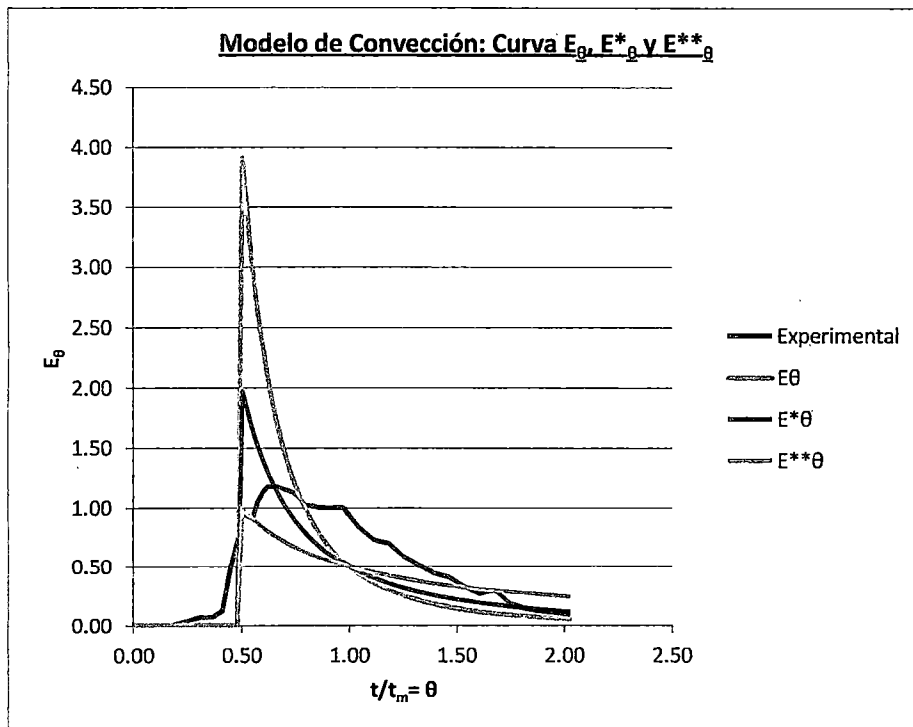
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.113.

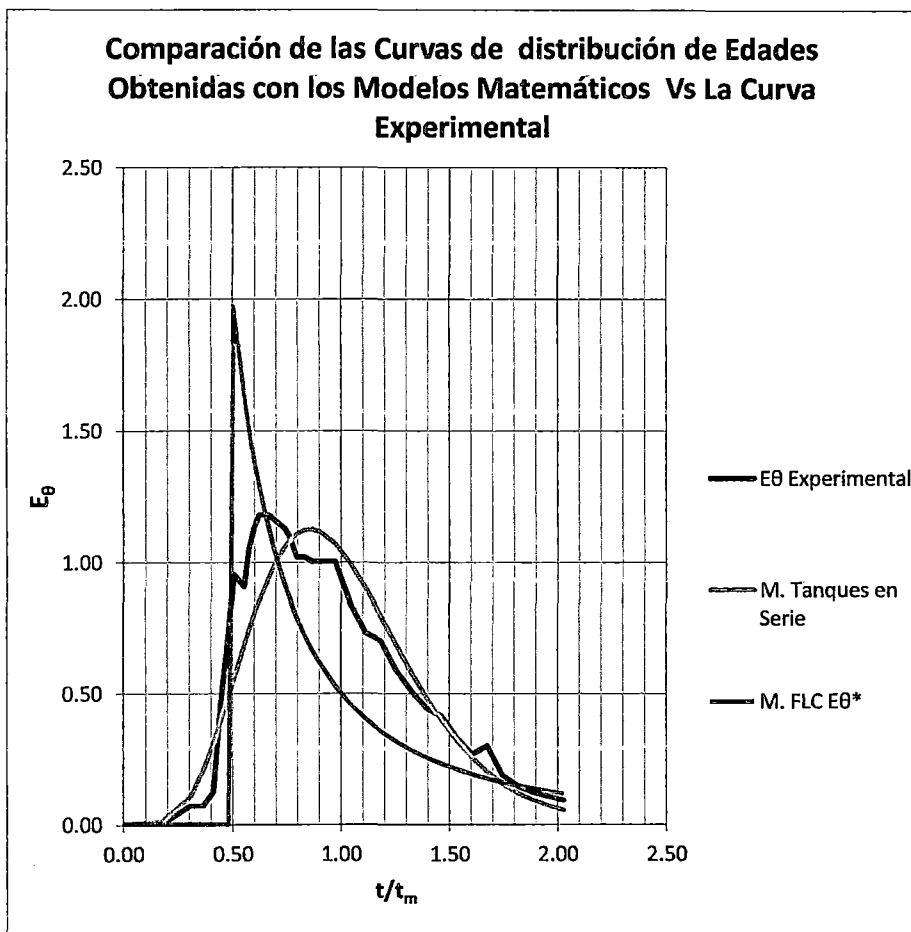


Del Grafico IV.113. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### L. COMPARACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.114.



Del Grafico IV.114. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental. del. Ensayo N°11, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**c) Ensayo de Trazadores con NaCl N°12**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°12 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 12  
 Fecha : 13/01/2011  
 T° Ambiental : 19°C / 31°C  
 T° Agua : 23.5°C / 27.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W. de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 3.28 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.

Qp : 3.38 ml/s

Equivalente en el UASB-UNITRAR

Qp : 9.85 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.38 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.95 horas <> 477.18 min.



### **E. CARACTERIZACION DEL MANTO DE LODOS**

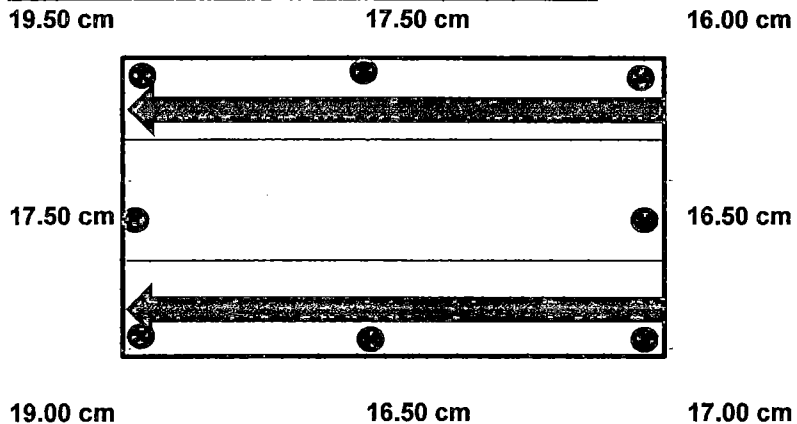
La altura del manto de lodos utilizado en el Ensayo de Trazadores N°12 es de 17.44 cm, equivalente a 2.49 m de altura en el UASB-UNITRAR, el manto de lodos fue colocado de manera manual y buscando una altura homogénea.

Altura : 17.44 cm  
 Promedio  
 Volumen del : 53.59 L  
 Manto

Se observó que el volumen del manto de lodos corresponde a más del 50% del volumen útil del reactor.

**Grafico IV.115.**

**Esquema en Planta de Altura del Manto de Lodos**



Donde :

● Punto de medición de altura

← Sentido del Flujo en la canaleta de recolección

\* Nota: el lodo fue saturado con una solución de NaCl durante 8 horas antes del inicio de la prueba para que el trazador no sea absorbido por el lodo y cause interferencias en el ensayo.

### **F. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de conductividad y concentración de cloruros a la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los mínimos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv) "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III "Metodología".

Parámetros Medidos:

- ti : Tiempo (min)
- Conduc. : Conductividad medida a la salida. (mS)
- Ct : Concentración de cloruros a la salida (ppm)
- Qi : Caudal medido (ml/s)
- T°Agua : Temperatura del agua a la salida. (°C)
- T°Amb. : Temperatura ambiental (°C)

Tabla IV.26.

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°12 CON NaCl**

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
08:40	0	3.28	77.50	6.12	25.0	25.0
08:49	9	3.28	77.50	6.12	25.0	25.5
08:50	10	3.42	77.50	3.41	25.0	25.5
09:50	70	3.42	77.50	2.11	26.5	27.0
10:00	80	3.49	79.00	3.63	26.5	27.0
10:10	90	3.56	80.50	3.26	26.0	28.5
11:00	140	3.56	79.50	3.15	26.0	29.5
11:05	145	3.59	80.50	3.58	26.5	30.0
11:30	170	3.59	79.00	2.78	26.5	31.0
11:35	175	3.60	79.50	3.15	26.5	31.0
12:00	200	3.63	81.50	3.47	26.0	30.0
12:10	210	3.85	88.00	3.39	26.0	29.0
12:30	230	4.35	101.50	3.52	26.5	30.0

Continua en la siguiente página

## Continuación de la Tabla IV.26.

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
12:40	240	4.63	110.00	3.48	26.5	30.0
12:50	250	4.92	118.50	3.01	26.5	30.0
13:10	270	4.90	118.50	3.38	27.0	29.5
13:25	285	5.10	124.00	3.45	27.0	29.0
13:40	300	5.12	125.00	3.40	27.5	29.0
13:50	310	5.11	125.00	3.38	27.5	30.0
14:00	320	5.08	124.00	3.20	27.5	30.0
14:10	330	5.06	124.00	3.52	27.5	29.0
14:20	340	4.99	121.00	3.53	27.5	29.0
14:30	350	4.97	120.00	3.52	27.5	29.0
15:30	410	4.85	116.50	3.52	27.5	26.5
16:00	440	4.62	110.50	3.53	27.5	26.5
16:30	470	4.42	105.00	3.49	27.5	25.0
17:00	500	4.32	102.00	3.36	27.0	25.0
17:30	530	4.32	102.00	3.41	27.0	24.5
18:00	560	4.03	94.00	3.35	27.0	23.0
18:30	590	3.92	91.00	3.43	26.5	22.5
19:00	620	3.82	88.00	3.53	26.0	22.0
19:30	650	3.82	88.00	3.48	25.5	22.0
20:00	680	3.76	86.50	3.38	25.5	20.0
20:30	710	3.75	86.00	3.42	25.0	19.5
21:00	740	3.70	84.75	3.35	24.5	20.0
21:30	770	3.67	84.00	3.36	24.5	20.0
22:00	800	3.65	83.25	3.51	24.0	19.0
22:30	830	3.64	83.00	3.36	23.5	19.5

**G. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

En el Grafico IV.116.se observa que la variacion de la temperatura del agua es menor que la variacion de la temperatura del ambiente. La temperatura del agua se mantuvo en el rango de 23.5°C / 27.5°C durante toda la duración del ensayo.

Grafico IV.116.

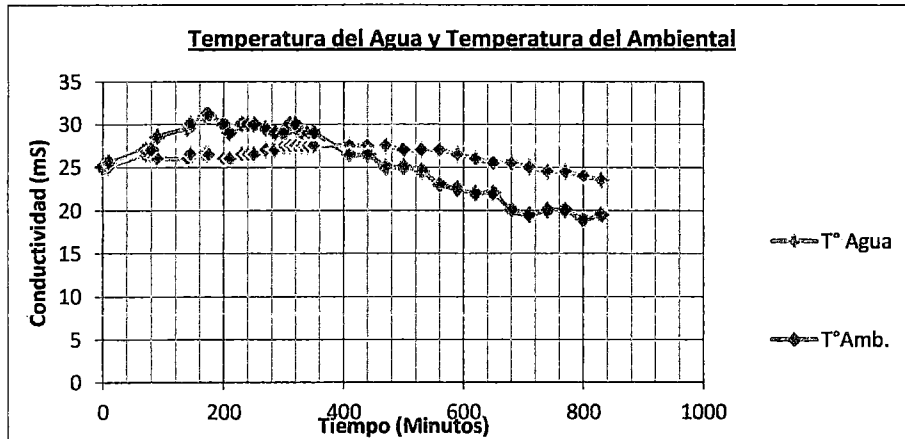
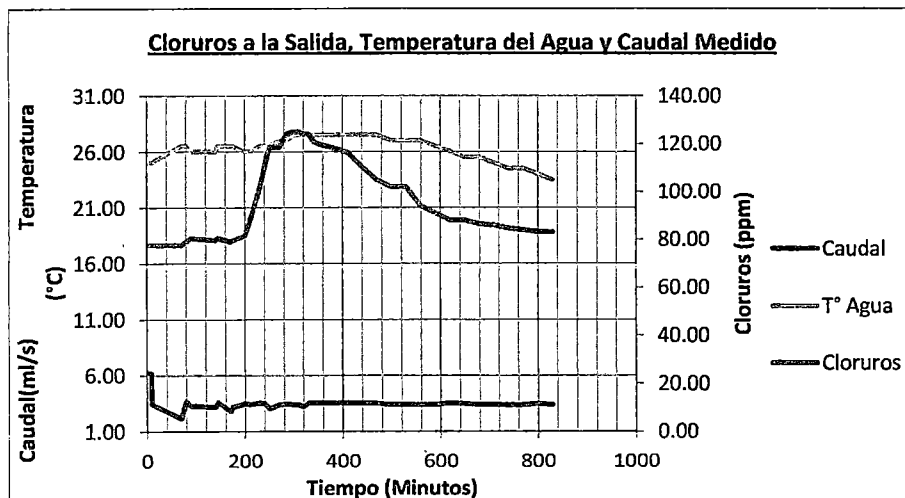


Grafico IV.117.



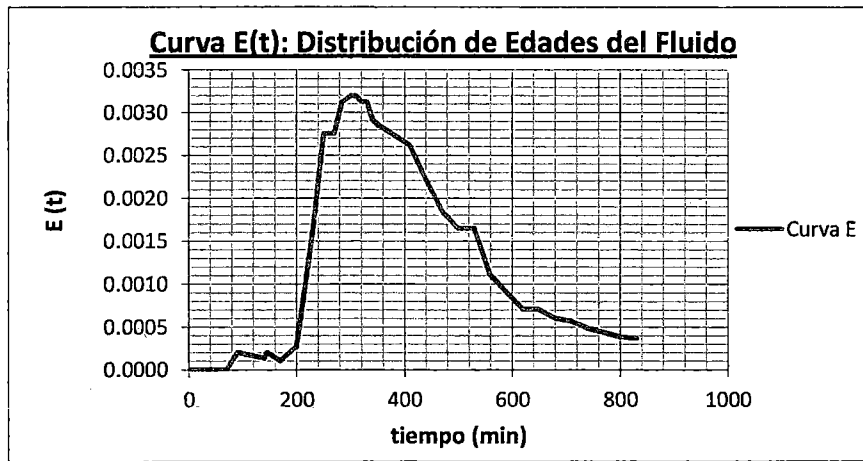
Del se observa que el pico de caudal al inicio del ensayo corresponde a la aplicación del trazador, luego el caudal se mantiene constante con mínimas variaciones.

La temperatura del agua varía suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo en  $t=600$  min (5:30 pm). Los cloruros mantienen un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones como el segundo pico encontrado en  $t=400$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

## H. CURVA E, F y 1-F

### Curva E: Distribución de Edades del Fluido

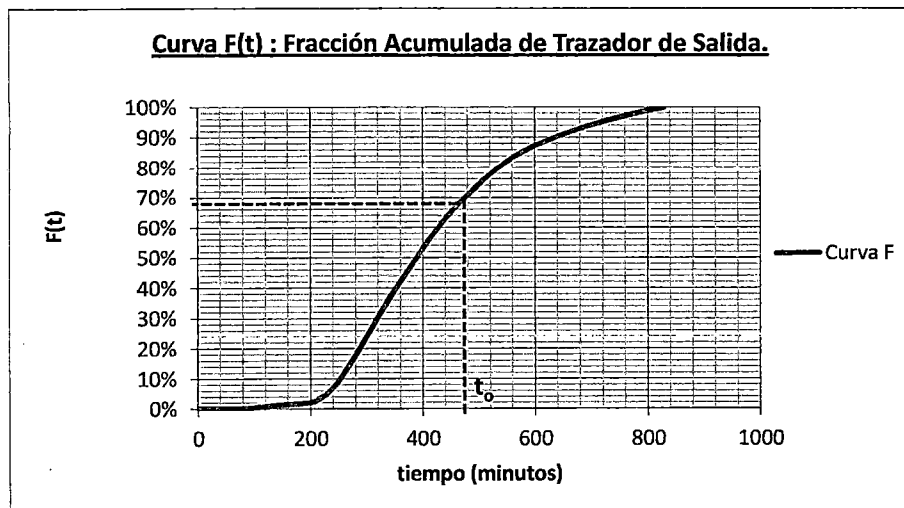
Grafico IV.118.



El Grafico IV.118. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido , que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

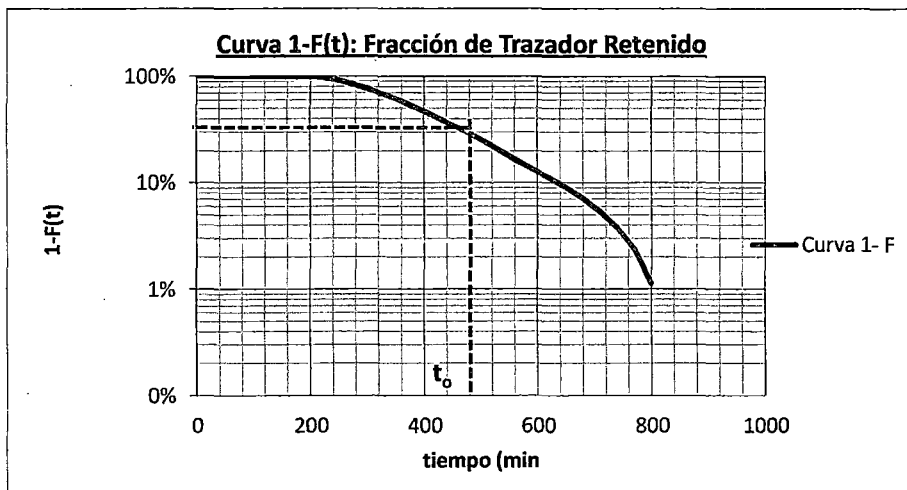
### Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F:Fracción de Trazador Retenido

Grafico IV.119.



El Grafico IV.119. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 69.5% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.95 horas.

Grafico IV.120.



En el Grafico IV.120. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.95 horas (correspondiente al tiempo teorico) es 30.5%.

**I. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)**

Parámetros :

$t_i$  : 80.00 min.  
**1.33 horas**  
 $t_p$  : 300.00 min.  
**5.00 horas**  
 $t_m$  : 430.29 min.  
**7.17 horas**  
 $t_o$  : 477.18 min.  
**7.95 horas**  
 $t_c$  : 303.18 min.  
**5.05 horas**

Análisis del Flujo :

**CRITERIO Y VALOR****ANALISIS**

$$t_m = 7.17 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 7.17 horas

$$t_i/t_o = 0.17$$

El valor de  $t_i/t_o$  menor a 0.30 indica que hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 0.90$$

El valor de  $t_m/t_o$  es cercano a 1, lo que indica que el tiempo de retención teórico es muy parecido al tiempo de retención real.

$$t_p/t_o = 0.63$$

El valor de  $t_p/t_o$  es 0.63, indica que la mayor concentración a la salida del reactor se presenta aproximadamente al 60% del tiempo teórico.

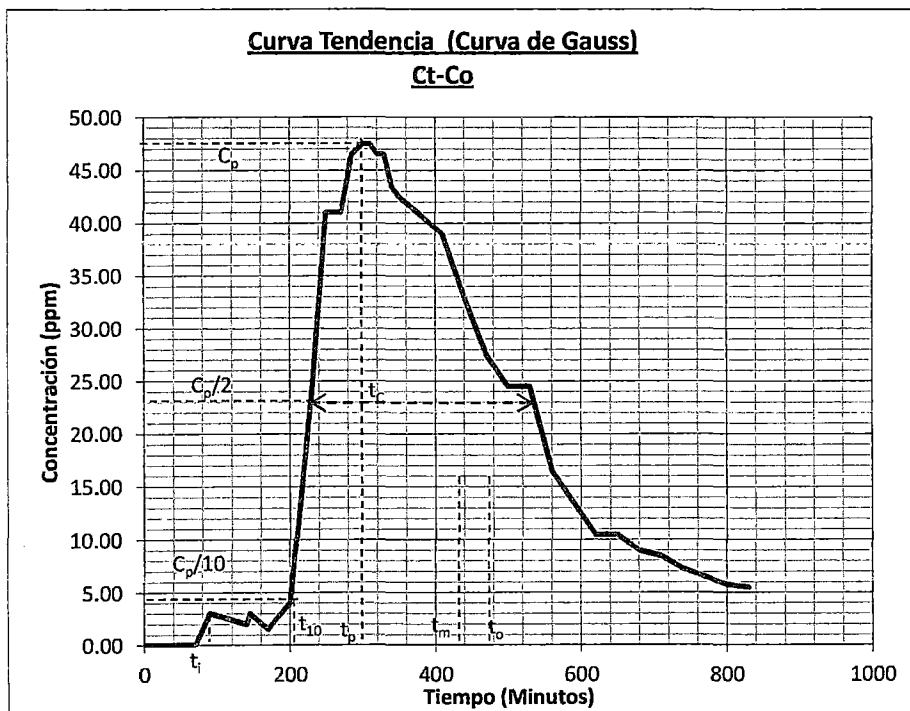
$$t_c/t_o = 0.64$$

El valores de  $t_c/t_o$  son indicadores del fenómeno de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 7.11 horas y el tiempo de retención teórico es muy cercano al tiempo medio de residencia a pesar de la existencia de grandes cortocircuitos, esto se debe a que hay zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la grafica y desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha.

Grafico IV.121.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_0$  : tiempo de retención teórico.



### J. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.122. se encuentra que :

$$\theta = 0.580$$

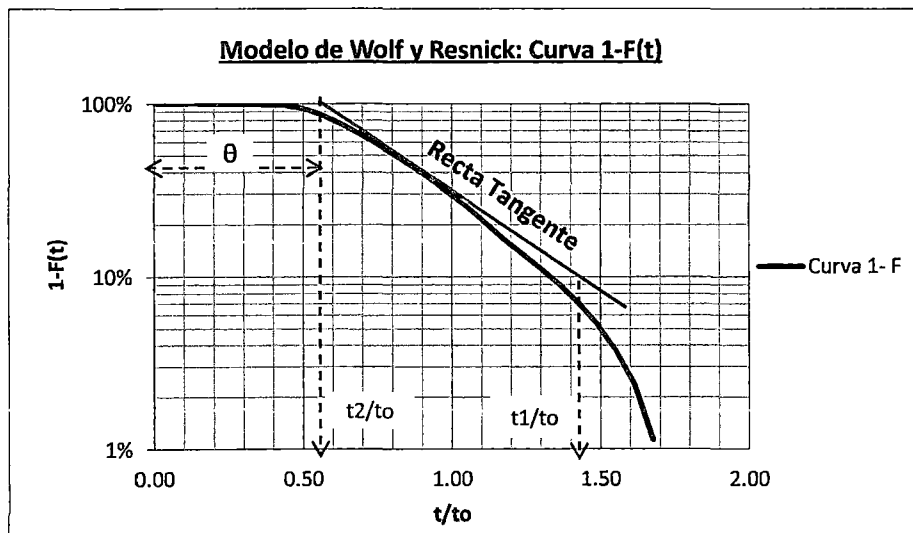
Además:

$$t_1/t_0 = 1.420$$

$$t_2/t_0 = 0.580$$

$$\tan \alpha = 1.190$$

Grafico IV.122.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 61.39\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = 5.52\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 33.09\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 61.39% y flujo mezclado 33.09% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa 5.52 %).

**K. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ):

$$t_m = 430.29 \text{ min.}$$

$$t_m = 7.17 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{334505916.1 \text{ min}^2}{14883.75 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 6.24 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = 0.1214$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1214$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0649 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a 0.01.}$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

$$E_{(\theta)} = \frac{N(N * \theta)^{N-1}}{(N - 1)!} * e^{-N*\theta}$$

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

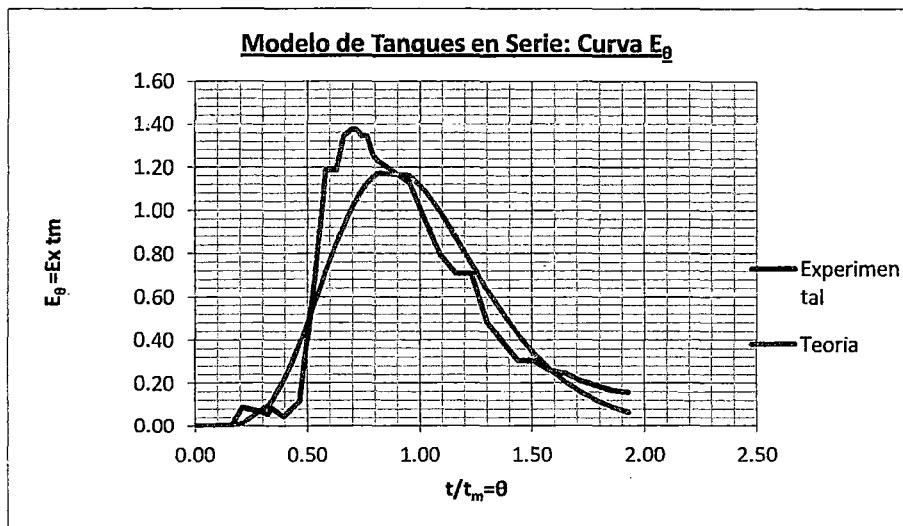
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 8$$

Grafico IV.123.



El Grafico IV.123. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Flux

$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Flux, Salida Plano

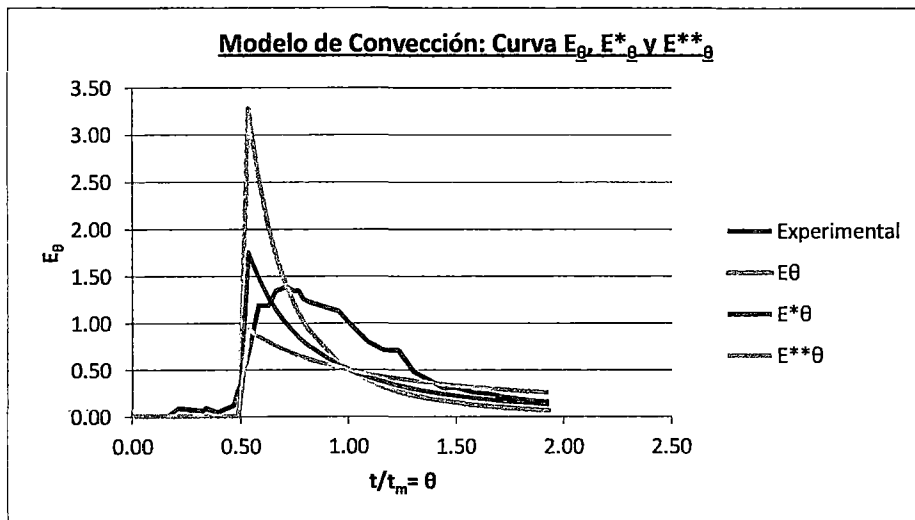
$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2}$$

Entrada Plano, Salida Plano

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.124.

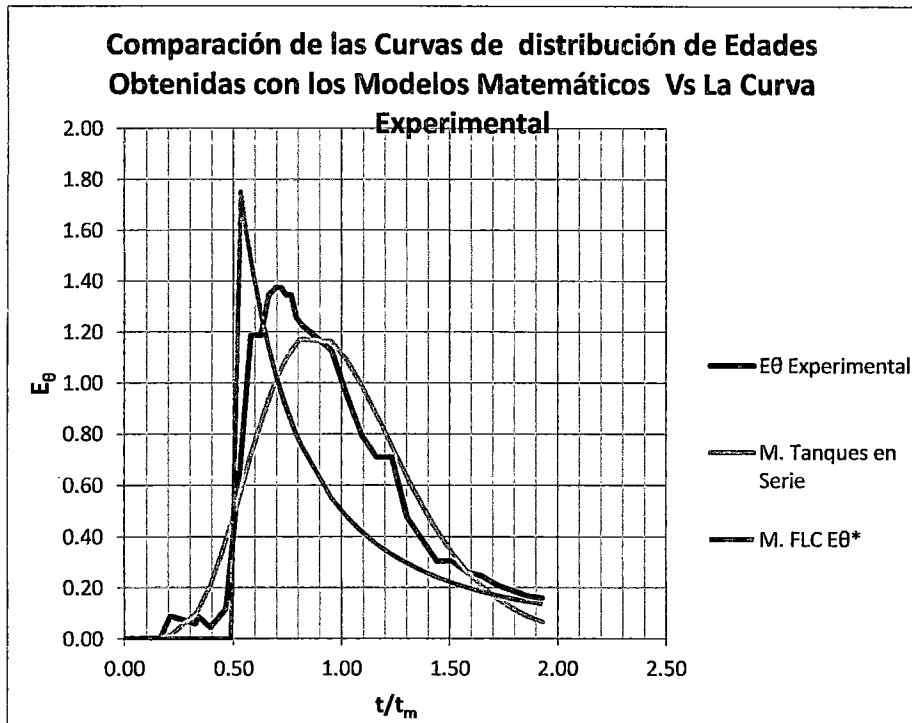


Del Grafico IV.124. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### L. COMPARACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.125.



Del Grafico IV.125. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°12, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**d) Ensayo de Trazadores con NaCl N°13**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°13 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 13  
 Fecha : 18/01/2011  
 T° Ambiental : 19°C / 32.5°C  
 T° Agua : 22°C / 29°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 2.24 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.  
 Qp : 3.53 ml/s  
 Equivalente en el UASB-UNITRAR  
 Qp : 10.30 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.53 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.60 horas <> 455.99 min.

### **E. CARACTERIZACION DEL MANTO DE LODOS**

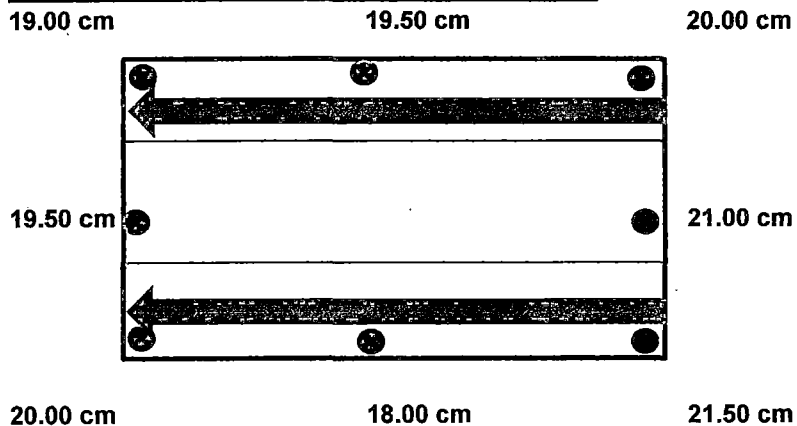
La altura del manto de lodos utilizado en el Ensayo de Trazadores N°13 es de 19.81 cm, equivalente a 2.83 m de altura en el UASB-UNITRAR, el manto de lodos fue colocado de manera manual y buscando una altura homogénea.

Altura : 19.81 cm  
 Promedio  
 Volumen del Manto : 60.89 L

Se observó que el volumen del manto de lodos corresponde a más del 50% del volumen útil del reactor.

**Grafico IV.126.**

#### **Esquema en Planta de Altura del Manto de Lodos**



Donde :

● Punto de medición de altura

← Sentido del Flujo en la canaleta de recolección

\* Nota: el lodo fue saturado con una solución de NaCl durante 8 horas antes del inicio de la prueba para que el trazador no sea absorbido por el lodo y cause interferencias en el ensayo.



## **F. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de conductividad y concentración de cloruros a la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los mínimos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv) "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III "Metodología".

Parámetros Medidos:

- ti : Tiempo (min)
- Conduc. : Conductividad medida a la salida. (mS)
- Ct : Concentración de cloruros a la salida (ppm)
- Qi : Caudal medido (ml/s)
- T° Agua : Temperatura del agua a la salida. (°C)
- T° Amb. : Temperatura ambiental (°C)

**Tabla IV.27.**

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°13 CON NaCl**

<b>Hora (1)</b>	<b>ti (min) (2)</b>	<b>Conduc. (mS) (3)</b>	<b>Ct. (ppm) (4)</b>	<b>Qi (ml/s) (5)</b>	<b>T° Agua (°C) (6)</b>	<b>T° Amb. (°C) (7)</b>
09:43	0	2.24	36.00	5.30	27.0	28.0
09:47	4	2.24	36.00	3.70	27.0	28.0
10:27	44	2.24	36.00	3.60	27.0	28.0
10:57	74	2.24	39.00	3.67	27.0	29.0
11:27	104	2.34	39.50	3.56	27.5	30.0
11:57	134	2.66	47.00	3.69	27.0	31.5
12:27	164	3.05	95.00	3.21	27.5	31.5
12:42	179	3.17	96.67	3.53	27.5	31.5
12:57	194	3.35	108.33	3.39	27.5	31.5
13:07	204	3.50	110.00	3.39	28.0	31.5
13:17	214	3.60	112.00	3.54	28.0	31.5
13:27	224	3.70	106.00	3.50	28.5	32.0
13:32	229	3.88	102.00	3.38	28.5	32.5

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla IV.27.

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
13:37	234	3.79	106.00	3.45	28.5	31.5
13:47	244	3.74	96.00	3.46	29.0	31.0
13:57	254	3.74	95.00	3.51	29.0	30.5
14:07	264	3.69	94.00	3.60	28.5	29.5
14:27	284	3.71	89.00	3.64	28.5	28.0
14:37	294	3.62	86.00	3.64	28.5	27.5
15:00	317	3.51	83.00	3.64	28.0	27.0
15:30	347	3.34	79.00	3.41	28.0	26.5
16:00	377	3.18	71.00	3.38	27.5	26.0
16:30	407	3.01	70.00	3.45	27.5	25.0
17:00	437	2.95	67.00	3.52	27.5	25.0
17:30	467	2.93	66.00	3.46	27.0	24.0
18:00	497	2.95	67.00	3.56	27.0	23.5
18:30	527	2.79	59.00	3.54	26.5	23.0
19:00	557	2.71	55.00	3.57	26.5	21.0
19:30	587	2.67	53.00	3.48	25.0	20.5
20:00	617	2.65	51.75	3.55	24.5	20.0
20:30	647	2.64	51.00	3.56	24.0	20.0
21:00	677	2.59	48.50	3.58	23.0	20.5
21:30	707	2.56	47.00	3.51	22.5	20.0
22:00	737	2.53	45.50	3.52	22.5	19.5
22:30	767	2.50	44.00	3.51	22.5	19.5
23:00	797	2.49	43.50	3.54	22.0	19.0
23:30	827	2.48	43.00	3.50	22.0	19.5

#### G. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES

En el Grafico IV.127.se observa que la variacion de la temperatura del agua es menor que la variacion de la temperatura del ambiente. La temperatura del agua se mantuvo en el rango de 22°C / 29°C durante toda la duraci3n del ensayo.

Grafico IV.127.

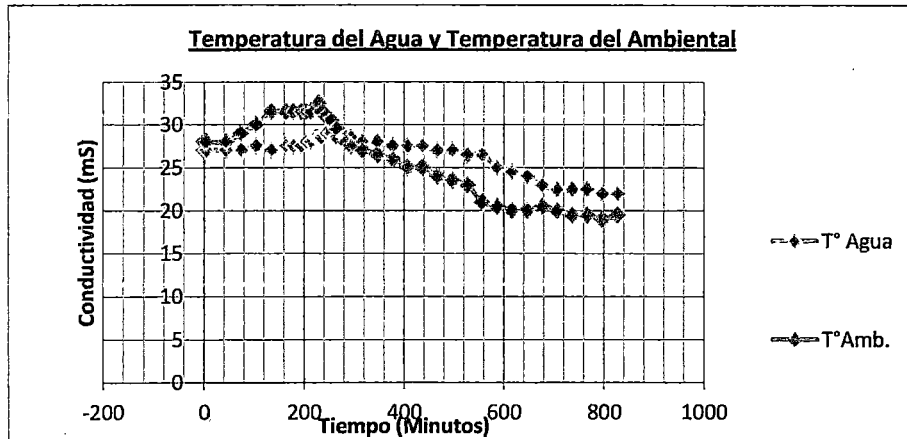
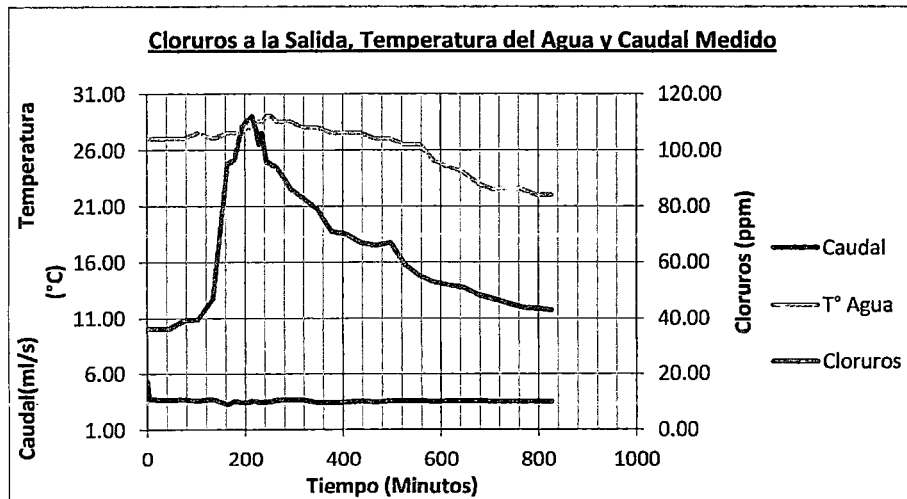


Grafico IV.128.



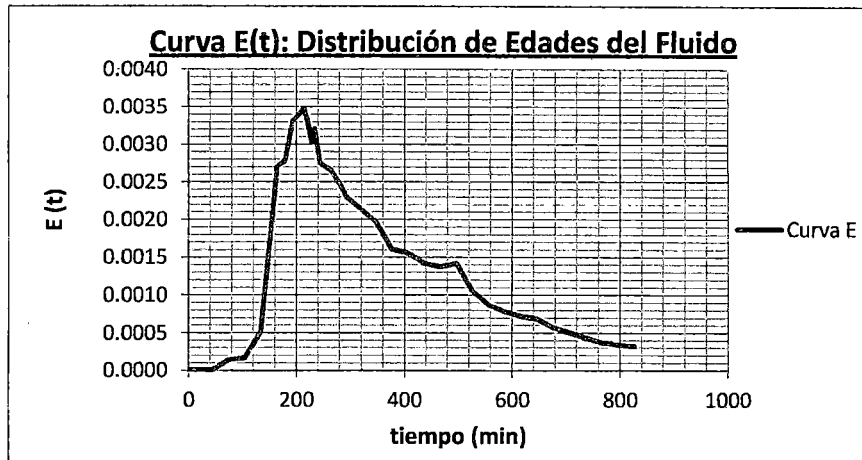
Del se observa que el pico de caudal al inicio del ensayo corresponde a la aplicación del trazador, luego el caudal se mantiene constante con mínimas variaciones.

La temperatura del agua varía suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo en  $t=600$  min (5:30 pm). Los cloruros mantienen un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones como el segundo pico encontrado en  $t=400$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

## H. CURVA E, F y 1-F

### Curva E: Distribución de Edades del Fluido

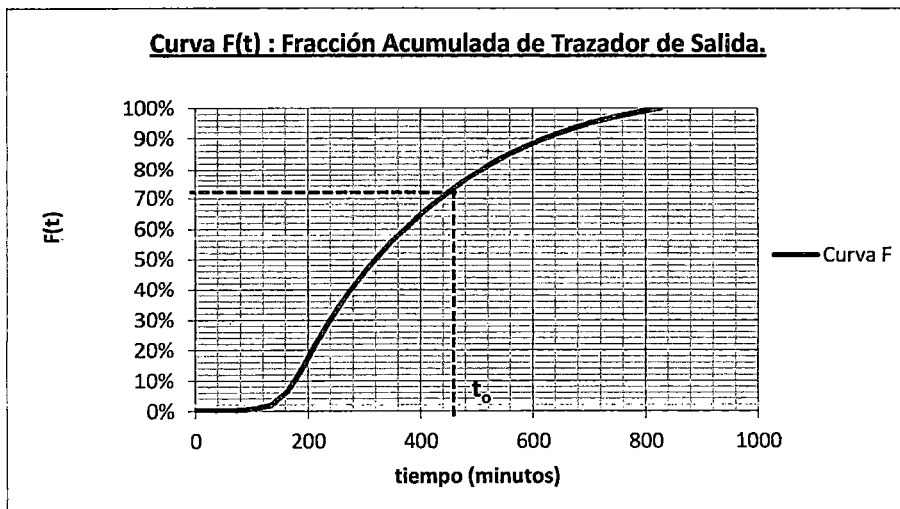
Grafico IV.129.



El Grafico IV.129. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido , que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

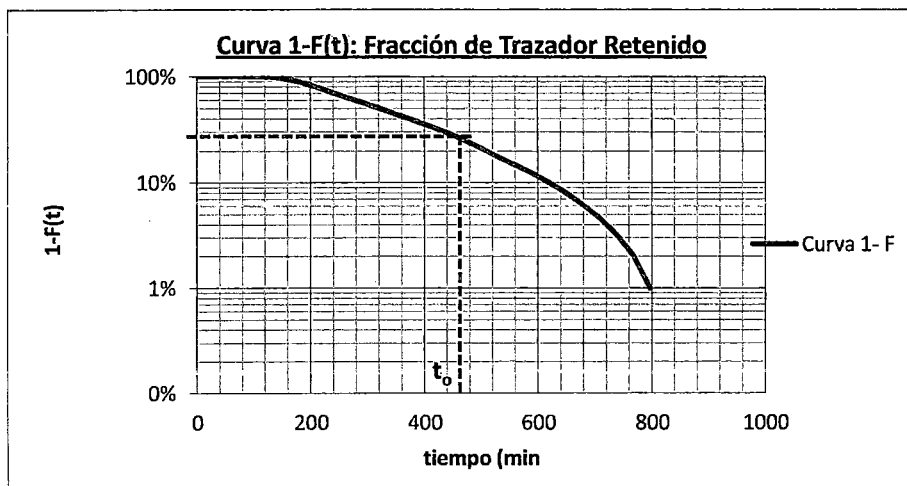
### Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F:Fracción de Trazador Retenido

Grafico IV.130.



El Grafico IV.130. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 72.3% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.6 horas.

Grafico IV.131.



En el Grafico IV.131. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.6 horas (correspondiente al tiempo teorico) es 27.7%.

### I. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)

**Parámetros :**

$t_i$  : 74.00 min.  
**1.23 horas**  
 $t_p$  : 214.00 min.  
**3.57 horas**  
 $t_m$  : 372.67 min.  
**6.21 horas**  
 $t_o$  : 455.99 min.  
**7.60 horas**  
 $t_c$  : 214.88 min.  
**3.58 horas**

**Análisis del Flujo :**

CRITERIO Y VALOR

ANALISIS

$$t_m = 6.21 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 6.21 horas

$$t_i/t_o = 0.16$$

El valor de  $t_i/t_o$  menor a 0.30 indica que hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 0.82$$

El valor de  $t_m/t_o$  es cercano a 1, lo que indica que el tiempo de retención teórico es muy parecido al tiempo de retención real.

$$t_p/t_o = 0.47$$

El valor de  $t_p/t_o$  es 0.47 , indica que la mayor concentración a la salida del reactor se presenta aproximadamente al 60% del tiempo teórico.

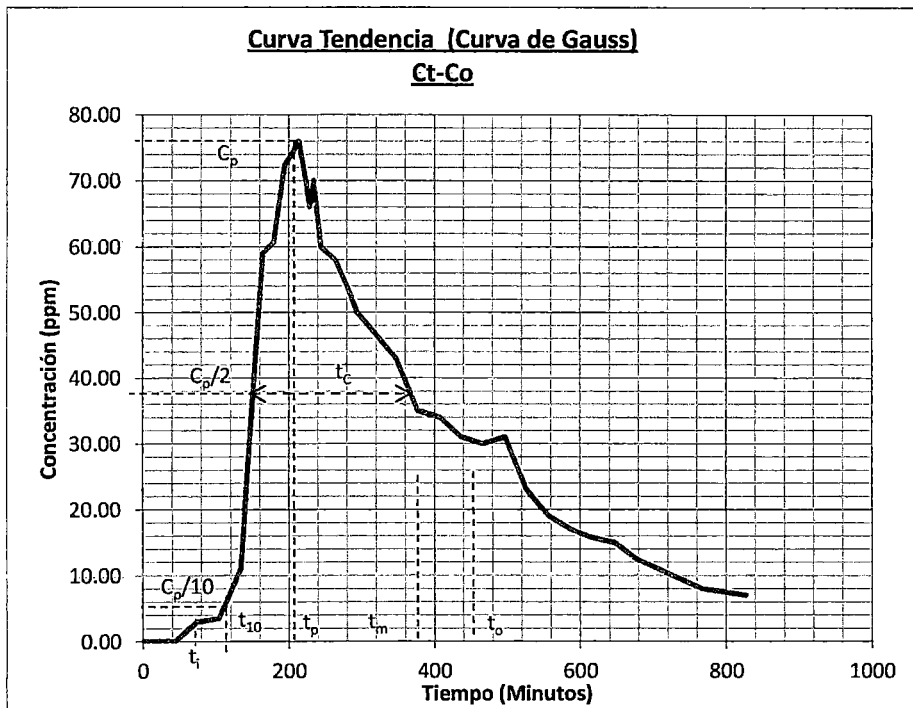
$$t_c/t_o = 0.47$$

El valores de  $t_c/t_o$  son indicadores del fenómeno de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 6.21 horas y el tiempo de retención teórico es cercano al tiempo medio de residencia a pesar de la existencia de grandes cortocircuitos, esto se debe a que hay zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la grafica y desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha.

Grafico IV.132.



Donde:

- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### J. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.133. se encuentra que :

$$\theta = 0.440$$

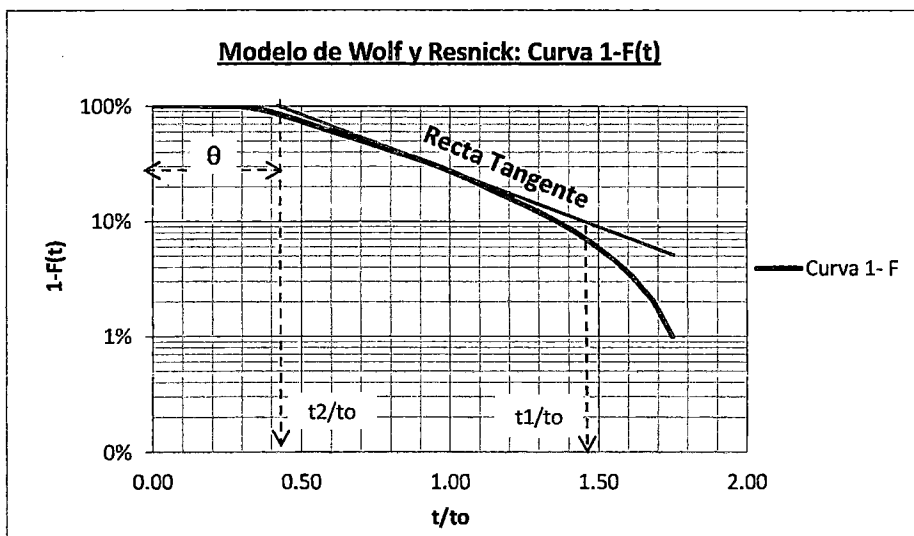
Además:

$$t_1/t_0 = 1.480$$

$$t_2/t_0 = 0.440$$

$$\tan \alpha = 0.962$$

Grafico IV.133.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 49.35\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = 10.83\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 39.82\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 49.35% y flujo mezclado 39.82% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa 10.83 %).



**K. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 372.67 \text{ min.}$$

$$t_m = 6.21 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{649471433.5 \text{ min}^3}{21844.675 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 8.26 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = 0.2141$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left( \frac{uL}{D} \right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.2140$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.1219 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a 0.01.}$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.

## 2) Modelo de Tanques en Serie

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

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

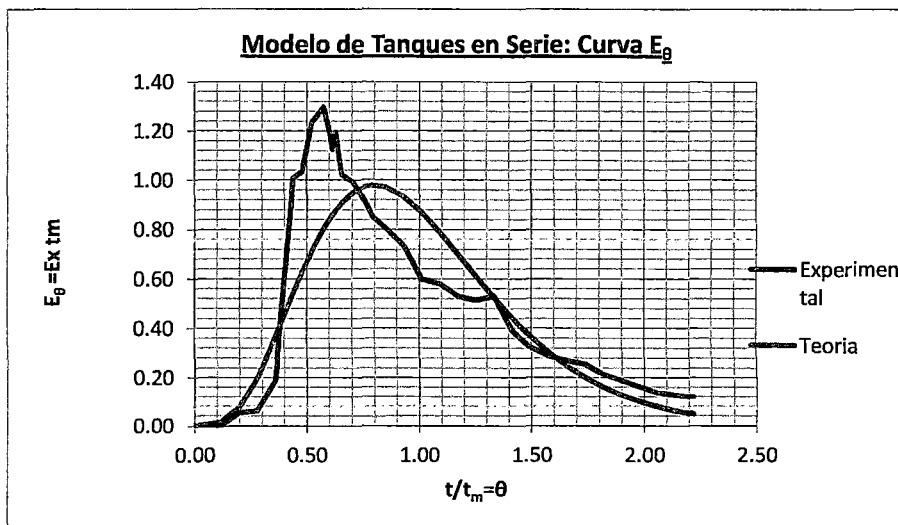
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 5$$

Grafico IV.134.



El Grafico IV.134. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

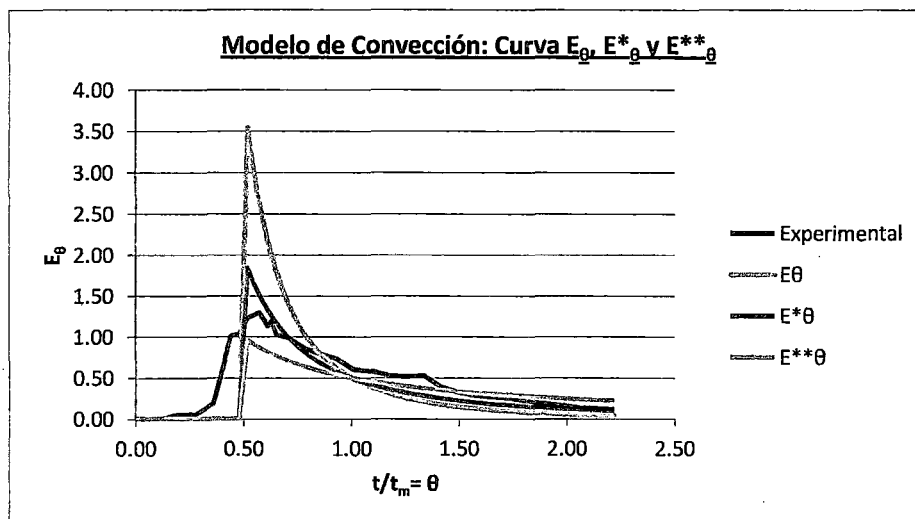
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.135.

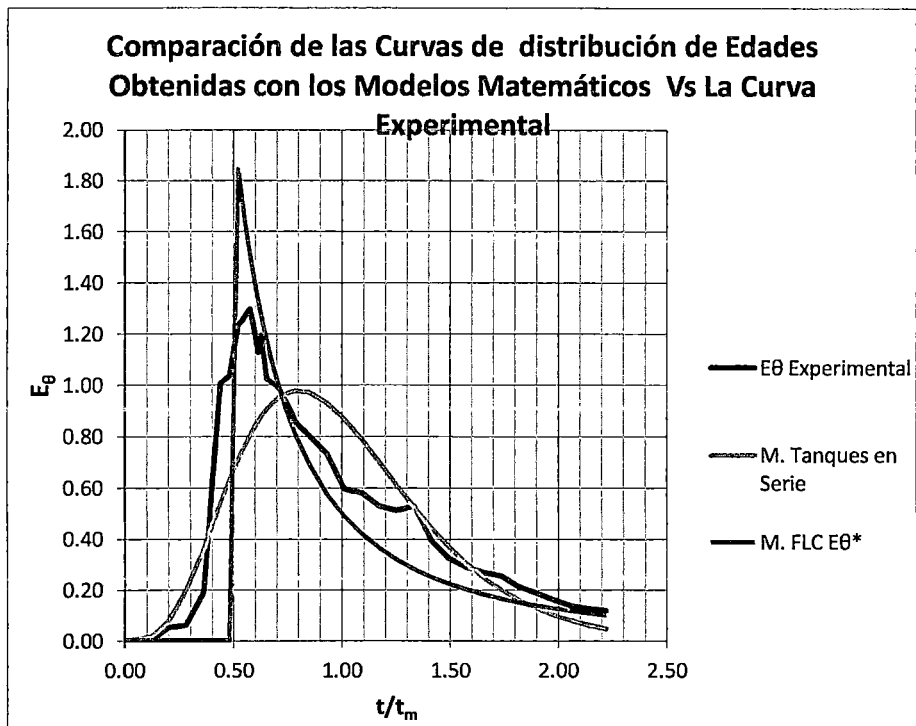


Del Grafico IV.135. se observa que efectivamente la curva E\* es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### L. COMPARACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.136.



Del Grafico IV.136. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°13, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**e) Ensayo de Trazadores con NaCl N°14**

**ENSAYO DE TRAZADORES N°14 CON NaCl****A. INFORMACION GENERAL**

Ensayo N° : 14  
 Fecha : 21/01/2011  
 T° Ambiental : 22.5°C / 36°C  
 T° Agua : 24°C / 29.5°C

**B. CARACTERIZACION DEL TRAZADOR Y AFLUENTE**

**Trazador** : NaCl  
 W de NaCl : 100.00 gr  
 Volumen de : 3000.00 ml  
 agua  
 Concentración  
 [ ] NaCl (90%) : 33333 ppm NaCl  
 [ ] Cloruros : 1323.75 ppm Cloruros  
 Conductividad : 47.27 ms

**Afluente**

Concentración : 640 ppm NaCl  
 Conductividad : 2.24 ms

**C. MEDICION DEL CAUDAL PROMEDIO (Qp)**

En la planta piloto.  
 Qp : 3.41 ml/s  
 Equivalente en el UASB-UNITRAR  
 Qp : 9.94 l/s

**D. DETERMINACION DEL TIEMPO DE RETENCION TEORICO (To)**

Volumen Útil : 96.70 L  
 Caudal : 3.41 ml/s  
 Promedio  
 To : 7.88 horas <> 472.58 min.

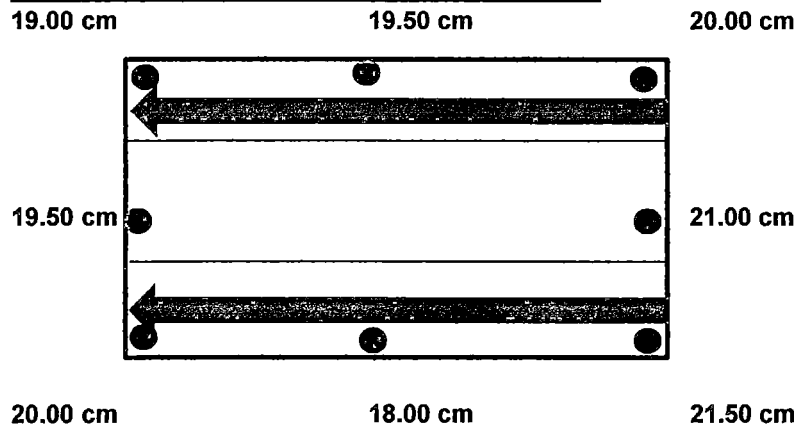
**E. CARACTERIZACION DEL MANTO DE LODOS**

Altura : 19.81 cm  
 Promedio  
 Volumen del : 60.89 L  
 Manto

Se observo que el volumen del manto de lodos corresponde a mas del 50% del volumen útil del reactor.

**Grafico IV.137.**

**Esquema en Planta de Altura del Manto de Lodos**



Donde :

● Punto de medición de altura

← Sentido del Flujo en la canaleta de recolección

\* Nota: el lodo fue saturado con una solución de NaCl durante 8 horas antes del inicio de la prueba para que el trazador no sea absorbido por el lodo y cause interferencias en el ensayo.

### **F. RESULTADOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES CON NaCl**

En el Ensayo de Trazadores con NaCl se realizaron mediciones de conductividad y concentración de cloruros a la salida del reactor, caudal, temperatura del agua y temperatura ambiental, tomándose muestras periódicas según los mínimos descritos en la sección a) "Metodología de Realización de los Ensayos de Trazadores" parte iv) "Tareas a desarrollar durante el Ensayo" del Capítulo III "Metodología".

Parámetros Medidos:

- ti : Tiempo (min)
- Conduc. : Conductividad medida a la salida. (mS)
- Ct : Concentración de cloruros a la salida (ppm)
- Qi : Caudal medido (ml/s)
- T°Agua : Temperatura del agua a la salida. (°C)
- T°Amb. : Temperatura ambiental (°C)

**Tabla IV.28.**

### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES N°14CON NaCl**

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
07:58	0	2.24	40.00	6.93	24.0	25.0
08:07	9	2.24	40.00	3.22	24.5	25.0
08:50	52	2.24	40.00	3.22	24.0	26.0
09:05	67	2.24	40.00	3.40	24.0	26.0
10:00	122	2.34	42.50	3.32	26.0	30.0
10:30	152	2.66	50.25	3.40	26.0	30.0
10:45	167	3.05	59.75	3.39	26.5	30.0
11:00	182	3.17	62.50	3.34	27.0	31.0
11:10	192	3.35	67.00	3.48	27.0	31.0
11:20	202	3.50	70.50	3.43	27.5	31.0
11:30	212	3.60	73.00	3.43	27.5	31.0
11:40	222	3.70	75.50	3.37	28.0	33.0
11:50	232	3.88	79.50	3.48	28.0	33.0

Continua en la siguiente página



Continuación de la Tabla IV.28.

Hora (1)	ti (min) (2)	Conduc. (mS) (3)	Ct. (ppm) (4)	Qi (ml/s) (5)	T° Agua (°C) (6)	T° Amb. (°C) (7)
12:00	242	3.79	77.50	3.37	28.5	33.5
12:10	252	3.74	76.50	3.49	29.0	33.0
12:20	262	3.74	76.50	3.52	29.0	34.0
12:30	272	3.69	75.00	3.54	29.0	34.0
12:45	287	3.71	75.50	3.56	29.0	34.5
13:00	302	3.62	73.50	3.43	29.0	36.0
13:30	332	3.51	71.00	3.39	29.0	33.5
14:00	362	3.34	66.50	3.38	29.5	32.0
14:30	392	3.18	63.00	3.40	29.0	31.5
15:00	422	3.23	64.00	3.38	29.5	31.5
15:30	452	2.98	58.00	3.40	29.0	32.0
16:00	482	2.86	55.00	3.46	29.0	30.0
16:30	512	2.82	54.00	3.43	29.0	29.0
17:00	542	2.69	51.00	3.42	29.0	28.5
17:30	572	2.65	50.00	3.45	29.0	28.5
18:00	602	2.57	48.00	3.38	29.0	27.0
18:30	632	2.49	46.00	3.40	28.5	26.5
19:00	662	2.48	45.75	3.36	28.5	26.5
19:30	692	2.44	45.00	3.36	28.5	26.5
20:00	722	2.42	44.50	3.35	28.0	24.5
20:30	752	2.40	44.00	3.37	27.5	23.0
21:00	782	2.39	43.75	3.41	26.5	22.5
21:30	812	2.36	43.00	3.40	26.5	22.5

#### **G. RELACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRAZADORES**

En el Grafico IV.138.se observa que la variacion de la temperatura del agua es menor que la variacion de la temperatura del ambiente. La temperatura del agua se mantuvo en el rango de 24°C / 29.5°C durante toda la duraci3n del ensayo.

Grafico IV.138.

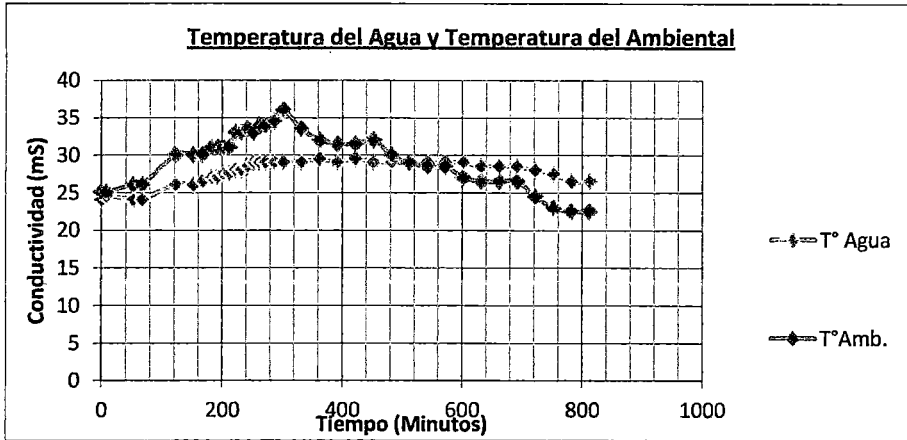
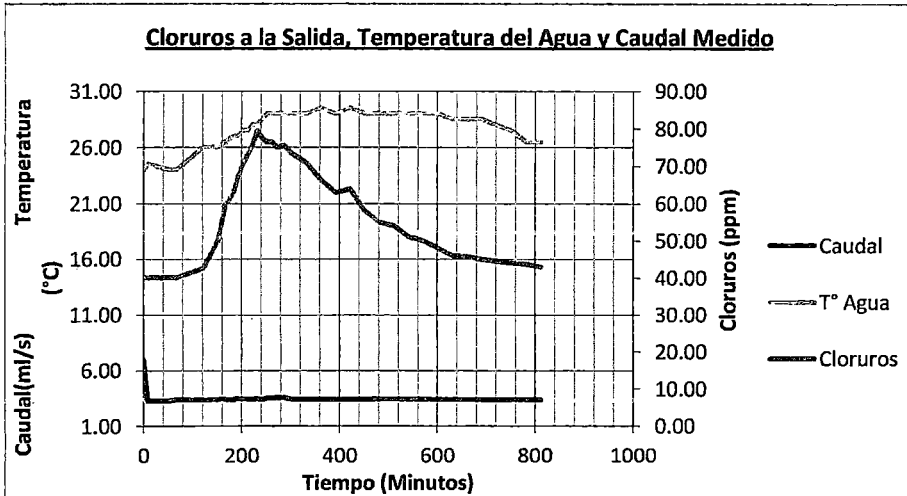


Grafico IV.139.



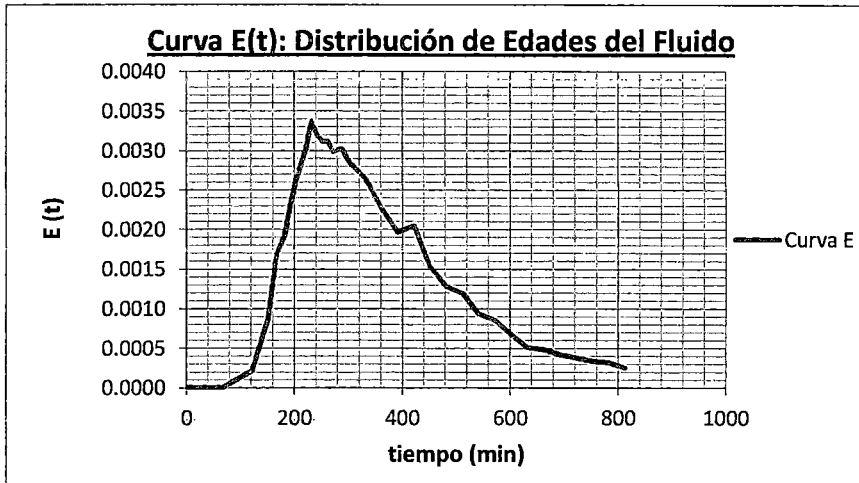
Del se observa que el pico de caudal al inicio del ensayo corresponde a la aplicación del trazador, luego el caudal se mantiene constante con mínimas variaciones.

La temperatura del agua varía suavemente a lo largo de la prueba y tiene un descenso significativo en  $t=600$  min (5:30 pm). Los cloruros mantienen un comportamiento de Curva Gauss con pequeñas variaciones como el segundo pico encontrado en  $t=400$  min, además la curva de cloruros presenta una rama descendente alargada.

## H. CURVA E, F y 1-F

### Curva E: Distribución de Edades del Fluido

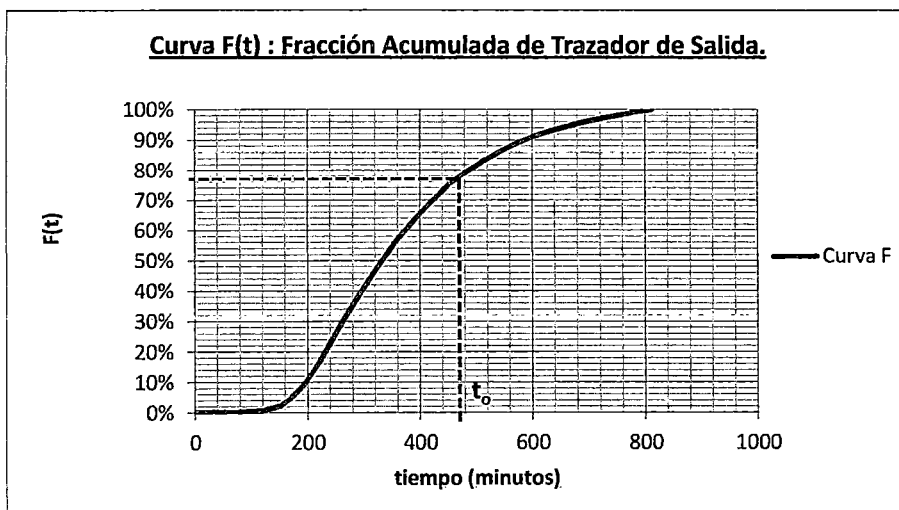
Grafico IV.140.



El Grafico IV.140. muestra la curva de Distribución de Edades del Fluido , que nos indica la distribución del tiempo de residencia de cada fracción del fluido.

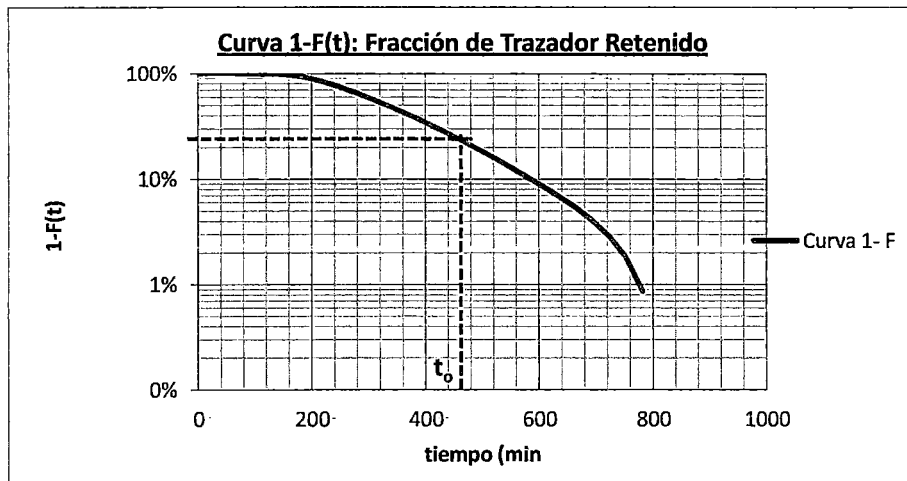
### Curva F: Fracción Acumulada de Trazador de Salida y Curva 1-F:Fracción de Trazador Retenido

Grafico IV.141.



El Grafico IV.141. muestra la Curva  $F(t)$  que representa la fracción acumulada de trazador a la salida del reactor a un tiempo determinado, donde se observa que el 79% del trazador tiene un tiempo de permanencia en el reactor menor de 7.88 horas.

Grafico IV.142.



En el Grafico IV.142. que muestra la Curva  $1-F(t)$  que representa la fracción de trazador retenida en el reactor a un tiempo determinado, se indica que el porcentaje del flujo que tiene un tiempo de permanencia de por lo menos 7.88 horas (correspondiente al tiempo teorico) es 21%.

## I. ANALISIS DE LA CURVA TENDENCIA (CURVA DE GAUSS)

### Parámetros :

$t_i$  : 122.00 min.

**2.03 horas**

$t_p$  : 232.00 min.

**3.87 horas**

$t_m$  : 375.41 min.

**6.26 horas**

$t_o$  : 472.58 min.

**7.88 horas**

$t_c$  : 276.25 min.

**4.60 horas**

### Análisis del Flujo :

#### CRITERIO Y VALOR

#### ANALISIS

$$t_m = 6.26 \text{ horas}$$

El Tiempo Real de Retención Hidraulico o Tiempo Medio es 6.26 horas

$$t_i/t_o = 0.26$$

El valor de  $t_i/t_o$  menor a 0.30 indica que hay presencia de grandes cortocircuitos.

$$t_m/t_o = 0.79$$

El valor de  $t_m/t_o$  es cercano a 1, lo que indica que el tiempo de retención teórico es muy parecido al tiempo de retención real.

$$t_p/t_o = 0.49$$

El valor de  $t_p/t_o$  es 0.47, indica que la mayor concentración a la salida del reactor se presenta aproximadamente al 60% del tiempo teórico.

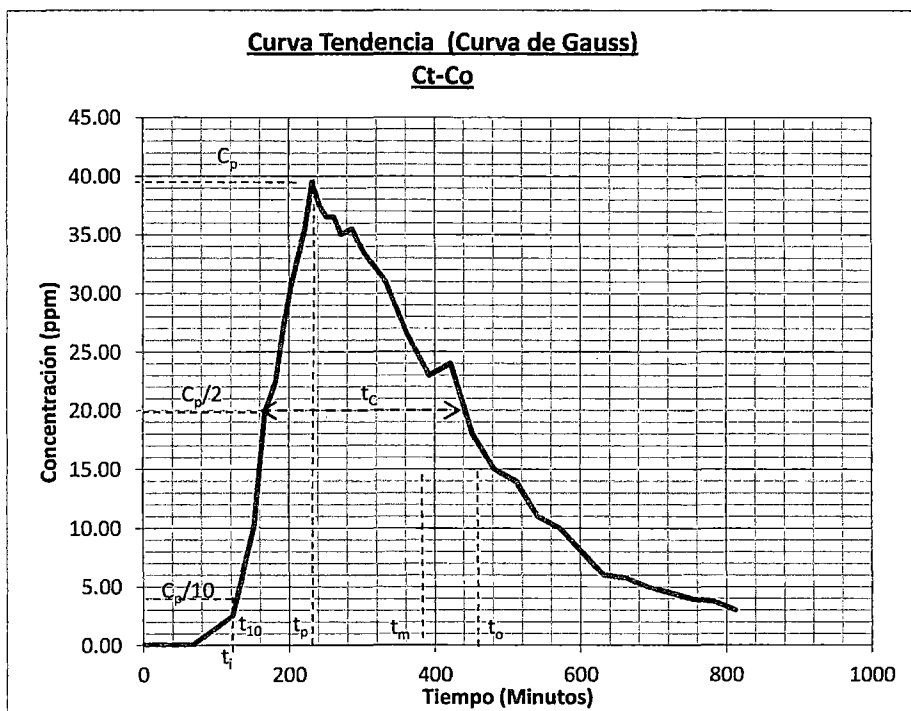
$$t_c/t_o = 0.58$$

El valores de  $t_c/t_o$  son indicadores del fenómeno de difusión. Además indican que no existe presencia de flujo mezclado ideal.

Entonces, de las relaciones arriba indicadas:

El tiempo medio de retención es 6.26 horas y el tiempo de retención teórico es cercano al tiempo medio de residencia a pesar de la existencia de grandes cortocircuitos, esto se debe a que hay zonas donde el trazador queda retenido para luego salir lentamente, alargando la rama descendente de la grafica y desplazando el tiempo medio (centro de gravedad) hacia la derecha.

Grafico IV.143.



Donde:

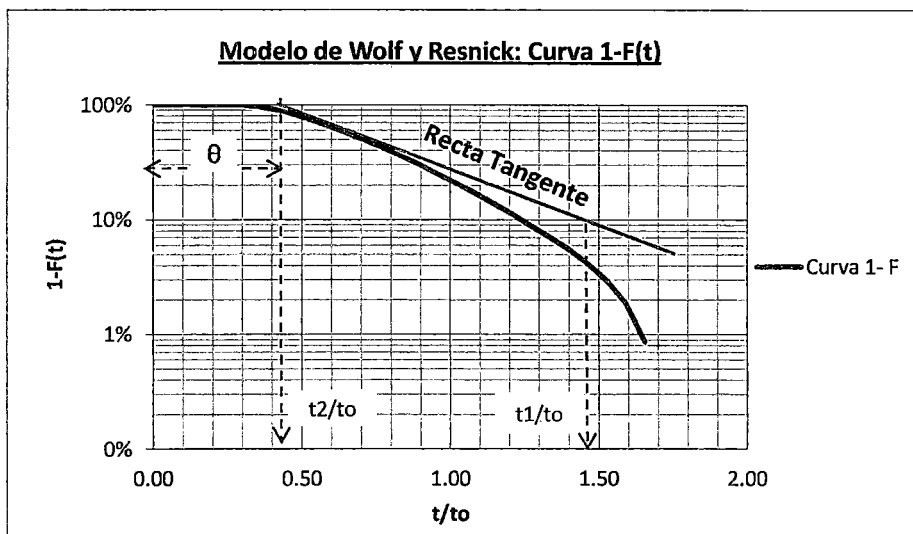
- $C_p$  : Concentración Máxima
- $t_i$  : tiempo en el que empieza a salir el trazador.
- $t_p$  : tiempo para  $C_p$
- $t_m$  : tiempo medio (Tiempo medio de Retención)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$
- $t_o$  : tiempo de retención teórico.

### J. MODELO SIMPLIFICADO DE LA TEORIA DE WOLF Y RESNICK

Del Grafico IV.144. se encuentra que :

$$\begin{aligned} \theta &= 0.480 \\ \text{Además:} \quad t_1/t_0 &= 1.350 \\ t_2/t_0 &= 0.480 \\ \text{Tan } \alpha &= 1.149 \end{aligned}$$

Grafico IV.144.



Entonces el porcentaje de Flujo Pistón (p) será:

$$p = 55.95\%$$

El porcentaje de Zonas Muertas es:

$$m = 14.22\%$$

Y el porcentaje de Flujo Mezclado es:

$$M = 29.83\%$$

Los resultados del modelo de Wolf-Resnick indica predominio de flujo pistón con 55.95% y flujo mezclado 29.83% con presencia de zonas muertas en el centro del reactor, donde el trazador se acumula y sale lentamente (Zona muerta negativa 14.22 %).

**K. MODELOS MATEMATICOS PARA FLUJO NO IDEAL****1) Modelo de Dispersión Axial**

Usando la hipótesis:  $D/uL$  pequeño (menor a 0.01)

Hallando el Tiempo Medio ( $t_m$ ) :

$$t_m = 375.41 \text{ min.}$$

$$t_m = 6.26 \text{ horas}$$

Hallando la varianza de la curva E:

$$\sigma^2 = \frac{280508896.8 \text{ min}^2}{11728.125 \text{ min}}$$

$$\sigma^2 = 6.64 \text{ horas}^2$$

Se procede a Normalizar la Varianza ( Varianza de la Curva  $E_\theta$ ):

$$\sigma_\theta^2 = 0.1697$$

El valor de la Dispersión del Recipiente se halla mediante iteraciones de la siguiente expresión, según el marco teórico. Asumimos que el valor de  $D/uL$  es mayor a 0.01 y usaremos la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 * (1 - e^{-\left(\frac{uL}{D}\right)})$$

Mediante iteraciones se obtiene :

$$\sigma_\theta^2 = 0.1698$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) = 0.0937 \quad \text{El valor de } D/uL \text{ es mayor a 0.01.}$$

Un valor de  $D/uL$  mayor a 0.01 indica un grado de dispersión alto, que se traduce en una curva E ancha y asimétrica, no cumpliendo con la hipótesis ( $D/uL$  menor a 0.01).

Para valores de  $D/uL$  mayores a 0.01 no existe expresión matemática para la construcción de la curva lógica por lo cual este Modelo Matemático no puede utilizarse para el ajuste de la Curva Tendencia.



## 2) Modelo de Tanques en Serie

$$E_{(\theta)} = \frac{N(N * \theta)^{N-1}}{(N - 1)!} * e^{-N*\theta}$$

Donde :

$N$  : Número de Compartimentos

$\theta_i = \frac{t_i}{t_m}$  : Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)

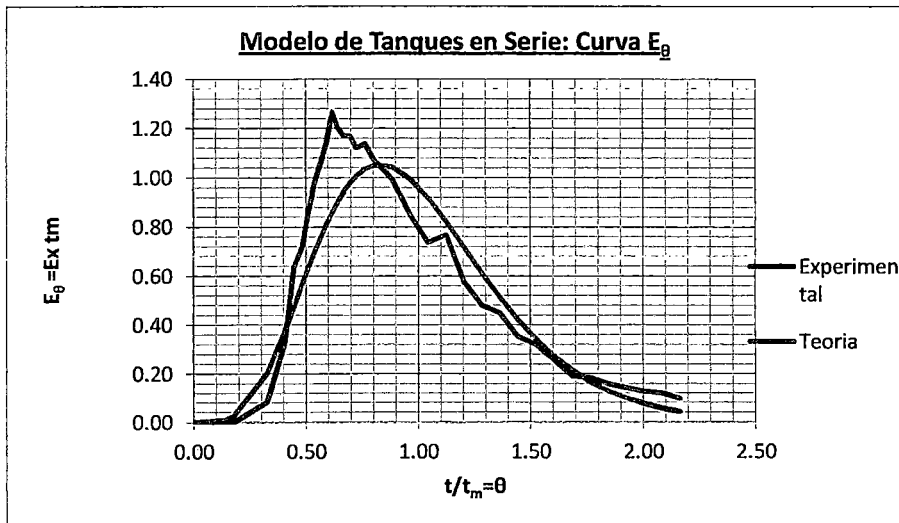
Además:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{1}{N}$$

Entonces:

$$N = 6$$

Grafico IV.145.



El Grafico IV.145. representa la curva analítica del modelo de Tanques en Serie. Esta curva es ancha y simétrica, además la parte final de la curva analítica presenta un comportamiento muy similar a la curva experimental, sin embargo en la parte inicial, las curvas no presentan comportamientos similares.

### 3) Modelo de Convección para Flujo Laminar

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux}$$

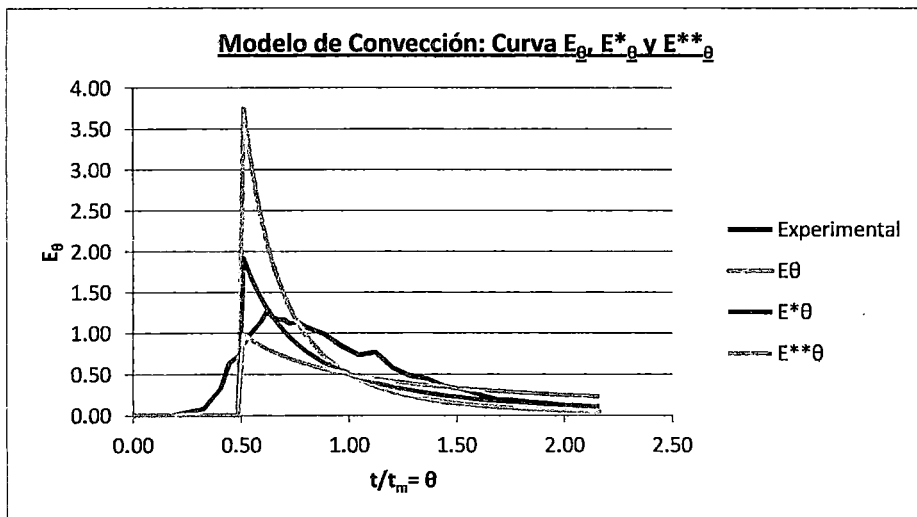
$$E^*_{\theta} = \frac{1}{2\theta^2} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano}$$

$$E^{**}_{\theta} = \frac{1}{2\theta} \quad \text{para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano}$$

Donde:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad \text{Tiempo Normalizado (se usa en la Curva E Normalizada)}$$

Grafico IV.146.

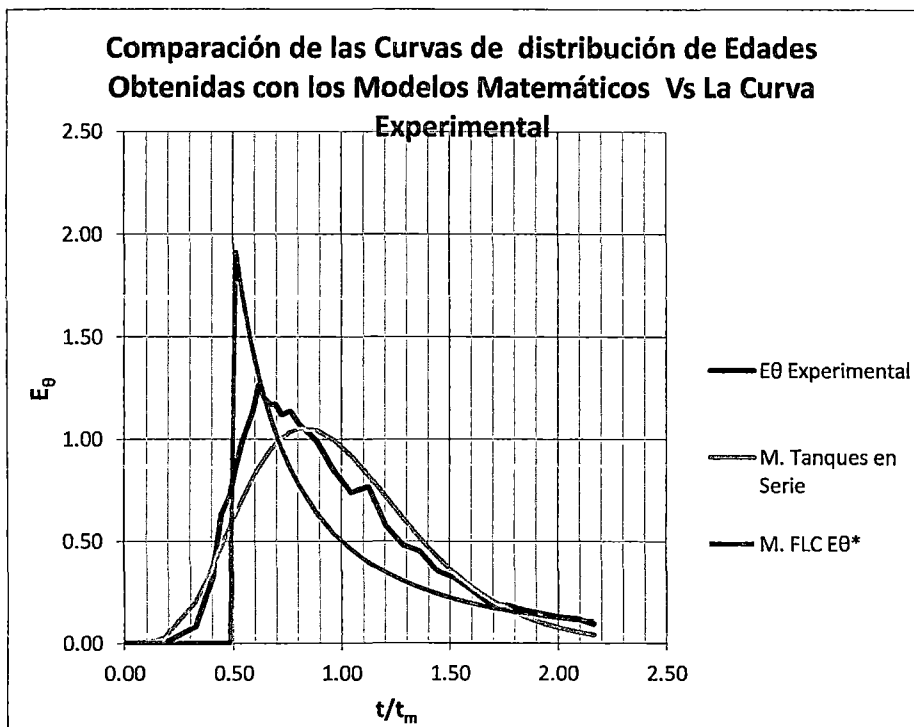


Del Grafico IV.146. se observa que efectivamente la curva  $E^*$  es la que más se aproxima a la curva experimental, sin embargo, este modelo no se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental.

### L. COMPARACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS.

A continuación se realiza la comparación de las curvas analíticas obtenidas por los modelos matemáticos y la curva experimental. Cabe señalar que el modelo de Dispersión Axial no será comparado debido a que no existe una expresión matemática para la elaboración de la curva analítica.

Grafico IV.147.



Del Grafico IV.147. se observa que ninguno de los modelos matemáticos utilizados es una representación adecuada para la curva experimental del Ensayo N°14, además se observa que el comportamiento de la curva experimental es una combinación entre el modelo de Convección para Flujo Laminar al inicio y Tanques en Serie al final de la curva.

**G. SEGUNDO GRUPO:****DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl**

Este ítem muestra los resúmenes de los resultados obtenidos en el Análisis de la Curva Tendencia y el Modelo de Wolf y Resnick de los Ensayos de Trazadores con NaCl, la comparación y discusión de los mismos.

**1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl EN AUSENCIA DEL MANTO DE LODOS****a) ANÁLISIS DE LA CURVA TENDENCIA**

El análisis de la Curva tendencia es un método muy utilizado para determinar el comportamiento hidráulico de un reactor (Ver Capítulo II "Marco Teórico" G. "Análisis de la Curva Tendencia"), A continuación se presenta el resumen de los resultados de los nueve (09) Ensayos de Trazadores con NaCl en ausencia del Manto de Lodos y la discusión de los mismos.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Sin Manto de Lodos						
Nº Ensayo	$Q_p$ (ml/s)	$t_i$ (min)	$t_p$ (min)	$t_o$ (min)	$t_m$ (min)	$t_c$ (min)
01	2.48	390	675	649	929	500
02	2.58	365	665	624	886	491
Prom.	2.53	378	670	637	908	495
03	3.71	240	475	434	716	359
04	3.57	250	495	452	715	257
05	3.73	360	480	432	765	335
06	3.56	285	475	453	736	313
07	3.25	235	515	495	747	347
08	3.61	300	485	447	713	261
09	3.33	300	520	485	706	278
Prom.	3.54	281	492	457	728	307

*Cuadro IV.3.- Cuadro resumen de parámetros obtenidos para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos*

Dónde :

- $Q_p$  : caudal promedio (ml/s)
- $t_i$  : tiempo en que empieza a salir el trazador.(minutos)
- $t_p$  : tiempo modal , para la concentración máxima (minutos)
- $t_o$  : tiempo de retención hidráulico teórico
- $t_m$  : tiempo medio o tiempo medio de residencia (minutos)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$  (minutos)

Del Cuadro IV.3 se observa que existen dos grupos diferenciados claramente por el valor de los caudales promedios, en donde el primer grupo presenta caudales entre 2.48 y 2.58 ml/s y el segundo grupo caudales entre 3.25 y 3.73 ml/s.

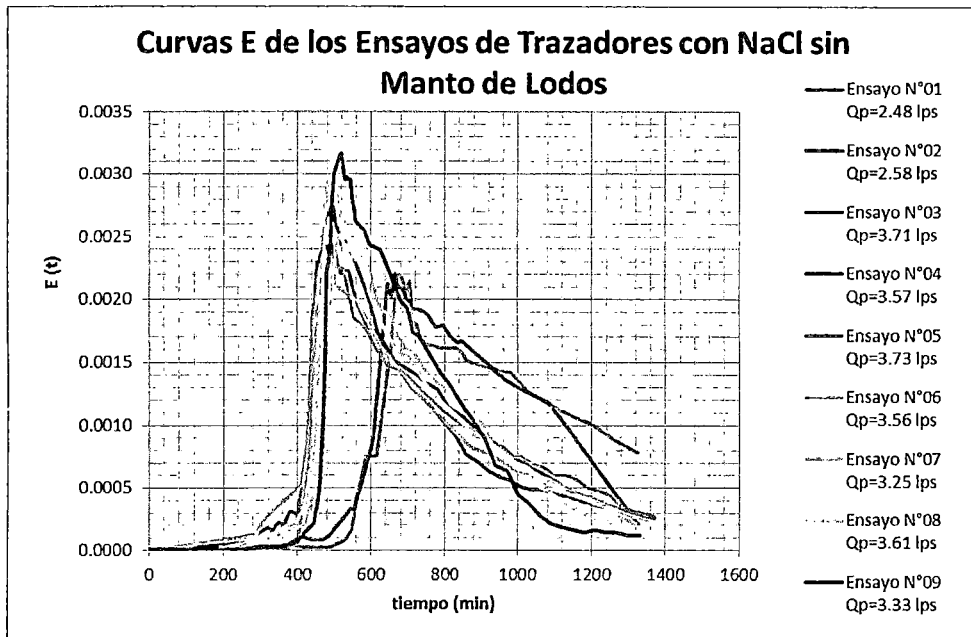
Se observa, además, que una disminución en el caudal promedio ( $Q_p$ ) en 29% en promedio ocasiona que el tiempo medio de residencia aumente en 24%, los tiempos en que el trazador empieza a salir se vean aumentados en promedio en 34% y el tiempo modal (tiempo para la mayor concentración) en 36% que son los valores indicadores del tipo de flujo existente en el reactor piloto UASB. Además el valor de " $t_c$ ", que está directamente relacionado con el fenómeno de difusión, es mayor para las curvas con caudales menores, indicando que cuando el caudal promedio es menor, el fenómeno de difusión se ve incrementado.

Cabe resaltar que el promedio de los tiempos medios de residencia, de los ensayos con caudal promedio cercanos a 3.43ml/s, es 728 minutos o 12 horas y 8 minutos.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Sin Manto de Lodos					
Nº Ensayo	$Q_p$ (ml/s)	$t_i/t_o$	$t_p/t_o$	$t_m/t_o$	$t_o/t_o$
01	2.48	0.60	1.04	1.43	0.77
02	2.58	0.58	1.07	1.42	0.79
Prom.	2.53	0.59	1.05	1.43	0.78
03	3.71	0.55	1.09	1.65	0.83
04	3.57	0.55	1.10	1.58	0.57
05	3.73	0.83	1.11	1.77	0.78
06	3.56	0.63	1.05	1.63	0.69
07	3.25	0.47	1.04	1.51	0.70
08	3.61	0.67	1.09	1.60	0.58
09	3.33	0.62	1.07	1.46	0.57
Prom.	3.54	0.62	1.08	1.60	0.67

*Cuadro IV.4.- Cuadro resumen de las relaciones de los parámetros para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos*

Del Cuadro IV.4, se observa que pese a la variación en el caudal promedio entre los dos grupos (del orden de 30%), las relaciones  $t_i/t_o$  y  $t_p/t_o$  se mantienen casi inalteradas, permaneciendo en un rango similar en ambos grupos (variación del orden de 5 y 3% en promedio respectivamente), mientras que la relación  $t_m/t_o$  varía en promedio un 11% (presentando 1.43 para un caudal promedio de 2.53ml/s frente a 1.60 para un caudal promedio de 3.54ml/s), además se infiere que el flujo predominante es el flujo pistón ( $t_i/t_o$  mayor a 0.5 y  $t_p/t_o$  cercano a 1) y que existen zonas donde el trazador se queda retenido para luego salir lentamente (zonas muertas), alargando la región descendente de la curva tendencia.



*Figura IV.10.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos*

Del Figura IV.10 se observa que una disminución en el caudal promedio se ve traducida en un retraso en la aparición de la curva E y un desplazamiento hacia la derecha en el eje de tiempo y además en un descenso más lento de la concentración (región descendente de la curva) a la salida del reactor debido al mayor grado de difusión.

#### **b) ANÁLISIS DEL MODELO SIMPLIFICADO DE WOLF Y RESNICK**

El Modelo de Wolf y Resnick es un método muy utilizado para la determinación de los porcentajes de Flujo Pistón, Flujo Mezclado y Zonas Muertas en un Reactor (Ver Capítulo II "Marco Teórico" H. "Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf y Resnick"), a continuación se presenta los resultados de los análisis de los nueve (09) Ensayos de Trazadores con NaCl en ausencia del Manto de Lodos.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Sin Manto de				
N° Ensayo	Q <sub>p</sub> (ml/s)	% de Flujo		Zonas
		Piston	Mezclado	Muertas
01	2.48	64.95%	35.05%	-52.42%
02	2.58	63.99%	36.01%	-53.15%
Prom.	2.53	64.47%	35.53%	-52.79%
03	3.71	55.79%	44.21%	-73.87%
04	3.57	57.96%	42.04%	-67.35%
05	3.73	60.27%	39.73%	-82.53%
06	3.56	54.32%	45.68%	-73.04%
07	3.25	65.56%	34.44%	-60.15%
08	3.61	61.34%	38.66%	-66.27%
09	3.33	68.73%	31.27%	-52.77%
Prom.	3.54	60.57%	39.43%	-68.00%

*Cuadro IV.5.- Cuadro resumen de porcentajes de flujos de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos*

Del Cuadro IV.5 se observa que existen dos grupos diferenciados por el valor de los caudales promedios, en donde el primer grupo presenta caudales entre 2.48 y 2.58 ml/s y el segundo grupo caudales entre 3.25 y 3.73 ml/s.

En el primer grupo el porcentaje de flujo pistón es en promedio 64.47% y el porcentaje de flujo mezclado es en promedio 35.53%, con porcentaje de zonas muertas negativas, lo que indica estancamiento del trazador en el centro del reactor, que origina una curva asimétrica y con una rama descendente alargada como se puede apreciar el en Figura IV.10.

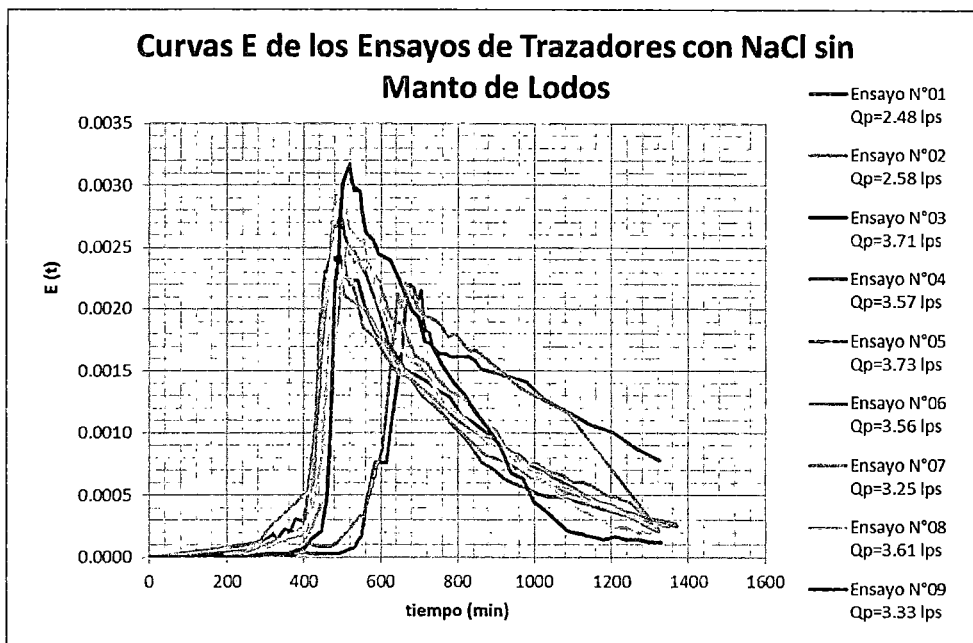
En el segundo grupo el porcentaje de flujo pistón es en promedio 60.57% y el porcentaje de flujo mezclado es en promedio 39.43%, con porcentaje de zonas muertas negativas, lo que indica estancamiento del trazador en el centro del reactor, que origina una curva asimétrica y con una rama descendente alargada como se puede apreciar el en Figura IV.10.

Ambos grupos tienen porcentajes similares de flujo pistón y flujo mezclado, con variaciones mínimas por lo que se puede afirmar que existe un porcentaje de flujo pistón del orden de 60% y un porcentaje de flujo mezclado de 40%, dando además la impresión que la variación de caudal con la que se ha trabajado, no



afecta en gran medida a los tipos de flujo que se presentan en el interior del reactor piloto UASB.

**c) COMPARACION DE LAS CURVAS TENDENCIAS CON EL MODELO DE COMPARTIMENTOS**



*Figura IV.11.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos*

En la Figura IV.11 se muestran las Curvas de Distribución de Edades del Fluido o Curvas E de los nueve (09) ensayos de trazadores con NaCl correspondientes a esta sección, que se presentan con la finalidad de hacer la comparación con las Curvas E correspondientes al Modelo de Compartimentos y determinar por este método, el tipo de flujo que se produce en el interior del reactor piloto UASB cuando este se encuentra en ausencia del manto de lodos.

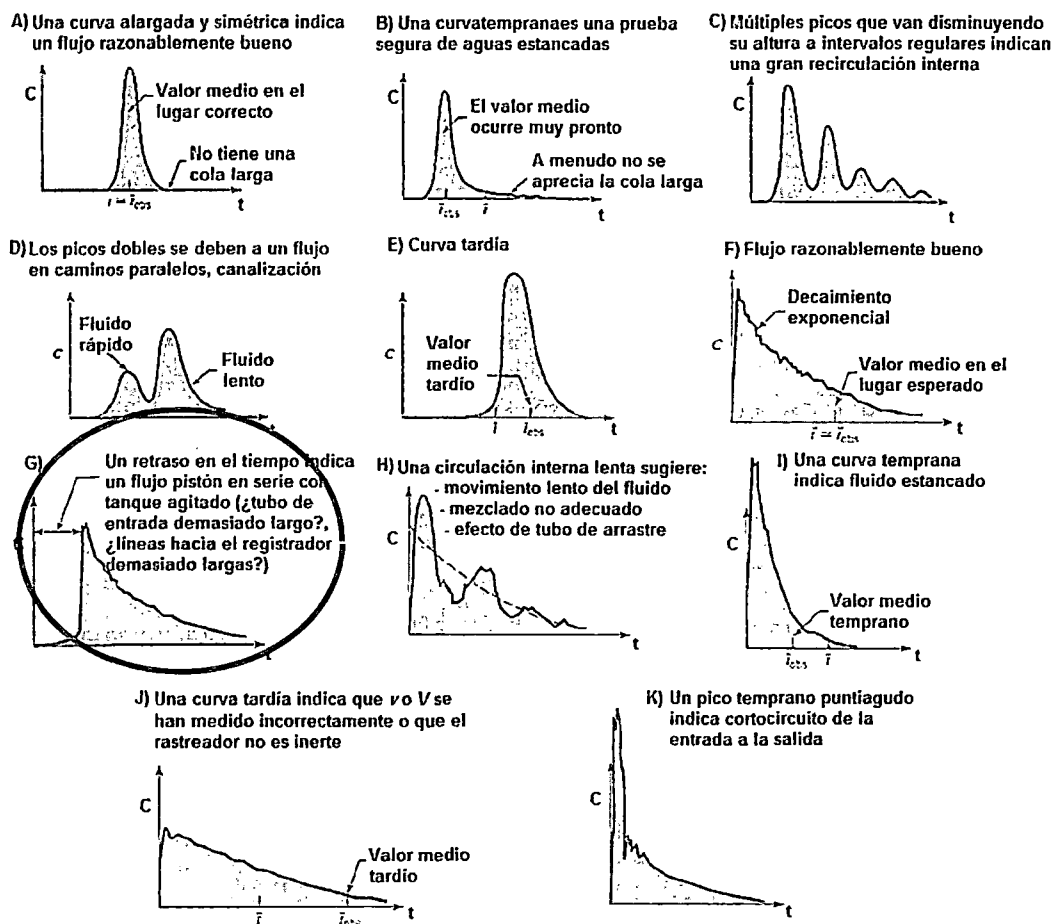
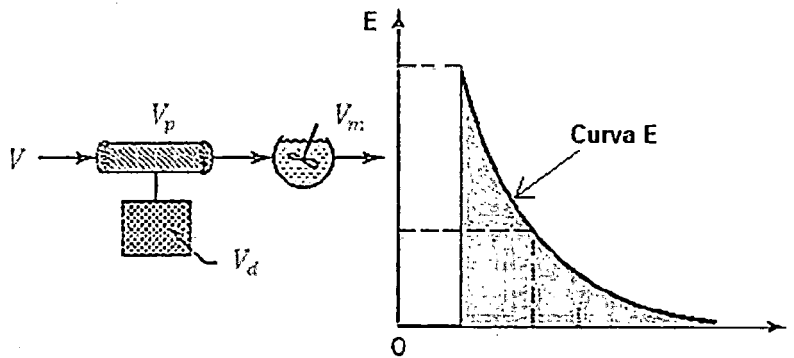


Figura IV.12.- Curvas de distribución típicas del Modelo de Compartimentos

De la comparación de las curvas E obtenidas en los nueve ensayos, mencionadas en el párrafo anterior, con las curvas de flujo típicos del Modelo de Compartimentos (Figura IV.12), se indica que un retraso en la aparición de la curva E indica un flujo pistón en serie con mezcla completa (curva de flujo típica G), además una región descendente larga en la curva es prueba de zonas estancadas donde el trazado ingresa para luego salir lentamente.



Donde:

$V$  Volumen Total

$V_p$  Región flujo pistón

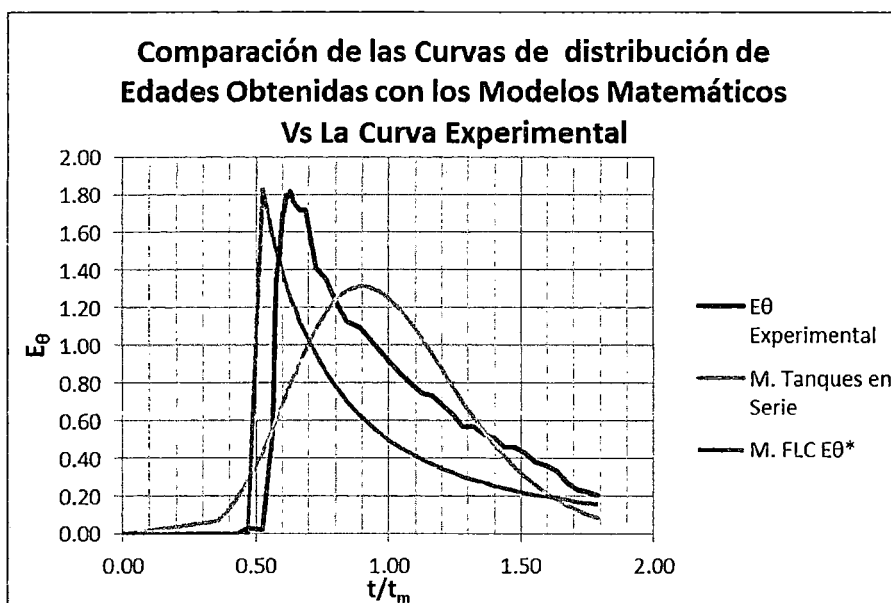
$V_m$  Región flujo mezcla perfecta

$V_d$  Región muerta o estancada dentro del recipiente

*Figura IV.13.- Curva E para reactor de modelo de compartimentos de flujos pistón y mezcla completa con zonas muertas*

Además, la Figura IV.18 muestra la configuración que mejor se ajusta a las curvas experimentales obtenidas, esta configuración indica que existe una fracción del fluido trabaja a flujo pistón en serie con una fracción a mezcla completa y una fracción que representa a las zonas muertas, este modelo no contempla los flujos intermedios, ni el fenómeno de difusión molecular.

**d) COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE EDADES OBTENIDAS CON LOS MODELOS MATEMÁTICOS CON LA CURVA EXPERIMENTAL**



*Figura IV.14.- Comparación de la Curva Experimental con los Modelos Matemáticos: Ensayo de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodo.*

El Figura IV.14 representa la tendencia encontrada en la comparación de las curvas experimentales con las curvas analíticas de los modelos matemáticos comparados, de donde se observa que ninguno de los dos modelos se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental, sin embargo en una etapa temprana (región ascendente de la curva) el comportamiento de la curva experimental es similar a la curva obtenida por el modelo de Convección para Flujo Laminar, mientras que en la rama descendente de la curva el comportamiento de la curva experimental se aproxima al modelo de Tanques en Serie.

El modelo matemático de Dispersión Axial no pudo ser aplicado por no existir una expresión matemática para la construcción de la curva analítica para un grado de dispersión alto (valor de  $D/uL$  mayor de 0.01), por lo que en la Figura

IV.14 solo se observan los modelos matemáticos de Tanques en Serie y Convección para Flujo Laminar.

## 2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES CON NaCl EN PRESENCIA DEL MANTO DE LODOS

### a) ANÁLISIS DE LA CURVA TENDENCIA

El análisis de la Curva tendencia es un método muy utilizado para determinar el comportamiento hidráulico de un reactor (Ver Capítulo II "Marco Teórico" G. "Análisis de la Curva Tendencia"), A continuación se presenta el resumen de los resultados de los cinco (05) Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia del Manto de Lodos agrupados en tres (3) acomodamientos de manto de lodos y la discusión de los mismos.

El ensayo N°10 fue realizado con un manto de lodos, que luego fue removido y sustituido para realizar los ensayos N°11 y N°12 que al finalizados, se removió y sustituyo nuevamente el manto de lodos para los ensayos N°13 y N°14.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Con Manto de Lodos						
N° Ensayo	$Q_p$ (ml/s)	$t_i$ (min)	$t_p$ (min)	$t_o$ (min)	$t_m$ (min)	$t_c$ (min)
10	4.03	203	248	400	390	270
Prom.	4.03	203	248	400	390	270
11	3.46	130	265	466	427	338
12	3.38	80	300	477	430	303
Prom.	3.42	105	283	471	429	320
13	3.53	74	214	456	373	215
14	3.41	122	232	473	375	276
Prom.	3.47	98	223	464	374	246

*Cuadro IV.6.- Cuadro resumen de los parámetros obtenidos para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos*

En el Cuadro IV.6 se muestra que el segundo y tercer grupo poseen caudales muy similares, pero con diferentes acomodamientos del manto de lodos y se observan marcadas diferencias en los tiempos medios de residencia ( $t_m$ ) y los

tiempos modales ( $t_p$ ) relacionados con el tipo de flujo existente y en el parámetro  $t_c$ , que está relacionado con el grado de difusión.

Además los tiempos en que el trazador empieza a salir son diferentes a pesar de que los mantos de lodos tienen alturas similares, esto se debe a que dentro del manto de lodos se forman canalizaciones por donde circula el fluido.

Se observa que el acomodamiento del manto de lodos tiene un efecto directo sobre el tiempo medio de residencia, además el promedio de los tiempos medios de residencia ( $t_m$ ), de los ensayos con caudal cercano a 3.43ml/s, es 400 minutos o 6 horas con 40 minutos.

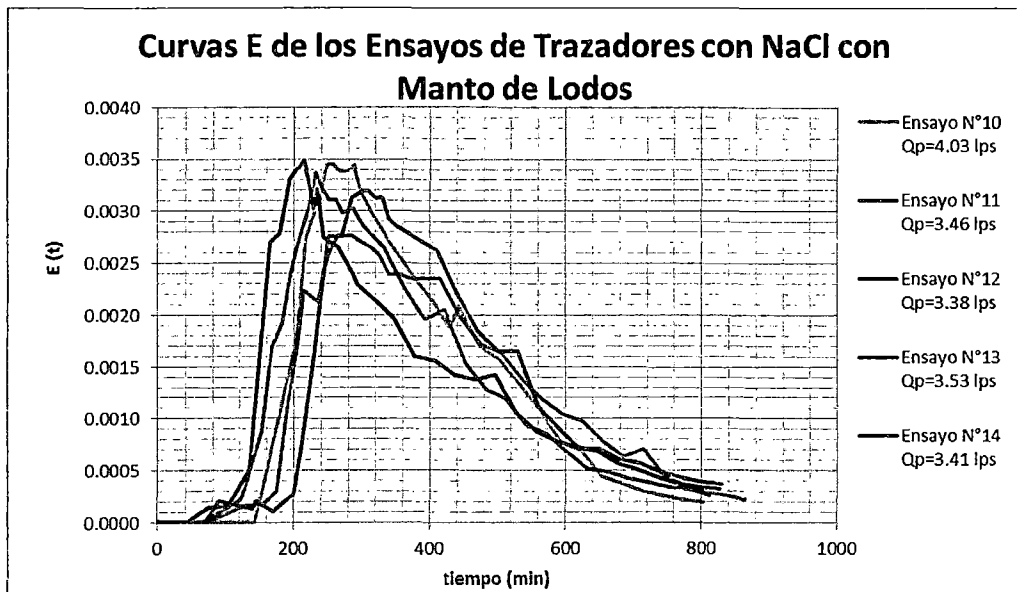
Ensayo de Trazadores con NaCl - Con Manto de Lodos					
Nº Ensayo	$Q_p$ (ml/s)	$t_i/t_o$	$t_p/t_o$	$t_m/t_o$	$t_c/t_o$
10	4.03	0.51	0.62	0.98	0.67
Prom.	4.03	0.51	0.62	0.98	0.67
11	3.46	0.28	0.57	0.92	0.73
12	3.38	0.17	0.63	0.90	0.64
Prom.	3.42	0.22	0.60	0.91	0.68
13	3.53	0.16	0.47	0.82	0.47
14	3.41	0.26	0.49	0.79	0.58
Prom.	3.47	0.21	0.48	0.81	0.53

*Cuadro IV.7.- Cuadro resumen de las relaciones de parámetros para el análisis de la curva tendencia de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos*

Dónde :

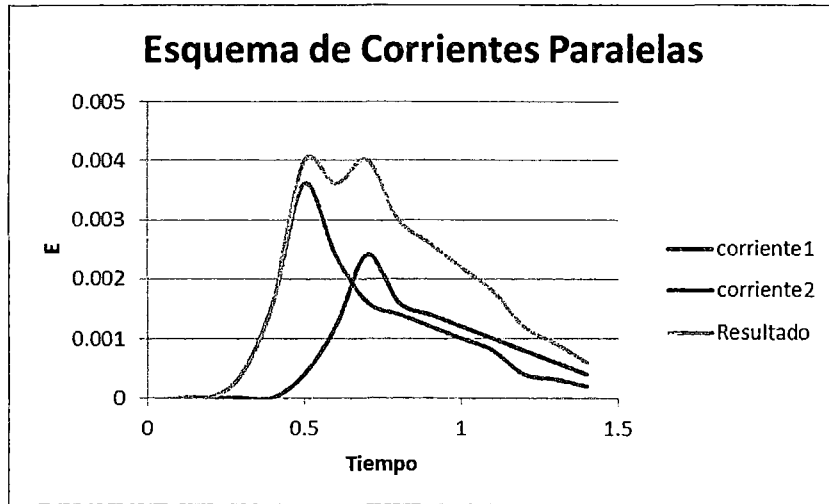
- $Q_p$  : caudal promedio (ml/s)
- $t_i$  : tiempo en que empieza a salir el trazador.(minutos)
- $t_p$  : tiempo modal , para la concentración máxima (minutos)
- $t_o$  : tiempo de retención teórico
- $t_m$  : tiempo medio o tiempo medio de residencia (minutos)
- $t_c$  : tiempo en el cual la concentración es mayor al 50% de  $C_p$  (minutos)

En el Cuadro IV.7 se aprecian las relaciones típicas del análisis de la curva tendencia, en donde se observa que tanto en el segundo y tercer grupo existen grandes cortocircuitos hidráulicos ( $t_i/t_o$  menor a 0.3) , además  $t_m/t_o$  es menor que la unidad y las curvas tendencias presentan una región descendente alargada (ver Figura IV.15), lo que reafirma la presencia de cortocircuitos en la unidad, mientras que el primer grupo posee una relación  $t_i/t_o$  mayor 0.5 y un valor de  $t_p/t_o$  cercano a la unidad ( $t_p/t_o = 0.98$ ) indicando predominio de flujo pistón, además una región descendente alargada lo que indica cortocircuitos hidráulicos pero en menor proporción que en el segundo y tercer grupo.



*Figura IV.15.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos*

Del Figura IV.15 se observa la influencia que tiene el manto de lodos en el comportamiento hidráulico dentro del reactor piloto UASB, la presencia de picos dobles indica la presencia de flujos paralelos con diferentes tiempos de residencia, originados en el manto de lodos cuando las diferentes fracciones del fluido recorren diferentes caminos en las canalizaciones al interior de dicho manto.



*Figura IV.16.- Esquema de corrientes paralelas*

#### **b) ANÁLISIS DEL MODELO SIMPLIFICADO DE WOLF Y RESNICK**

El Modelo de Wolf y Resnick es un método muy utilizado para la determinación de los porcentajes de Flujo Pistón, Flujo Mezclado y Zonas Muertas en un Reactor (Ver Capítulo II "Marco Teórico" H. "Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf y Resnick"), A continuación se presenta los resultados de los análisis de los cinco (05) Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia del Manto de Lodos.



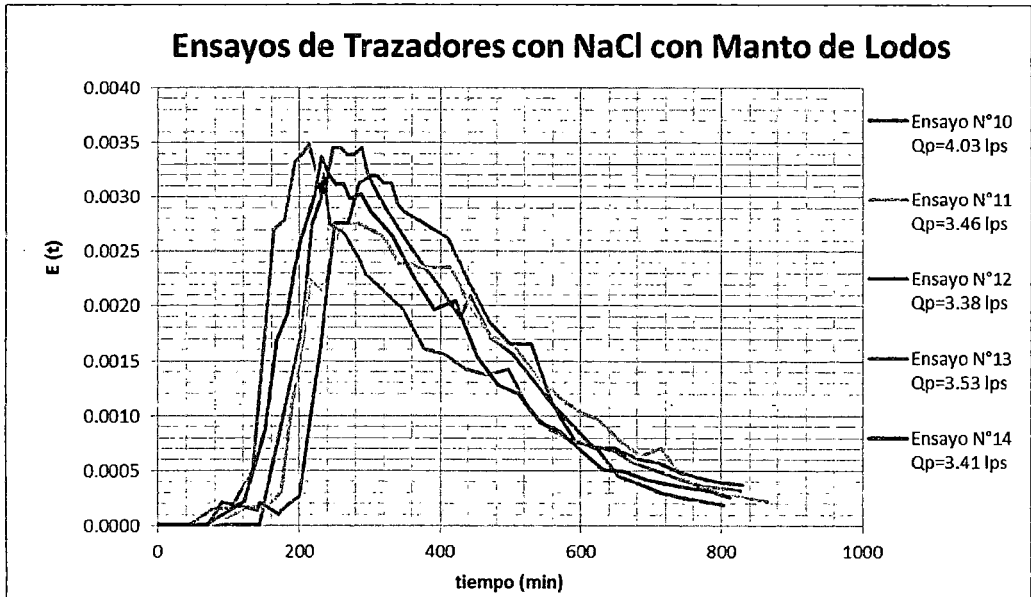
Ensayo de Trazadores con NaCl - Con Manto de				
N° Ensayo	Q <sub>p</sub> (ml/s)	% de Flujo		Zonas Muertas
		Piston	Mezclado	
10	4.03	60.93%	39.07%	-3.39%
Prom.	4.03	60.93%	39.07%	-3.39%
11	3.46	58.18%	41.51%	0.31%
12	3.38	61.39%	33.09%	5.52%
Prom.	3.42	59.78%	37.30%	2.91%
13	3.53	49.35%	39.82%	10.83%
14	3.41	55.95%	29.83%	14.22%
Prom.	3.47	52.65%	34.82%	12.53%

*Cuadro IV.8.- Cuadro resumen de porcentajes de flujos existentes de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos*

El Cuadro IV.8 muestra el resumen de los resultados obtenidos por el Modelo Simplificado de Wolf y Resnick de los cinco ensayos de esta etapa.

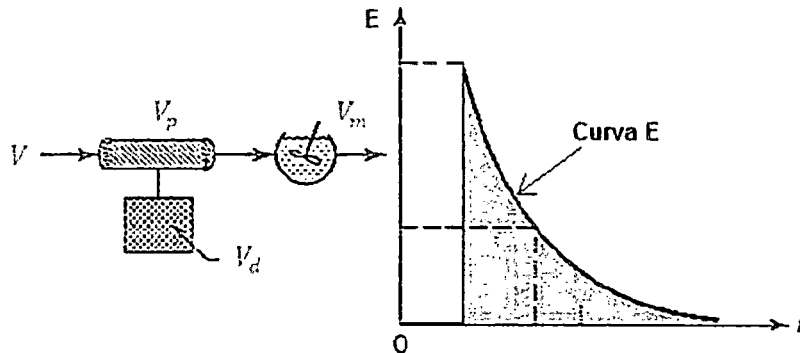
El primer y segundo grupo poseen porcentajes similares con 60.93% de flujo pistón y 39.07% de mezcla completa para el primer grupo y 59.78% de flujo pistón y 37.30% de mezcla completa para el segundo grupo, mientras que el tercer grupo presenta 52.65% de flujo pistón, 34.82% de mezcla completa y 12.53% de espacios muertos, sin embargo se nota que el flujo pistón es el predominante en todos los ensayos en un orden del 60%.

c) COMPARACION DE LAS CURVAS TENDENCIAS CON EL MODELO DE COMPARTIMENTOS



*Figura IV.17.- Curvas E de los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos*

En la Figura IV.17 se muestran las Curvas de Distribución de Edades del Fluido o Curvas E de los cinco (05) ensayos de trazadores con NaCl correspondientes a esta sección, que se presentan con la finalidad de hacer la comparación con las Curvas E correspondientes al Modelo de Compartimentos y determinar por este método, el tipo de flujo que se produce en el interior del reactor piloto UASB cuando este se encuentra en presencia del manto de lodos.



Donde:

$V$  Volumen Total

$V_p$  Región flujo pistón

$V_m$  Región flujo mezcla perfecta

$V_d$  Región muerta o estancada dentro del recipiente

Figura IV.18.- Curva E para reactor de modelo de compartimentos de flujos pistón y mezcla completa con zonas muertas

De las diferentes configuraciones posibles del modelo de compartimentos, la Figura IV.18 muestra la configuración que mejor se ajusta a las curvas experimentales obtenidas, esta configuración indica que existe una fracción del fluido trabaja a flujo pistón en serie con una fracción a mezcla completa y una fracción que representa a las zonas muertas, este modelo no contempla los flujos intermedios, ni el fenómeno de difusión molecular, que en este caso debido a las bajas velocidades ascensionales y a las bajas tasas de tratamiento se ve incrementado.

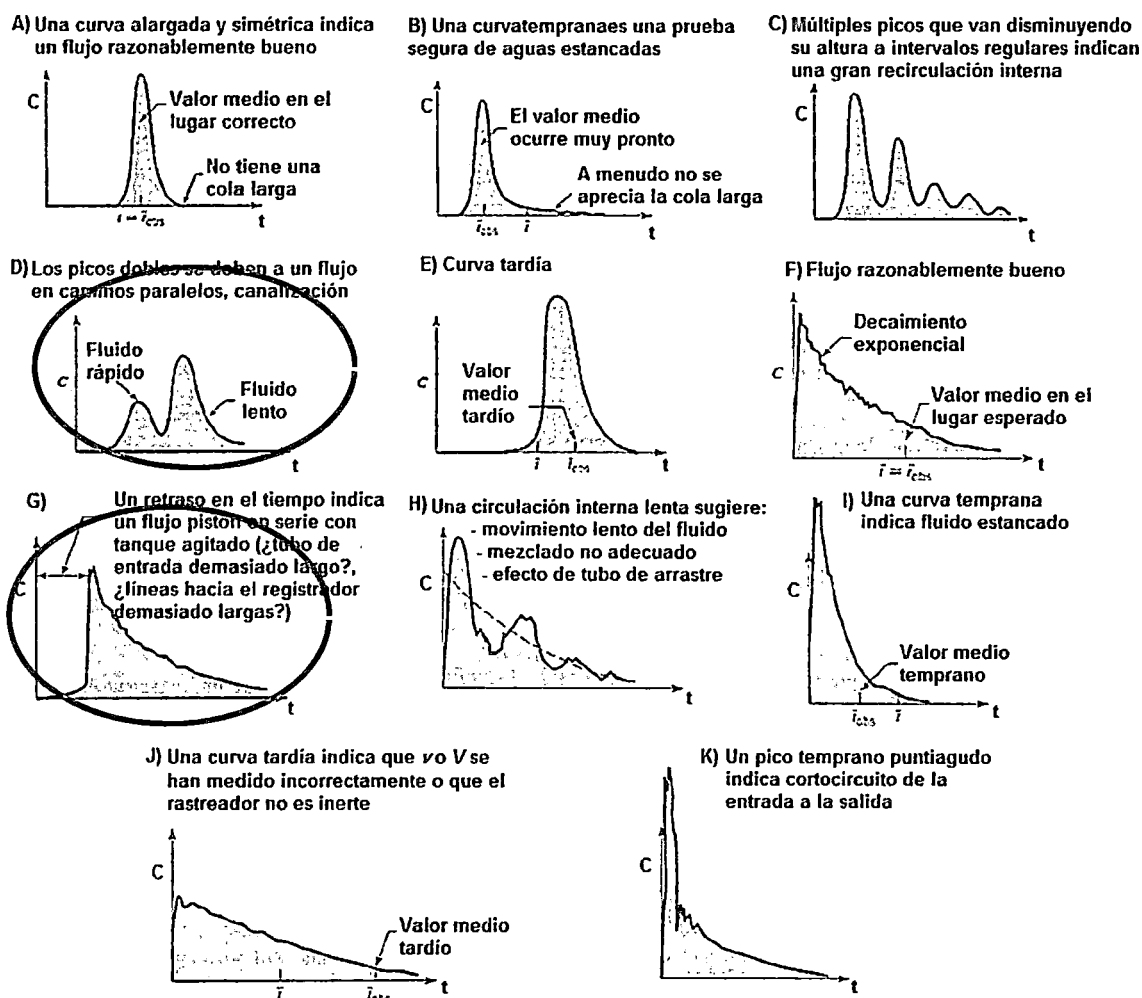


Figura IV.19.- Curvas de distribución típicas del Modelo de Compartimentos

En la Figura IV.19 se ven contempladas las variaciones que sufren los regímenes puros (flujo pistón y mezcla completa). De donde se observa que existe un retraso en el tiempo lo que indica un flujo pistón en serie con mezcla completa (curva típica G), además se aprecia que este modelo explica los dobles picos (curva típica D) como flujos en caminos paralelos o canalización, además una curva con una región descendente larga es prueba de aguas estancadas donde el trazador ingresa y luego va saliendo poco a poco.

d) COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE EDADES OBTENIDAS CON LOS MODELOS MATEMÁTICOS CON LA CURVA EXPERIMENTAL

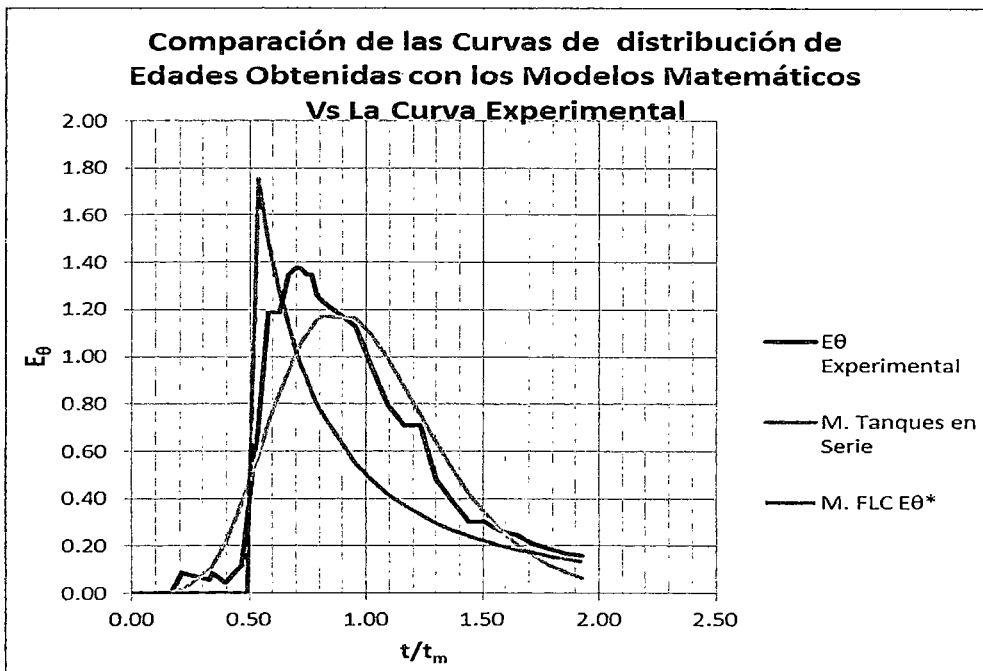


Figura IV.20.- Comparación de la Curva Experimental con los Modelos Matemáticos: Ensayo de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodo.

En la Figura IV.20 representa la tendencia encontrada en la comparación de las curvas experimentales con las curvas analíticas de los modelos matemáticos comparados, de donde se observa que ninguno de los dos modelos se ajusta a la perfección al comportamiento de la curva experimental, donde la curva experimental presenta un comportamiento que indica presencia de flujos paralelos (dobles picos).

Sin embargo en una etapa temprana (región ascendente de la curva) el comportamiento de la curva experimental es similar a la curva obtenida por el

modelo de Convección para Flujo Laminar, por el rápido incremento, mientras que en la rama descendente de la curva el comportamiento de la curva experimental se aproxima al modelo de Tanques en Serie, por el decrecimiento rápido al inicio y luego lento.

El modelo matemático de Dispersión Axial no pudo ser aplicado por no existir una expresión matemática para la construcción de la curva analítica para un grado de dispersión alto (valor de  $D/uL$  mayor de 0.01), por lo que en la Figura IV.20 solo se observan los modelos matemáticos de Tanques en Serie y Convección para Flujo Laminar.

### 3. ANALISIS DE LA CURVA F: TIEMPO DE CONTACTO

El Cuadro IV.9 muestra el % del fluido que permanece en el reactor por un tiempo menor al tiempo teórico y el % del fluido que permanece en el reactor por un tiempo mayor al tiempo teórico.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Sin Manto de Lodos:		
N° Ensayo	% de Flujo	
	menor al tiempo teórico	mayor al tiempo teórico
01	8.95 %	91.05 %
02	9.03 %	90.97 %
Prom.	8.99 %	91.01 %
03	4.99 %	95.01 %
04	8.50 %	91.50 %
05	1.59 %	98.41 %
06	10.72 %	89.28 %
07	8.65 %	91.35 %
08	3.98 %	96.02 %
09	4.93 %	95.07 %
Prom.	6.19 %	93.81 %

*Cuadro IV.9.- Cuadro resumen de los tiempos de permanencia en el reactor, Ensayo de Trazadores con NaCl en Ausencia de manto de lodos.*

Suponiendo que el trazador se mueve dentro del reactor de la misma manera que el fluido, en los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia del manto de lodos, se observa que más del 90% del fluido permanece dentro del reactor durante un tiempo mayor al tiempo de retención teórico.

Ensayo de Trazadores con NaCl - Con Manto de Lodos		
Nº Ensayo	% de Flujo	
	menor al tiempo teórico	mayor al tiempo teórico
10	62.31 %	37.69 %
Prom.	62.31	37.69
11	65.21 %	34.79 %
12	69.50 %	30.50 %
Prom.	67.36	32.65
13	72.30 %	27.70 %
14	79.00 %	21.00 %
Prom.	75.65	24.35

*Cuadro IV.10.- Cuadro resumen de los tiempos de permanencia en el reactor, Ensayos de Trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos.*

En el Cuadro IV.10, ensayos de trazadores con NaCl en presencia del manto de lodos, se observa que más del 60% del fluido permanece dentro del reactor durante un tiempo menor al tiempo de retención teórico y solo una fracción del orden del 30% tiene una permanencia dentro del reactor de por lo menos el tiempo de retención teórico.

#### 4. DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DEL MANTO DE LODOS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

En esta sección la discusión sobre la influencia del manto de lodos en el comportamiento hidráulico del reactor se basará en la comparación de los valores promedio de los ensayos con caudales cercanos a 3.43 ml/s.

Para la obtención de los promedios, en los ensayos en ausencia del manto de lodos se consideraran los ensayos de trazadores con NaCl desde el N°3 hasta el N°9, y en los ensayos en presencia del manto de lodos se tomarán en cuenta los ensayos de trazadores con NaCl desde el N°11 hasta el N°14.

	Sin Manto de Lodos	Con Manto de Lodos
$Q_p$ (ml/s)	3.54	3.45
$t_i$ (min)	281	102
$t_p$ (min)	492	253
$t_o$ (min)	457	468
$t_m$ (min)	728	401
$t_c$ (min)	307	283

*Cuadro IV.11.- Cuadro resumen de los tiempos característicos para el análisis de la Curva Tendencia de los Ensayos de Trazadores con NaCl*

Del Cuadro IV.11, donde se compara los promedios de los tiempos característicos para el análisis de la curva tendencia, se observa que el caudal y el tiempo teórico son muy similares mientras que el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) se ve reducido en aproximadamente el 50% por la presencia del manto de lodos.



	Sin Manto de Lodos	Con Manto de Lodos
$Q_p$ (ml/s)	3.54	3.45
$t_i/t_o$	0.62	0.22
$t_p/t_o$	1.08	0.54
$t_m/t_o$	1.60	0.86
$t_c/t_o$	0.67	0.60

*Cuadro IV.12.- Cuadro resumen de las relaciones para el Análisis de la Curva Tendencia de los Ensayos de Trazadores con NaCl*

Del Cuadro IV.12 se observa que el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) en ausencia del manto de lodos corresponde a 1.60 veces el tiempo de residencia hidráulico teórico ( $t_o$ ) mientras que en presencia del manto de lodos es del orden de 0.86 veces el tiempo de residencia hidráulico teórico ( $t_o$ ).

Los tiempos en que el trazador empieza a salir ( $t_i$ ) también se ven reducidos por la presencia del manto de lodos. Los tiempos modales ( $t_p$ ) se ven reducidos en aproximadamente 50%.

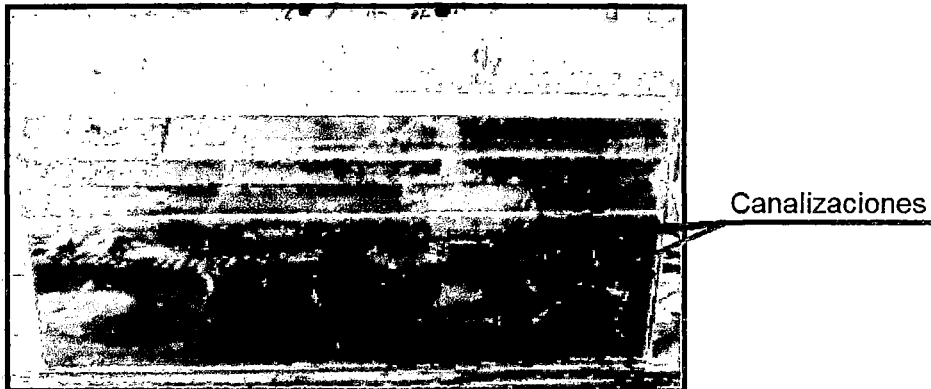
El parámetro  $t_c$  no presenta una reducción significativa por la presencia del manto de lodos, que da a entender que el fenómeno de difusión no se ve afectado en gran medida por la presencia del manto de lodos, pero si se observa diferencias significativas entre sus diferentes acomodamientos.

	Sin Manto de Lodos	Con Manto de Lodos
$Q_p$ (ml/s)	3.54	3.45
% Flujo Pistón	60.57%	56.22%
% Flujo Mezclado	39.43%	36.06%
Zonas Muertas	-68.00%	7.72%

*Cuadro IV.13.- Cuadro resumen de los porcentajes de flujo obtenido por el Modelo Simplificado de Wolf y Resnick de los Ensayos de Trazadores con NaCl.*

De la comparación de los tipos de flujos que se desarrollan en el interior del reactor, que se presenta en el Cuadro IV.13, se observa que el tipo de flujo predominante no cambia por la presencia del manto de lodos, siendo este el flujo pistón con 60%, y además existe la presencia de mezcla completa en el orden del 40% en ausencia de lodos y entre 30% y 40% en presencia del manto de lodos.

En ausencia del manto de lodos, las zonas muertas están representadas por zonas donde el trazador ingresa y sale lentamente alargando la región descendente de la curva experimental (zonas estancadas), sin embargo en presencia del manto de lodos, las zonas muertas están representadas por dos tipos, el primer tipo lo constituyen, al igual que en ausencia del manto de lodos, las zonas estancada y el segundo tipo son las zonas donde el trazador no ingresa, constituido en mayor medida por la parte sólida y floculenta del manto de lodos, donde, según lo observado en los Ensayos de Trazadores con Color, el trazador no ingresa.



*Figura IV.21.- Vista lateral del reactor piloto UASB: Se observan las canalizaciones*

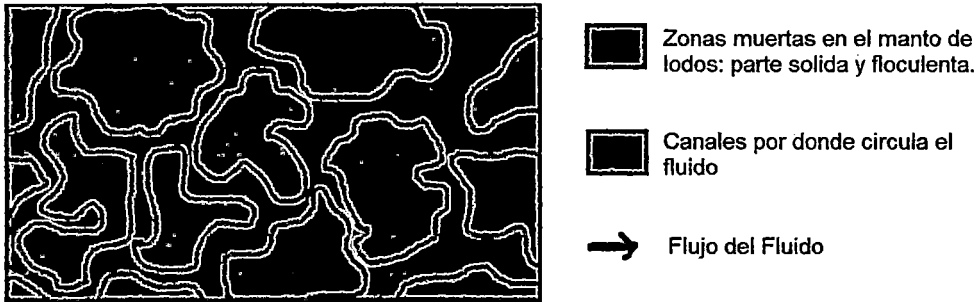


Figura IV.22.- Esquema de la parte sólida y floculenta del manto de lodos.

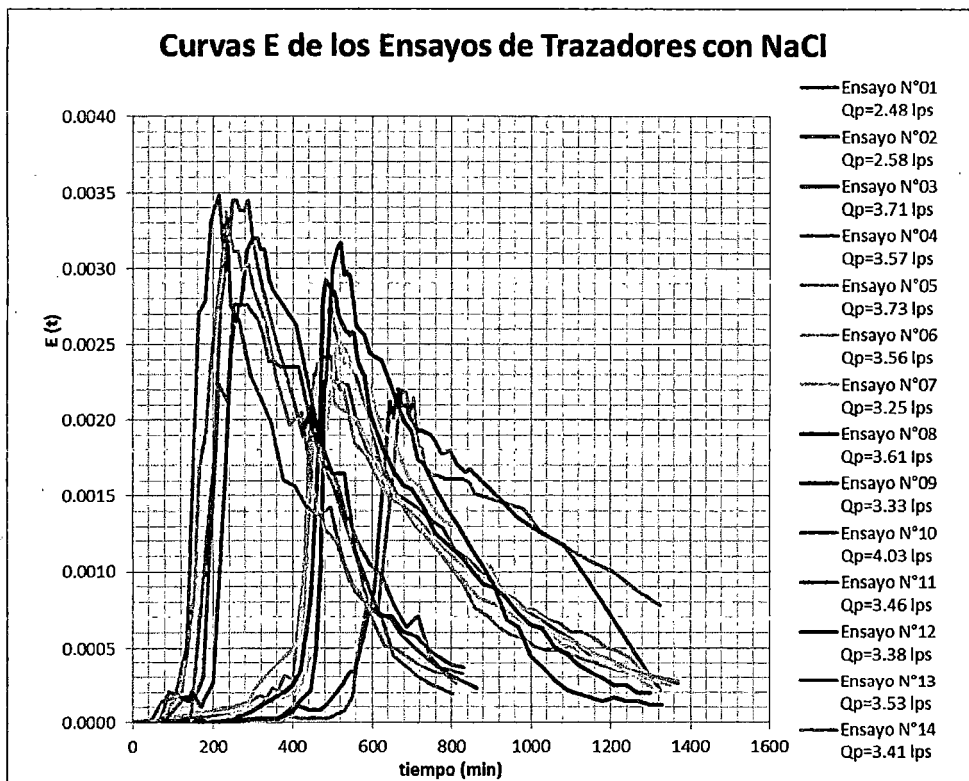


Figura IV.23.- Curvas E experimental de los ensayos de trazadores con NaCl con ausencia y presencia de manto de lodos.

En el Figura IV.23 se muestran las 14 curvas E experimentales, las curvas de los ensayos del N°01 al N°09 son en ausencia del manto de lodos y del N°10 al

N°14 en presencia del manto de lodos. Los ensayos N°01 y N°02 poseen caudales alejados del promedio (3.43ml/s), al igual que el ensayo N°10 (4.03ml/s), sin embargo los 11 ensayos restantes, poseen caudales muy cercanos al promedio 3.43ml/s.

Se observa que las curvas de los ensayos en presencia de lodos (rojos) son curvas más tempranas que las curvas en ausencia del manto de lodos (azules), por lo que los valores típicos para el análisis de la curva tendencia son más pequeños en presencia del manto de lodos.

## CAPITULO V. CONCLUSIONES

1. Para los diseños de unidades de tratamiento biológico debemos tener presente que la eficiencia de un reactor no depende de un solo factor, sino de la combinación de estos, por lo expuesto es importante los factores biológicos así como también los factores hidrodinámicos. Uno de los factores hidrodinámicos más importantes en una unidad de tratamiento biológico es el tiempo medio de retención y el tipo de flujo que se produce.
2. Para efectos de esta investigación se utilizó un reactor piloto UASB, que es una reproducción del reactor UASB-UNITRAR a una escala de 7:100, donde se observó que los caudales de operación y altura del manto de lodos también están afectados por el factor de escala.
3. El tiempo de retención real (tiempo medio de residencia) en el reactor piloto UASB (a escala 7:100) con un caudal promedio de 3.43ml/s (equivalente a 10l/s en el reactor UASB-UNITRAR) y una altura de manto de lodos de 18cm (equivalente a 2.50 metros en el reactor UASB-UNITRAR) es de 6 horas con 40 minutos.
4. El caudal promedio que se buscó utilizar en la investigación es de 3.43ml/s, repartido en 12 dispositivos de carga constante, originó caudales de 0.28ml/s en cada dispositivo. Debido a estos caudales pequeños hubieron problemas en la regulación de los dispositivos de carga constante y problemas de obstrucción en los orificios por las impurezas del afluente, por lo que no fue factible la utilización de aguas residuales en la investigación por el alto contenido de sólidos suspendidos y se utilizó agua potable proveniente de la red de distribución de la planta de tratamiento UNITRAR.

5. Los trazadores elegidos para la investigación fueron colorantes naturales para evitar la toxicidad en el manto de lodo y NaCl (sal común), por su fácil medición en el efluente mediante conductividad o determinación de cloruros. Para evitar el problema de absorción del trazador por el manto de lodos, y evitar interferencias y falsas lecturas, se saturó el manto de lodos con el trazador antes de iniciar el ensayo de trazadores.
6. De los ensayos de trazadores con color se observó que el volumen bajo la cámara separadora de gases correspondiente al 20% del volumen total del reactor, no interviene en el proceso, por lo que se concluye que el volumen útil del reactor piloto UASB es 96.7 litros. Esta reducción en el volumen útil del 20% del reactor se debe tener en cuenta al momento de diseñar un reactor UASB, considerando para el presente caso un volumen adicional del 25% en la etapa de diseño.
7. De los ensayos realizados se concluye que se generan flujos paralelos o canalizaciones dentro del manto de lodos (Ensayos de Trazadores con Color), generando corrientes tempranas y tardías, lo que se evidencia en la presencia de picos dobles en las curvas tendencias de los Ensayos de Trazadores con NaCl.
8. La existencia de zonas muertas dentro del reactor piloto UASB está constituida por zonas estancadas donde el fluido ingresa para luego salir lentamente, lo que se evidencia en la región descendente alargada de la curva tendencia, y por zonas donde el fluido no ingresa, ambos tipos se presentan en el reactor en presencia del manto de lodos.
9. En los ensayos de trazadores con color se evidenció la existencia de zonas muertas dentro del manto de lodos, constituido principalmente por la fracción sólida y floculenta del lodo, que ocupan volúmenes por donde el fluido no atraviesa.

10. De los ensayos de trazadores con color, se evidencia que existe un alto grado de difusión molecular, que se ve incrementado por la baja tasa de tratamiento de diseño del reactor UASB, por lo que los tiempos medios de residencia se ven desplazados hacia la derecha en la curva E (Distribución de Edades del Fluido),
11. Se observó que el tiempo medio de residencia en los ensayos en presencia del manto de lodos es en promedio 1.60 veces el tiempo de residencia hidráulico teórico.
12. De la investigación realizada se concluye que la presencia del manto de lodos reduce el tiempo medio de retención ( $t_m$ ) en 50%, siendo en promedio igual a 0.86 veces el tiempo de retención hidráulico teórico ( $t_o$ ), correspondiendo para el caudal de diseño de la unidad piloto (3.43 ml/s) un tiempo medio de retención ( $t_m$ ) promedio de 6 horas con 40 min para los ensayos de trazadores con NaCl en presencia de manto de lodos y 12 horas con 8 minutos para los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia de manto de lodos.
13. Los diferentes acomodamientos del manto de lodos, influye en la configuración de las canalizaciones dentro del manto de lodos, lo que se traduce en variaciones en los porcentajes de zonas muertas y en el tiempo medio de residencia.
14. De la comparación de los tipos de flujos que se desarrollan en el interior del reactor, se observó que el tipo de flujo predominante no cambia con la presencia del manto de lodos, siendo este el flujo pistón con 60%, y además hay presencia de mezcla completa en el orden del 40% en ausencia de manto de lodos y entre 30 y 40% en presencia del manto de lodos. Por lo que se concluye que la presencia del manto de lodos no afecta en mayor medida al tipo de flujo predominante en el reactor.

15. De los ensayos de trazadores realizados en el reactor piloto UASB, en los ensayos de trazadores con NaCl en ausencia del manto de lodos el 90% del fluido permanece dentro del reactor durante un tiempo mayor al tiempo de retención teórico, mientras que en los ensayos de trazadores con NaCl en presencia del manto de lodos se observó que más del 60% del fluido permanece en el reactor un tiempo menor al tiempo de retención teórico y solo una fracción del orden del 30% tiene una permanencia dentro del reactor de por lo menos el tiempo de retención teórico.
16. De los resultados obtenidos se observó que con caudales similares, el tiempo de retención teórico ( $t_0$ ) no tiene variaciones significativas, sin embargo el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) se ve reducido en aproximadamente 50% por la presencia del manto de lodos.
17. Se observó que el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) en ausencia del manto de lodos corresponde a 1.60 veces el tiempo de residencia teórico ( $t_0$ ), mientras que en presencia del manto de lodos el tiempo medio de residencia ( $t_m$ ) es del orden de 0.86 veces el tiempo de residencia teórico ( $t_0$ ).
18. Se observó que el tiempo modal ( $t_p$ ) se ve reducido en aproximadamente el 50% por la presencia del manto de lodos en el reactor y el tiempo en el que el trazador empieza a salir ( $t_i$ ) también se ve reducido, sin embargo el porcentaje de reducción depende del acomodamiento del manto de lodos.
19. Se observó que el parámetro  $t_c$  no presenta una reducción significativa por la presencia del manto de lodos, lo que da a entender que el fenómeno de difusión no se ve afectado en gran medida por la presencia del manto de lodos, pero si se observaron diferencias significativas entre sus diferentes acomodamientos del manto de lodos.



20. De los modelos matemáticos utilizados en la investigación para el ajuste de la Curva E, experimental, se concluye que ningún modelo se ajusta a la perfección, sin embargo la curva E, experimental puede ser aproximado a los modelos por etapas, en una etapa temprana (región ascendente de la curva E) se asemeja a la Curva del modelo de Convección para Flujo Laminar y en una etapa tardía (región descendente de la curva E) se asemeja al Modelo de Tanques en Serie. En el modelo de Compartimentos la configuración que más se aproxima al comportamiento hidráulico del reactor objeto de esta investigación es el flujo pistón en serie con mezcla completa y presencia de zonas muertas. El modelo matemático de Dispersión Axial no pudo ser aplicado por no existir una expresión matemática para la construcción de la curva analítica para un grado de dispersión alto (valor de  $D/uL$  mayor de 0.01). Sin embargo encontrar un modelo matemático que se ajuste a la perfección a la curva E experimental y al comportamiento hidráulico del reactor en estudio no es un objetivo de esta investigación.
21. Se buscó desarrollar los ensayos de trazadores durante los meses de Diciembre y Enero, para realizarlos en un mismo clima, sin embargo la larga duración de los ensayos de trazadores, con duraciones de hasta 16 horas, hizo que el factor temperatura tuviera grandes fluctuaciones, llegando a temperaturas bajas de  $17^{\circ}\text{C}$  en las mañanas y en las noches hasta temperaturas de más de  $30^{\circ}\text{C}$  al medio día.

## CAPITULO VI. RECOMENDACIONES

1. La eficiencia en el tratamiento en un reactor biológico depende principalmente de dos factores, las reacciones bioquímicas que se producen en el interior del reactor y el comportamiento hidráulico representado principalmente por el tiempo de retención. Existen reactores donde se busca obtener flujos específicos para potenciar las reacciones bioquímicas y la eficiencia en el tratamiento, por lo que el comportamiento hidráulico no puede ser un factor que se deje de lado, y su estudio debe ser tan importante como el estudio de las reacciones bioquímicas.
2. Para un adecuado desarrollo de la investigación es necesario y recomendable primero definir la metodología a realizar, para tener presente desde un inicio los recursos necesarios para llevar a cabo la investigación de una manera satisfactoria.
3. La presente investigación fue realizada con agua potable como afluente, debido a las restricciones para la regulación del caudal causados por la presencia de sólidos suspendidos en la caja reguladora de caudales. Se recomienda que en posteriores investigaciones, se realice ensayos teniendo como efluente desagüe, para verificar los resultados que se han obtenido.
4. Es necesario verificar que el trazador sea inerte en el manto de lodos, de lo contrario es recomendable saturar el manto de lodos con el trazador, mediante aplicación prolongada del trazador con una baja concentración, para evitar que sea absorbido durante el ensayo por el manto de lodos, distorsionando los resultados del ensayo.
5. Dado que el manto de lodos abarca un gran volumen del total del reactor, y que además tiene partes sólidas y floculentas, que representan zonas donde el fluido no ingresa (zonas muertas), se recomienda realizar ensayos de trazadores con diferentes alturas del manto del lodos para evaluar la

influencia de esta variable en el tiempo de retención y el comportamiento hidráulico del reactor.

6. Se recomienda el uso de otros trazadores, como isotopos, para la obtención de datos con mayor precisión, pero verificando que dicho trazador no presente toxicidad para los microorganismos presentes en el manto de lodos y que además sea inerte al manto de lodos.
7. Se recomienda llevar un mejor control de la temperatura del agua, ya que este puede afectar el fenómeno de difusión del trazador en el interior del reactor, además tener presente que el fluido del reactor no necesariamente tiene la misma temperatura que el afluente. Lo cual podría generar corrientes en diversas direcciones, y con ello recirculación interna.
8. Es recomendable que se realicen ensayos de trazadores en un ambiente controlado, donde se pueda mantener las temperaturas ambiental y del agua constantes, para estudiar como la variación de temperatura afecta al comportamiento hidráulico del reactor y además estudiar como las temperaturas extremas (bajo de 15°C) afectan el comportamiento hidráulico del reactor, ya que a dichas temperaturas se considera que los tratamientos anaerobios no son eficientes.
9. Se recomienda realizar pruebas con diferentes puntos de monitoreo, tanto a lo alto del reactor como a lo largo del mismo, para estudiar la distribución del tiempo de residencia en las diferentes zonas de un reactor UASB, y determinar los tiempos que permanece el fluido en contacto con el manto de lodos y en la zona de sedimentación, ya que la mayor parte de estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo cuando el fluido está en contacto con el manto de lodos.
10. Se recomienda que al momento del diseño de reactor similares al reactor UASB-UNITRAR se tenga presente que el volumen bajo la cámara separadora de gases no interviene como volumen útil del reactor,

reduciendo el volumen útil y el tiempo de tratamiento, por lo que se debería considerar un volumen adicional o simplemente no considerarse este volumen, como volumen útil.

## CAPITULO VII. BIBLIOGRAFÍA

### Textos:

- Libro: "Ingeniería de las Reacciones Químicas". Octave Levenspiel. Limusa Wiley, Tercera Edición, México 2004.
- Libro: "Análisis de Agua y Desagüe". Enrique Jimeno Blasco. Segunda Edición, UNI, Lima 1998.
- Manual: "Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual III: Evaluación de Plantas de Tecnología Apropriada". Capítulo 2 Análisis de Flujos y Factores que Determinan los Periodos de Retención. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), Lima 2005.
- Artículo: "Análisis de la Curva de Distribución del Tiempo de Residencia en un Sistema de Lixiviación". Armando Rojas, Amancia García. Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ). Tecnología Química Vol. XXX N° 1, 2010.
- Artículo: "Análisis de la Hidrodinámica de un Reactor de Flujo Pistón". Germán Giácoman, Javier Frías, Flor Hurtado. Ingeniería, 2003.
- Artículo: "Funcionamiento Hidráulico de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente". D. Gallego, J. Montoya, J. Valverde. Ingeniería Química N° 450, Universidad de Colombia, Setiembre 2007.
- Investigación: "Modelamiento de las Condiciones Hidráulicas de una Planta Compacta para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas". Capítulo 5 Evaluación Hidráulica de Los Reactores usando Trazadores. Joany

Sánchez. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2010.

- Artículo: "Evaluación del Comportamiento Hidrodinámico como Herramienta Para Optimización de Reactores Anaerobios de Crecimiento En Medio Fijo". Andrea Pérez, Patricia Torres. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Colombia Mayo 2008.
- Artículo: "Comportamiento del Flujo en Reactores Anaerobios". Matilde López, Mercedes Rodríguez, Rigoberto Escobedo. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Artículo: "Evaluación del Comportamiento Hidráulico de un Reactor Aerobio y un Reactor Anaerobio, en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de Pequeña Escala. Joany Sánchez, Santiago Cardona. Universidad Nacional de Colombia, Junio-octubre 2009.
- Artículo: "Evaluación del Comportamiento Hidráulico un Reactor UASB utilizado para el Tratamiento de Aguas Residuales". Diana Arroyave, Maribel González, Darío Gallego. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Artículo: "Evaluación de los Aspectos Hidrodinámicos de un Reactor de Lecho Fluidificado". Germán Giácoman. Universidad Autónoma de Yacután.
- Artículo: "Evaluación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Lo de Coy".
- Artículo: "Cuestiones Básicas sobre Ensayos de Trazadores y Protocolo de Realización de: Ensayos de Bombeo y Ensayo de Trazadores".

**Páginas Web:**

- Link: [http://fia.uni.edu.pe/unitrar/unitrar\\_index.swf](http://fia.uni.edu.pe/unitrar/unitrar_index.swf)  
Palabra clave: UNITRAR
- Link: [http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101\\_tubo.htm](http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101_tubo.htm)  
Palabra clave: UASB
- Link: [http://www.grassrootswiki.org/index.php/Upflow\\_anaerobic\\_sludge\\_blank\\_reactor\\_\(UASB\)](http://www.grassrootswiki.org/index.php/Upflow_anaerobic_sludge_blank_reactor_(UASB))  
Palabra clave: UASB
- Link: [http://www.grassrootswiki.org/index.php/Upflow\\_anaerobic\\_sludge\\_blank\\_reactor\\_\(UASB\)](http://www.grassrootswiki.org/index.php/Upflow_anaerobic_sludge_blank_reactor_(UASB))  
Palabra clave: UASB
- Link: <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm>  
Palabra clave: UASB
- Link: <http://www.geocities.com/gsilvam/lahares.htm>  
Palabra clave: Densidad de lodos.

## **CAPITULO VIII. ANEXOS**

Anexo N° 01: Modelos Matemáticos

Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del Repartidor de Caudal Alternativa N° 1  
y Alternativa N° 2

Anexo N° 03: Esquema para la Construcción del reactor piloto UASB



**A. Anexo N° 01: Modelos Matemáticos**

## A. ANEXO 1. MODELOS MATEMATICOS

### 1. MODELO DE DISPERSIÓN AXIAL

Este modelo define que el fluido que ingresa se dispersa axialmente a lo largo del recipiente, donde cada vez esta dispersión es mayor conforme pasa a través del recipiente.

Para un mejor entendimiento de la dispersión axial, suponer que se introduce en el fluido que entra a un recipiente un impulso ideal de un rastreador, el cual se dispersa conforme pasa a través del recipiente. Para caracterizar esta dispersión de acuerdo con este modelo (ver Figura VIII.1), suponer un proceso similar a la difusión que está superpuesto al flujo pistón. Este proceso de dispersión se representa con el coeficiente de dispersión  $D/uL$  ( $m^2/s$ ), es el grupo adimensional que caracteriza a la dispersión en todo el recipiente. Así:

- Un valor grande de  $D/uL$  indica una rápida dispersión de la curva del rastreador.
- Un valor pequeño de  $D/uL$  indica una dispersión lenta.
- $D/uL = 0$  indica que no hay dispersión, por lo que se trata de flujo pistón.

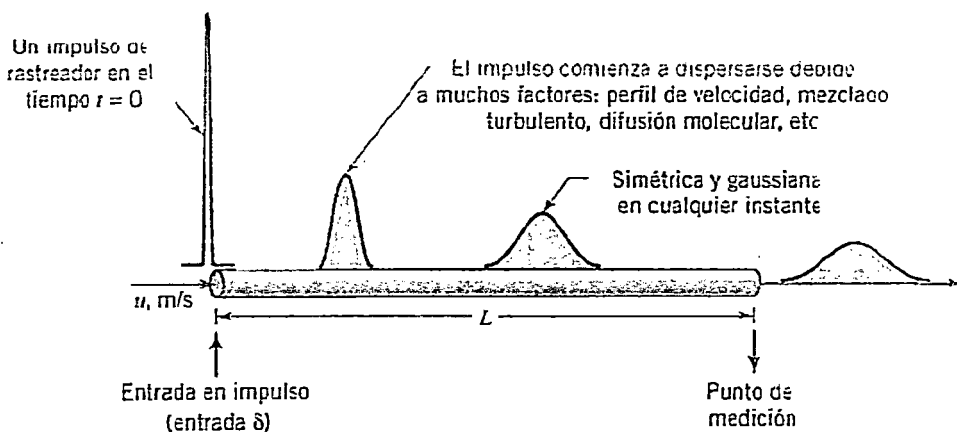


Figura VIII.1.- Dispersión del rastreador en el Modelo de Dispersión

Se calcula  $D/uL$  registrando la forma de la curva del rastreador conforme pasa por la salida del recipiente. En particular, se mide:

- $t_m$  = Tiempo medio de tránsito, o cuando la curva pasa por la salida
- $\sigma^2$  = Varianza, o una medida de la dispersión de la curva

Estas medidas,  $t_m$  y  $\sigma^2$ , están directamente relacionadas por la teoría con  $D/uL$ .

La media, para datos discretos o continuos, se define como:

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t c dt}{\int_0^{\infty} c dt} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad \text{Ec. VIII.1}$$

La varianza se define como

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t-t_m)^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} - t_m^2 \quad \text{Ec. VIII.2}$$

O en forma discreta

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum (t_i - t_m)^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad \text{Ec. VIII.3}$$

La varianza representa el cuadrado de la dispersión de la distribución conforme pasa por la salida del recipiente y tiene unidades de  $(\text{tiempo})^2$ . Es particularmente útil para ajustar curvas experimentales a una de una familia de curvas teóricas. La Figura VIII.2 ilustra estos términos.

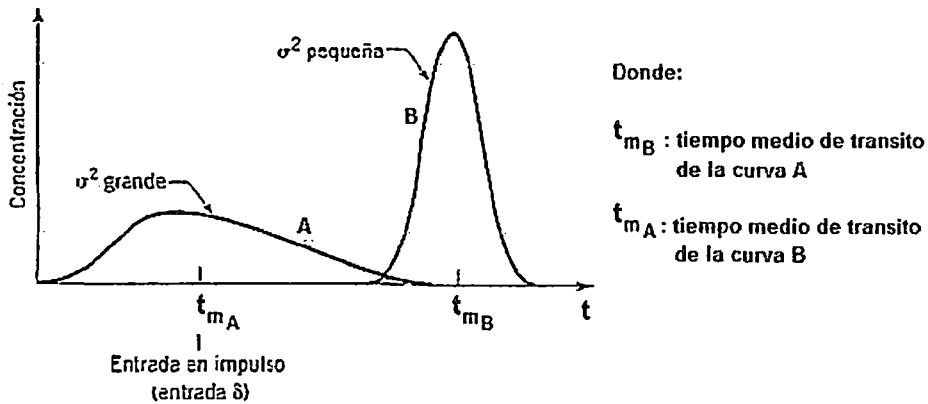


Figura VIII.2.- Varianza del rastreador en el Modelo de Dispersión

Considerar un fluido en flujo pistón que tiene sobrepuesto un cierto grado de retromezclado, cuya magnitud es independiente de la posición dentro del recipiente. Esta condición implica que no existen zonas muertas, ni grandes desviaciones o cortocircuitos de fluido en el recipiente. Este modelo se llama flujo disperso en pistón o, simplemente, modelo de dispersión. En la Figura VIII.3 se representan estas condiciones.

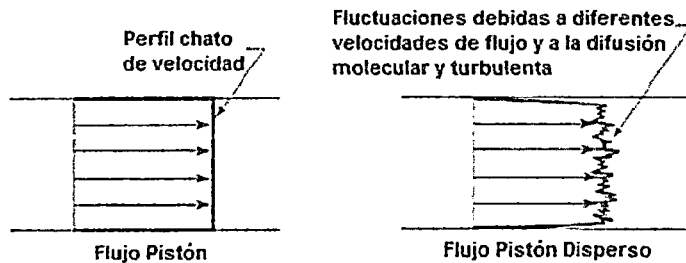


Figura VIII.3.- Representación del Modelo de Dispersión

Como el proceso de mezcla implica un reagrupamiento o redistribución de materia, ya sea por desplazamiento o por formación de remolinos, y puesto que esto se repite un número considerado de veces durante el flujo del fluido a través del recipiente, se considera que estas perturbaciones son de naturaleza

estadística, algo parecido a lo que ocurre en la difusión molecular. La ecuación diferencial que rige la difusión molecular en la dirección  $x$  está dada por la ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Ec. VIII.4}$$

Siendo  $D$ , el coeficiente de difusión molecular, un parámetro que caracteriza inequívocamente el proceso. De forma análoga, se podría considerar que todas las contribuciones al retromezclado del fluido que circula en la dirección  $x$  son descritas por una expresión similar, o sea:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Ec. VIII.5}$$

Donde el parámetro  $D$ , coeficiente de dispersión longitudinal o axial, caracteriza el grado de retromezclado durante el flujo. En forma adimensional, donde  $z = (ut + x)/L$  y  $\theta = t\sqrt{t} = tu/L$ , la ecuación diferencial básica que representa este modelo se transforma en:

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL}\right) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{\partial c}{\partial z} \quad \text{Ec. VIII.6}$$

Donde el grupo adimensional  $\left(\frac{D}{uL}\right)$ , denominado módulo de dispersión del recipiente, es el parámetro que mide el grado de dispersión axial. Así:

- $\left(\frac{D}{uL}\right) \rightarrow 0$       Dispersión insignificante, por lo que hay flujo pistón.
- $\left(\frac{D}{uL}\right) \rightarrow \infty$       Gran dispersión, por lo que hay flujo tanque agitado.

Este modelo por lo general refleja satisfactoriamente el flujo que no se desvía demasiado del flujo pistón, como por ejemplo lechos empacados reales y en tuberías largas, si es flujo laminar.

**a) GRADOS DE DISPERSIÓN PEQUEÑA,  $D/uL < 0.01$**

Para grados de dispersión pequeña, la curva en ensanchamiento del rastreador no cambia significativamente en cuanto a forma a su paso por el punto de medida, entonces la solución de la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL}\right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Ec. VIII.7}$$

Produce la curva simétrica:

$$C = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)}\right] \quad \text{Ec. VIII.8}$$

Tenemos:

$$E_\theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)}\right] \quad \text{Ec. VIII.9}$$

Para mayor entendimiento, ver Figura VIII.4.

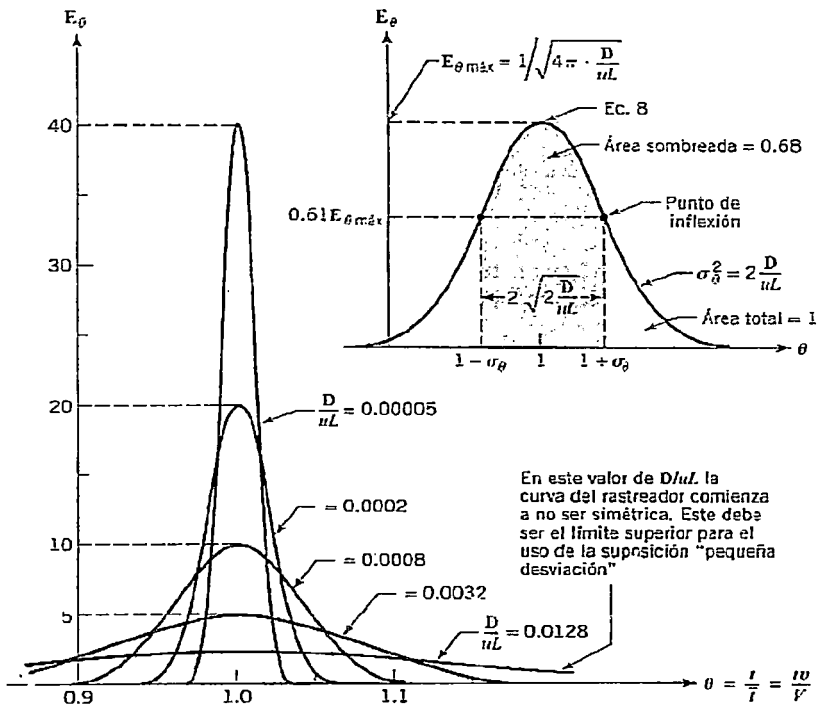


Figura VIII.4.- Relación entre  $D/uL$  y la curva adimensional  $E$  estándar

**b) GRADOS DE DISPERSIÓN GRANDE,  $D/uL > 0.01$**

Para grados de dispersión grande, la respuesta al impulso es ancha y pasa por el punto de medida tan lentamente que cambia su forma, se extiende, durante el tiempo que es medida. Esto proporciona una *curva E* asimétrica.

No se dispone de una expresión analítica para la *curva E*, pero se puede calcular exactamente su media y su varianza.

$$\bar{t}_E = \bar{t} = \frac{V}{v} \quad \dots \circ \dots \quad \bar{\theta}_E = \frac{\bar{t}_E}{\bar{t}} = \frac{\bar{t}_E v}{V} = 1$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 [1 - e^{-uL/D}]$$

Ec. VIII.10

**2. MODELO DE TANQUES EN SERIES**

El modelo de tanques en serie considera que el comportamiento del fluido en un reactor es igual que si existiera un sistema en serie de reactores de mezcla completa.

El modelo de tanques en serie es sencillo, puede utilizarse con cualquier cinética y puede extenderse sin demasiada dificultad a cualquier arreglo de recipientes o compartimentos, con o sin recirculación.

La Figura VIII.5 muestra el sistema que se está considerando. Asimismo se define:

- $\theta_i = \frac{t}{\bar{t}_i}$  = tiempo adimensional basado en el tiempo medio o promedio de residencia por tanque,  $\bar{t}_i$
- $\theta = \frac{t}{\bar{t}}$  = tiempo adimensional basado en el tiempo medio o promedio de residencia en todos los  $N$  tanque,  $\bar{t}_i$

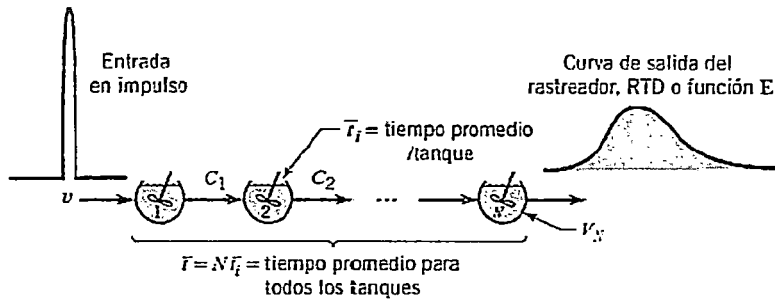


Figura VIII.5.- Modelo de Tanques en Serie

Entonces

$$\theta_i = N \theta \quad ; \quad \bar{\theta}_i = 1 \quad ; \quad \bar{\theta} = 1$$

$$y \quad E_\theta = \bar{t} E \quad \text{Ec. VIII.11}$$

**Para el primer tanque:** Considerar un flujo estacionario de  $v \text{ m}^3/\text{s}$  de fluido que entra y sale de estos tanques de tanque mezcla completa de volumen  $V_1$ . En el tiempo  $t = 0$  se inyecta un impulso de rastreador en el recipiente que cuando se distribuye uniforme y rápidamente en el recipiente alcanza una concentración  $C_0$ .

En cualquier tiempo  $t$  después de inyectado el trazador, efectuar un balance materia, de tal modo que:

$$\left( \text{Velocidad de desaparición del rastreador} \right) = \left( \text{Velocidad de entrada} \right) - \left( \text{Velocidad de salida} \right) \quad \text{Ec. VIII.12}$$

En símbolos, esta expresión se transforma en

$$V_1 \frac{dC}{dt} = 0 - v C_1 \quad [\text{mol rastreador /s}] \quad \text{Ec. VIII.13}$$

Donde  $C_1$  es la concentración del rastreador en el tanque "1". Separando las variables e integrando se llega a:

$$\frac{C_1}{C_0} = e^{-t/\bar{t}_1} \quad \text{Ec. VIII.14}$$



Ya que el área bajo esta curva  $C/C_0$  contra el tiempo es  $\bar{t}_1$ , esto permite calcular la curva E. Así, es posible escribir.

$$\bar{t}_1 E_1 = e^{-t/\bar{t}_1} \quad \text{Ec. VIII.15}$$

Para el segundo tanque: Donde entra  $C_1$  y sale  $C_2$ , el balance de materia es:

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = v C_0 e^{-t/\bar{t}_1} - v C_2 \quad [\text{mol rastreador /s}] \quad \text{Ec. VIII.16}$$

Separando variable se obtiene una ecuación diferencial del primer orden, que integrada lleva a:

$$\bar{t}_2 E_2 = \frac{t}{\bar{t}_2} e^{-t/\bar{t}_1} \quad \text{Ec. VIII.17}$$

Para el tanque  $N$ . La integración resulta más fácil resolverla usando transformadas de Laplace, que se resume:

$$E_\theta = (N \bar{t}_i) E = N \frac{(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad \text{Ec. VIII.18}$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{1}{N} \quad \text{Ec. VIII.19}$$

Las propiedades de las curvas de la DTR se esquematizan en la Figura VIII.6.

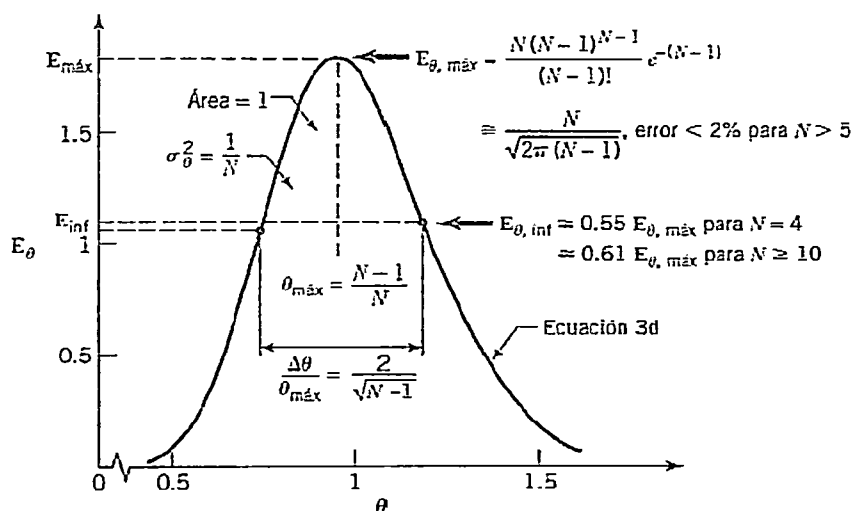


Figura VIII.6.- Propiedades de la curva DTR.

### 3. MODELO DE CONVECCIÓN PARA FLUJO LAMINAR

El modelo de convección para flujo laminar, considera un perfil de velocidad parabólico, con tan solo una ligera difusión axial entre los elementos de fluido que circulan lentamente y los que lo hacen más rápido.

Este modelo supone que cada elemento de fluido se desliza más allá de su vecino sin interactuar con él por difusión molecular. Así, la amplitud de los tiempos de residencia se debe únicamente a las variaciones de velocidad. Ver Figura VIII.7.

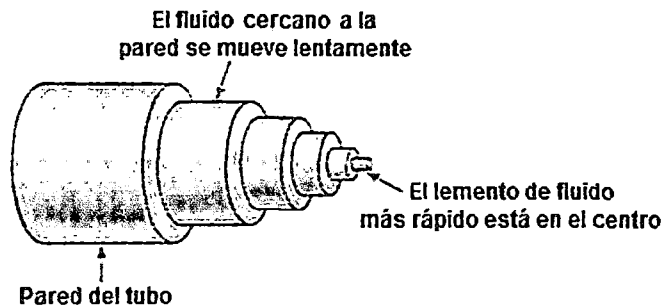


Figura VIII.7.- Concentración del trazador en el efluente de un reactor.

La forma más precisa consiste en seguir la evolución de la dispersión de la curva para un rastreador de impulso, conforme éste se mueve a través del sistema. El rastreador se puede inyectar o medir principalmente de dos formas, tal como se muestra en la Figura VIII.8; por lo tanto, se tiene cuatro combinaciones de condiciones fronteras, como se observa en la Figura VIII.9, cada una con su *curva E* particular, como muestra la Figura VIII.10.

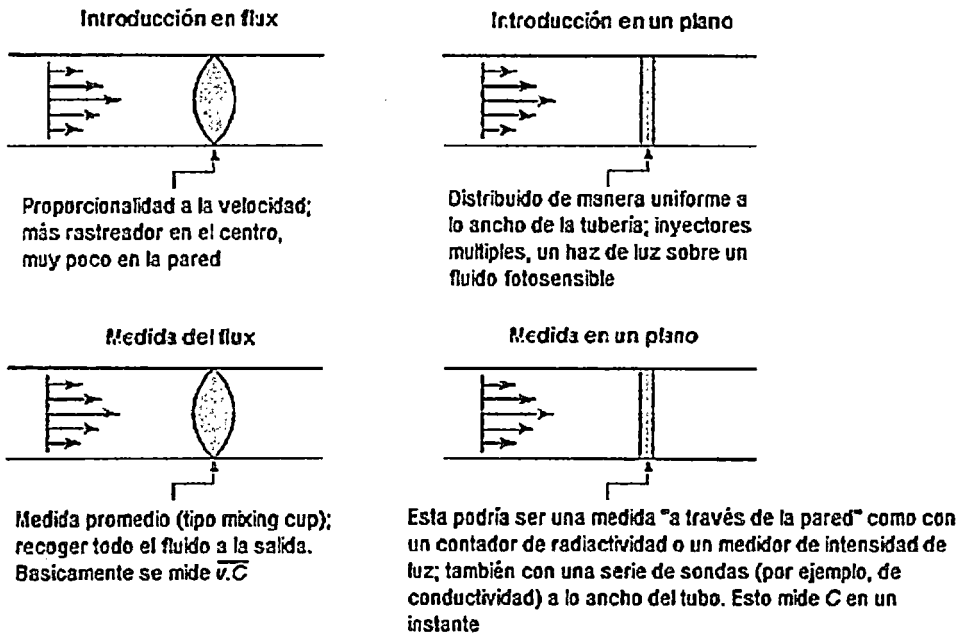


Figura VIII.8. - Diferentes formas de introducir y medir el rastreador

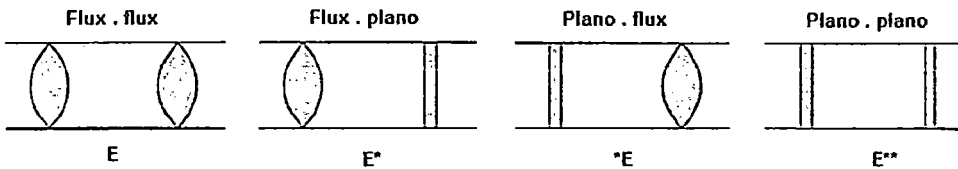


Figura VIII.9.- Diferentes combinaciones de los métodos de entrada-salida.

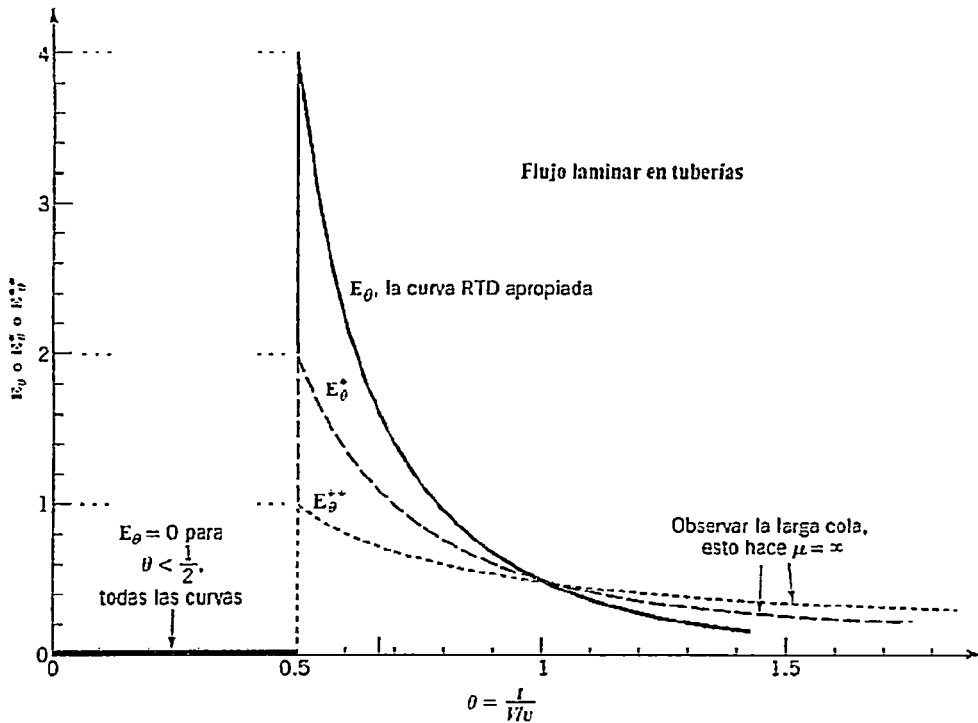


Figura VIII.10.- Observar lo diferente que son las curvas de salida, dependiendo de cómo se introduce y mide el rastreador.

Como puede verse en la Figura VIII.10, las curvas  $E$ ,  $E^*$  Y  $E^{**}$  son muy diferentes una de otra.

- La curva de respuesta  $E$  es la forma apropiada para el estudio de reactores; es la que representa la DTR del recipiente.
- Las curvas  $E^*$  y  $E$  son idénticas, por lo que se les llamará  $E^*$  de aquí en adelante. Una corrección para la condición frontera planar transformará esta curva en la curva DTR adecuada.
- La curva  $E^{**}$  requiere dos correcciones, una para la entrada y una para la salida, a fin de transformarla en la curva DTR adecuada.

Es más sencillo determinar  $E^*$  o  $E^{**}$  que  $E$ . Sin embargo, hay que acordarse de transformar estas curvas del rastreador medido en la *curva E* antes de llamarlas

DTR. Para ductos y tuberías con un perfil de velocidad parabólico, las diversas curvas de respuesta a un impulso resultan ser las siguientes:

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3} \text{ para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Flux} \quad \text{Ec. VIII.20}$$

$$E_{\theta}^* = \frac{1}{2\theta^2} \text{ para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Flux, Salida Plano} \quad \text{Ec. VIII.21}$$

$$E_{\theta}^{**} = \frac{1}{2\theta^2} \text{ para } \theta \geq \frac{1}{2} \quad \text{Entrada Plano, Salida Plano} \quad \text{Ec. VIII.22}$$

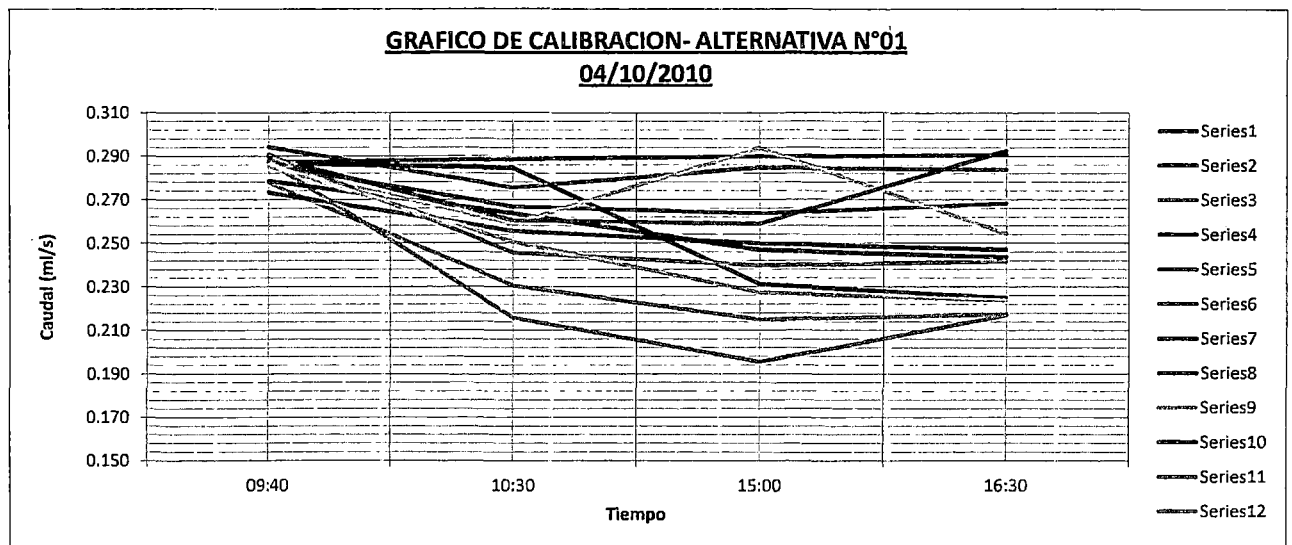
**B. Anexo N° 02: Pruebas de Calibración del  
Repartidor de Caudal Alternativa N°1 y  
Alternativa N°2**

**Resultados de las Pruebas de Calibración del  
Repartidor de Caudal Alternativa N° 1**

**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

Fecha: 04/10/2010												
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											

<b>09:40</b>	0.287	0.287	0.278	0.273	0.286	0.288	0.294	0.279	0.285	0.290	0.291	0.286
<b>10:30</b>	0.289	0.284	0.231	0.256	0.267	0.216	0.276	0.264	0.259	0.260	0.246	0.251
<b>15:00</b>	0.290	0.231	0.215	0.250	0.264	0.195	0.285	0.247	0.294	0.259	0.240	0.227
<b>16:30</b>	0.291	0.225	0.217	0.247	0.268	0.217	0.284	0.243	0.254	0.293	0.242	0.224

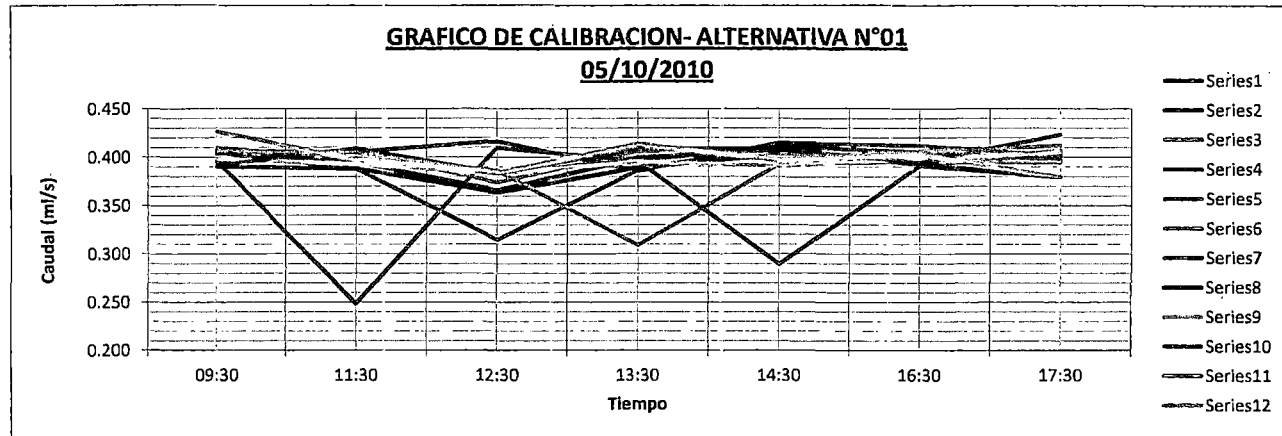




**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

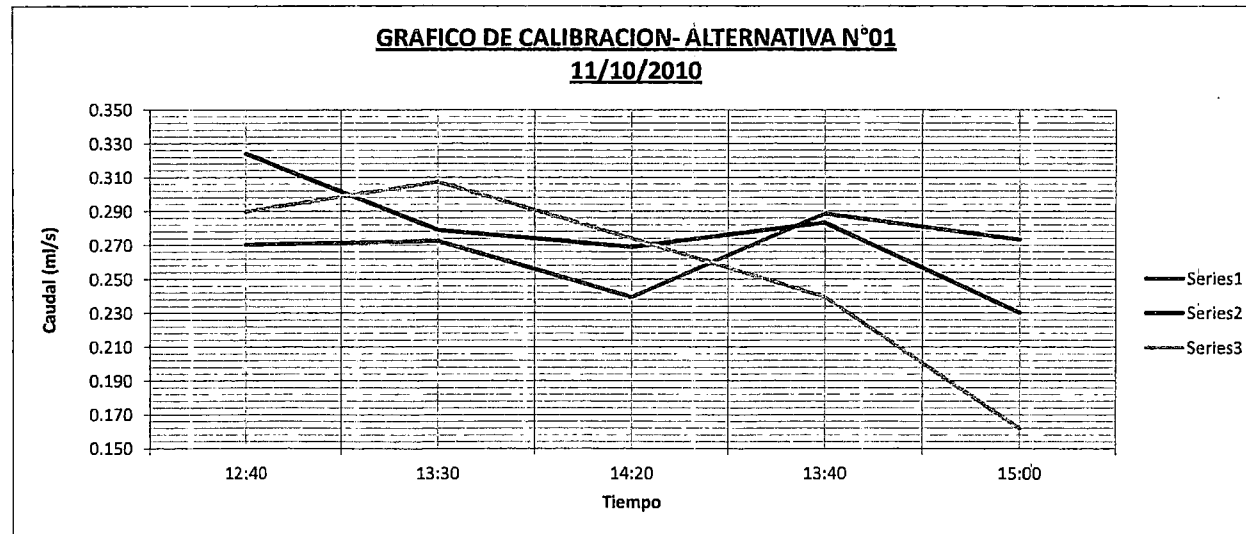
Fecha: 05/10/2010												
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											

09:30	0.390	0.405	0.393	0.405	0.404	0.410	0.396	0.396	0.399	0.392	0.407	0.427
11:30	0.388	0.388	0.406	0.395	0.405	0.399	0.249	0.397	0.393	0.409	0.405	0.398
12:30	0.315	0.364	0.374	0.365	0.417	0.386	0.410	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
13:30	0.387	0.389	0.406	0.399	0.386	0.309	0.396	0.397	0.395	0.409	0.412	0.414
14:30	0.411	0.402	0.406	0.408	0.415	0.393	0.289	0.410	0.391	0.408	0.400	0.396
16:30	0.405	0.395	0.394	0.394	0.412	0.396	0.391	0.392	0.398	0.394	0.406	0.402
17:30	0.397	0.402	0.407	0.396	0.401	0.394	0.379	0.379	0.405	0.423	0.412	0.379



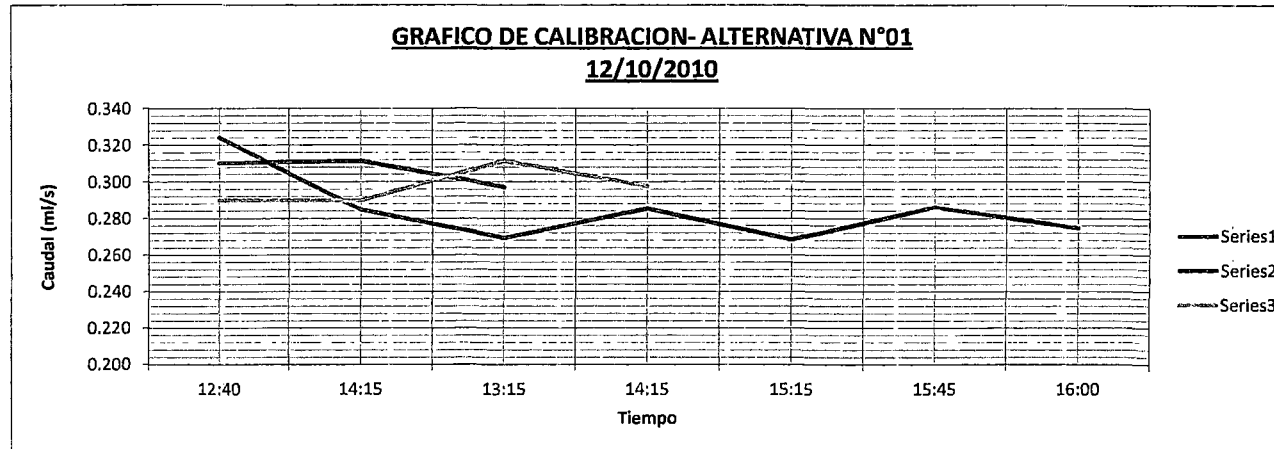
**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

Fecha: 11/10/2010			
N°	1	2	3
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)		
12:40	0.270	0.324	0.290
13:30	0.272	0.279	0.307
14:20	0.240	0.269	0.274
13:40	0.289	0.283	0.240
15:00	0.273	0.230	0.162



**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

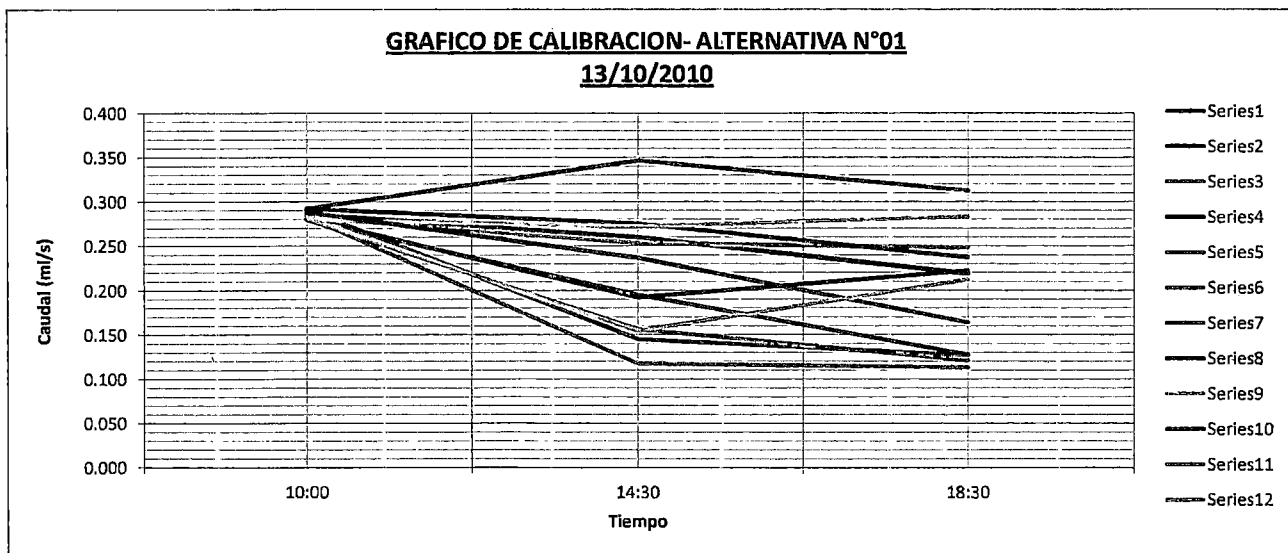
Fecha: 12/10/2010			
N°	1	2	3
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)		
12:40	0.310	0.324	0.290
14:15	0.312	0.285	0.290
13:15	0.297	0.269	0.312
14:15	Datos muy alejados del promedio	0.285	0.298
15:15		0.268	Datos muy alejados del promedio
15:45		0.286	
16:00		0.275	



**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

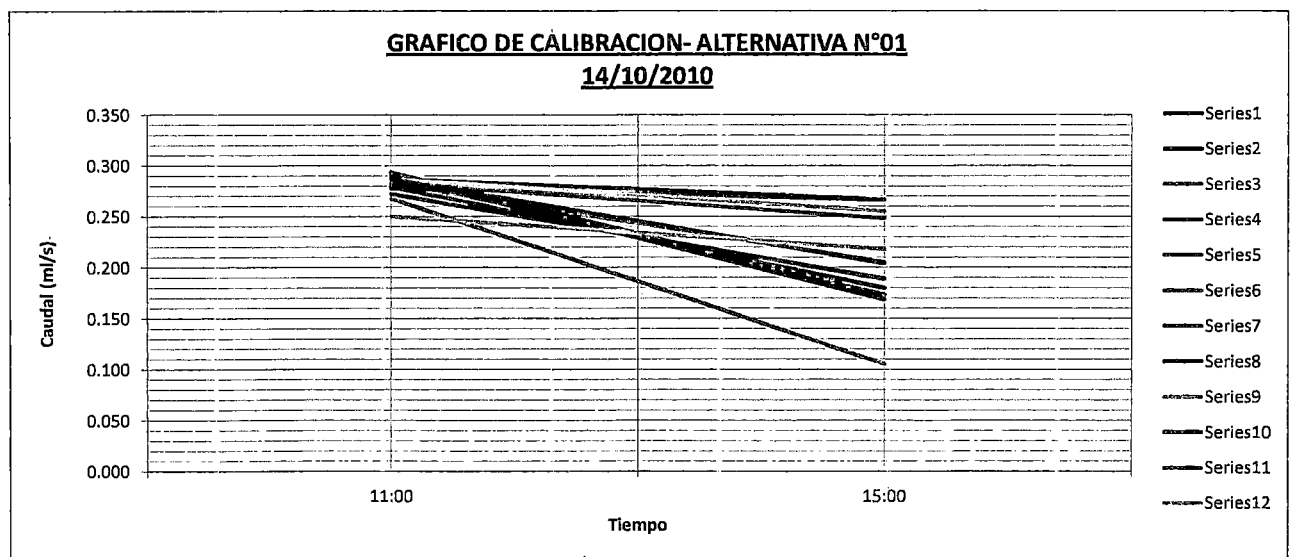
Fecha: 13/10/2010												
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											

<b>10:00</b>	0.291	0.286	0.282	0.281	0.279	0.283	0.292	0.292	0.280	0.288	0.280	0.282
<b>14:30</b>	0.145	0.260	0.253	0.192	0.195	0.117	0.346	0.275	0.272	0.236	0.156	0.155
<b>18:30</b>	0.127	0.219	0.248	0.222	0.128	0.113	0.313	0.237	0.283	0.164	0.121	0.212



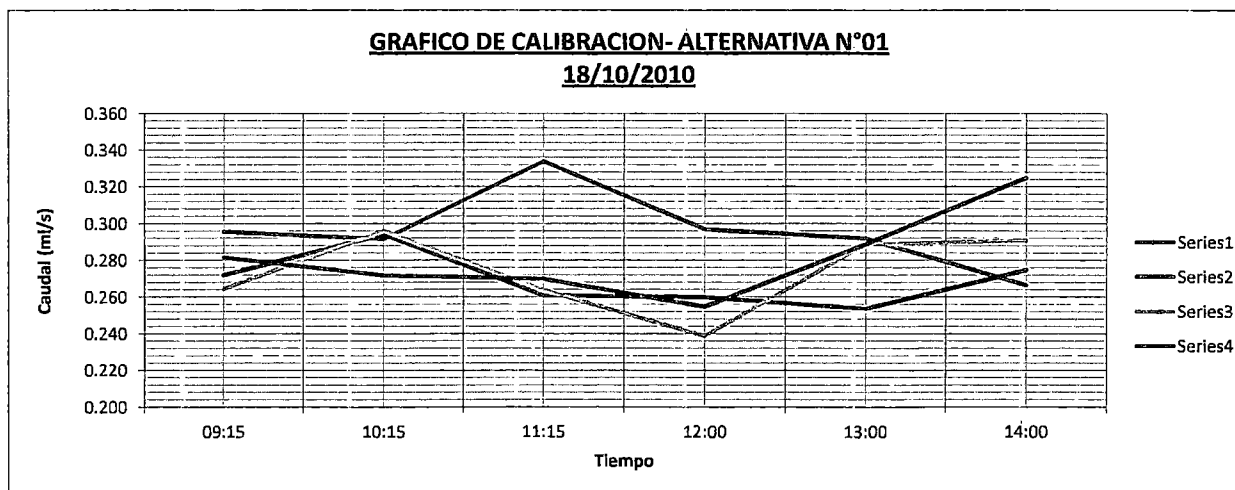
**PRUEBA DE CALIBRACION- CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL -ALTERNATIVA N°01**

Fecha: 14/10/2010												
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											
11:00	0.272	0.279	0.281	0.289	0.293	0.268	0.278	0.287	0.287	0.287	0.283	0.250
15:00	0.189	0.180	0.205	0.169	0.173	0.105	0.267	0.266	0.255	0.204	0.248	0.218



**CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL-PRUEBA DE CALIBRACION- ALTERNATIVA N°01**

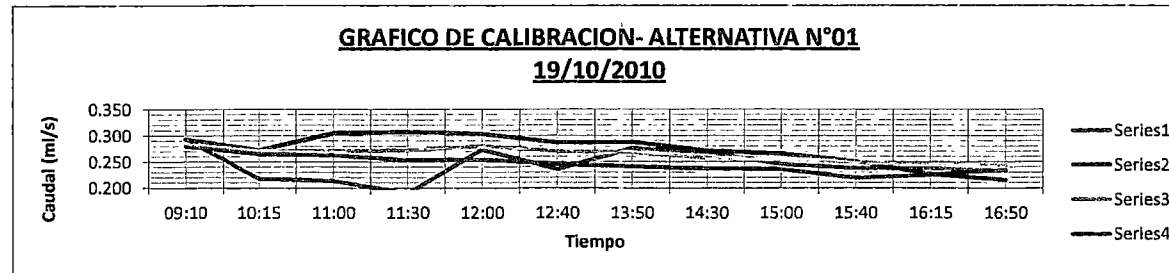
Fecha: 18/10/2010				
N°	1	2	3	4
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)			
09:15	0.295	0.272	0.264	0.281
10:15	0.292	0.294	0.296	0.272
11:15	0.334	0.261	0.264	0.270
12:00	0.297	0.260	0.239	0.255
13:00	0.292	0.254	0.289	0.289
14:00	0.267	0.275	0.291	0.325



**CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL-PRUEBA DE CALIBRACION- ALTERNATIVA N°01**

Fecha: 19/10/2010				
N°	1	2	3	4
Hora	CAUDAL MEDIDO (ml/s)			

09:10	0.293	0.293	0.282	0.280
10:15	0.218	0.273	0.271	0.265
11:00	0.214	0.305	0.271	0.263
11:30	0.190	0.307	0.273	0.253
12:00	0.274	0.303	0.281	0.254
12:40	0.235	0.287	0.270	0.246
13:50	0.276	0.288	0.268	0.242
14:30	0.269	0.271	0.257	0.237
15:00	0.245	0.265	0.256	0.235
15:40	0.238	0.251	0.249	0.219
16:15	0.238	0.227	0.248	0.225
16:50	0.233	0.215	0.242	0.235

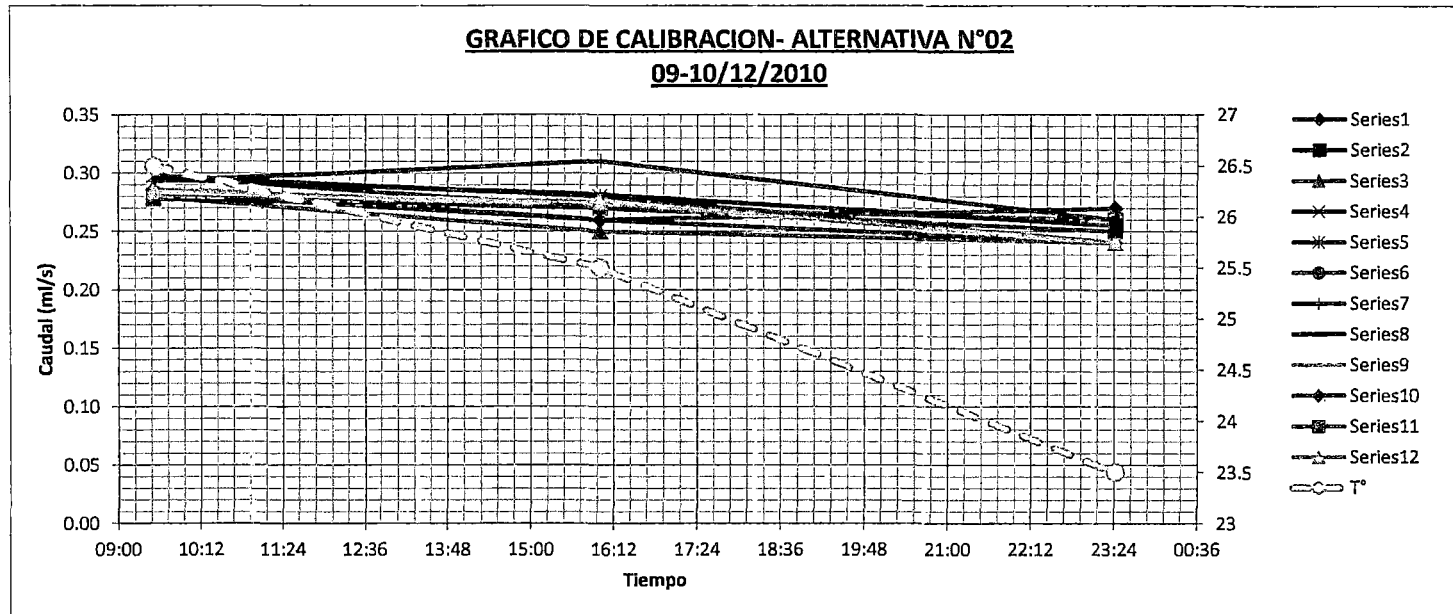


**Resultados de las Pruebas de Calibración del  
Repartidor de Caudal Alternativa N° 2**



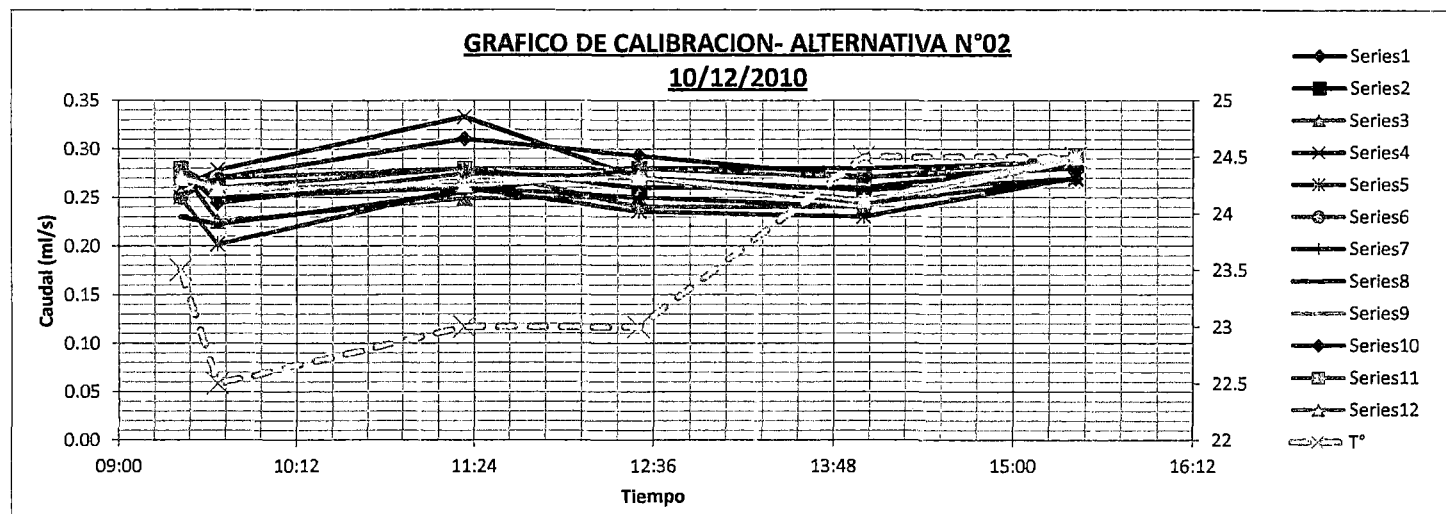
**CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL-PRUEBA DE CALIBRACION- ALTERNATIVA N°02**

		Fecha: 09 y 10/12/2010											
Hora	N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
	T°(°C)	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											
09:30	26.5	0.28	0.28	0.28	0.30	0.30	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28
16:00	25.5	0.26	0.27	0.25	0.27	0.28	0.27	0.31	0.28	0.27	0.26	0.27	0.27
23:25	23.5	0.27	0.26	0.24	0.25	0.24	0.26	0.26	0.26	0.25	0.24	0.25	0.24



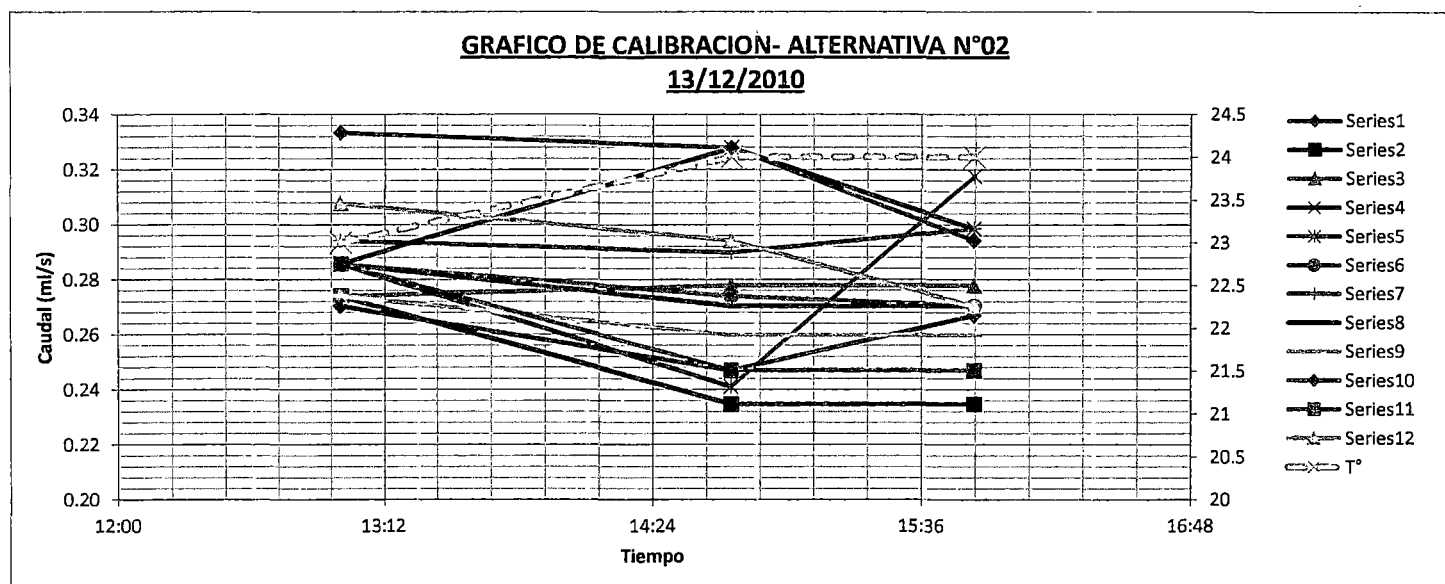
**CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL-PRUEBA DE CALIBRACION- ALTERNATIVA N°02**

		Fecha: 10/12/2010											
Hora	N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
	T°(°C)	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											
09:25	23.5	0.27	0.28	0.28	0.26	0.25	0.25	0.28	0.23	0.28	0.28	0.28	0.27
09:40	22.5	0.27	0.26	0.23	0.28	0.20	0.27	0.25	0.22	0.26	0.24	0.26	0.26
11:20	23	0.31	0.28	0.25	0.33	0.26	0.28	0.26	0.26	0.27	0.27	0.28	0.26
12:30	23	0.29	0.26	0.25	0.27	0.24	0.24	0.25	0.28	0.27	0.27	0.28	0.27
14:00	24.5	0.27	0.26	0.24	0.26	0.23	0.24	0.24	0.28	0.24	0.24	0.27	0.25
15:25	24.5	0.28	0.28	0.29	0.27	0.27	0.29	0.29	0.29	0.29	0.27	0.29	0.29

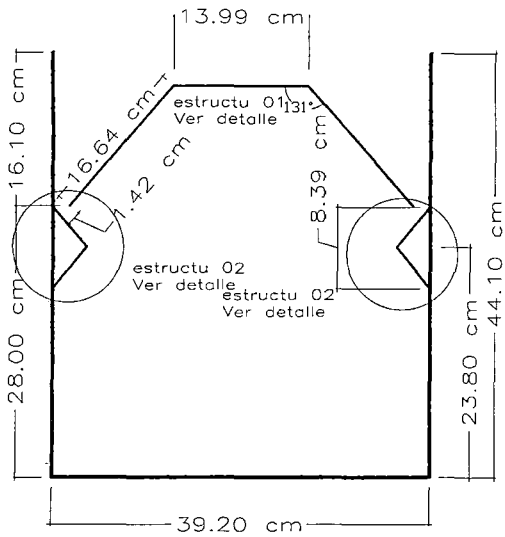


**CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL-PRUEBA DE CALIBRACION- ALTERNATIVA N°02**

		Fecha: 13/12/2010											
Hora	N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
	T°(°C)	CAUDAL MEDIDO (ml/s)											
13:00	23	0.27	0.27	0.27	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.27	0.33	0.29	0.31
14:45	24	0.25	0.23	0.28	0.33	0.24	0.27	0.29	0.27	0.26	0.33	0.25	0.29
15:50	24	0.27	0.23	0.28	0.30	0.32	0.27	0.30	0.27	0.26	0.29	0.25	0.27

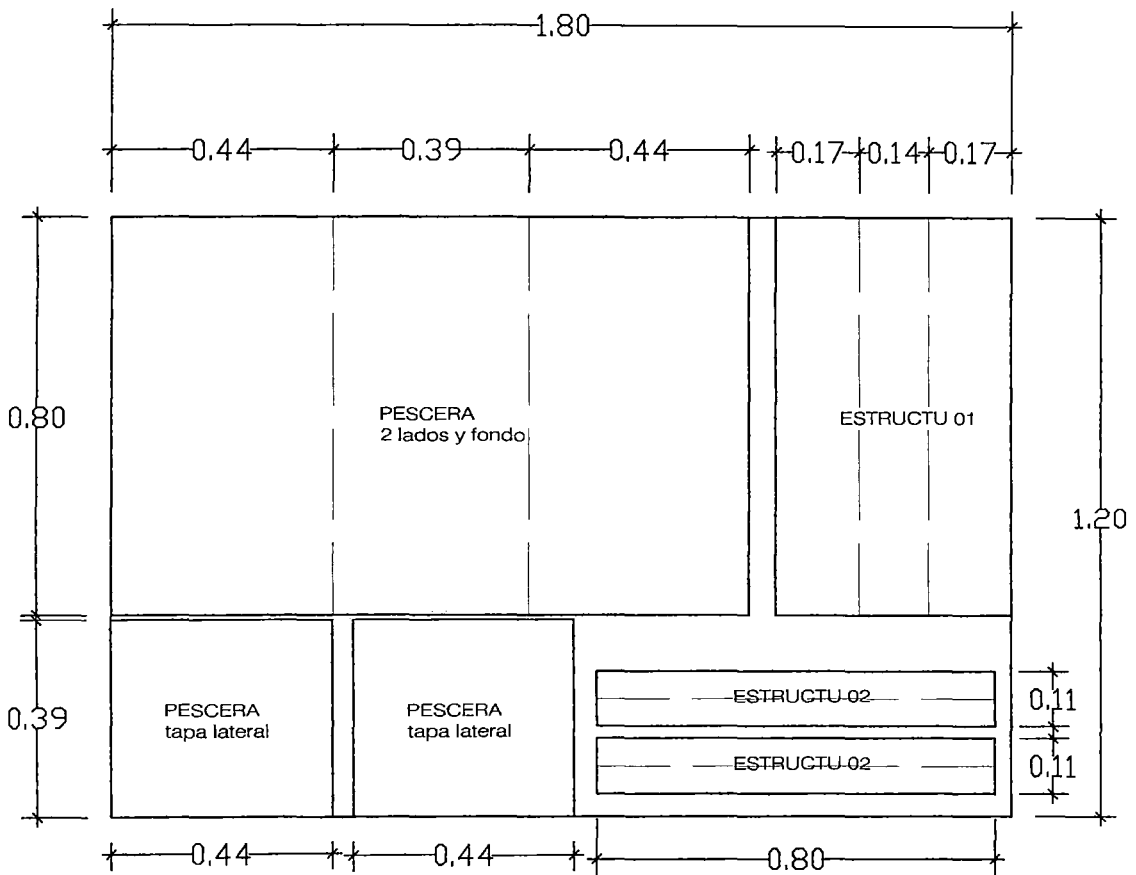


**C. Anexo N° 03: Esquema para la Construcción del  
Reactor Piloto UASB**

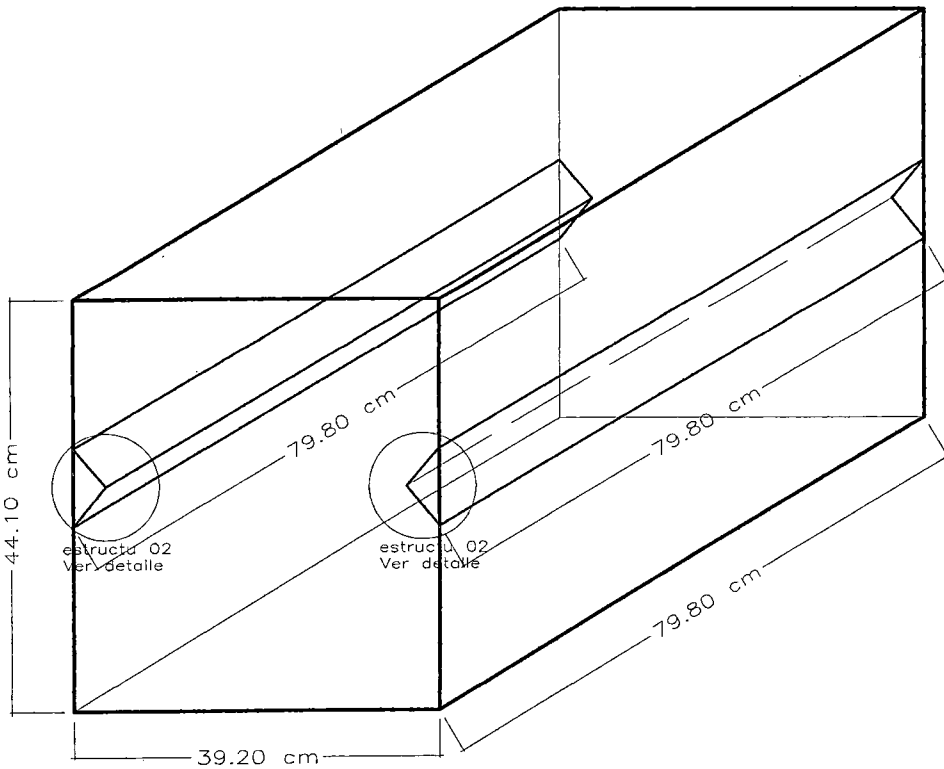
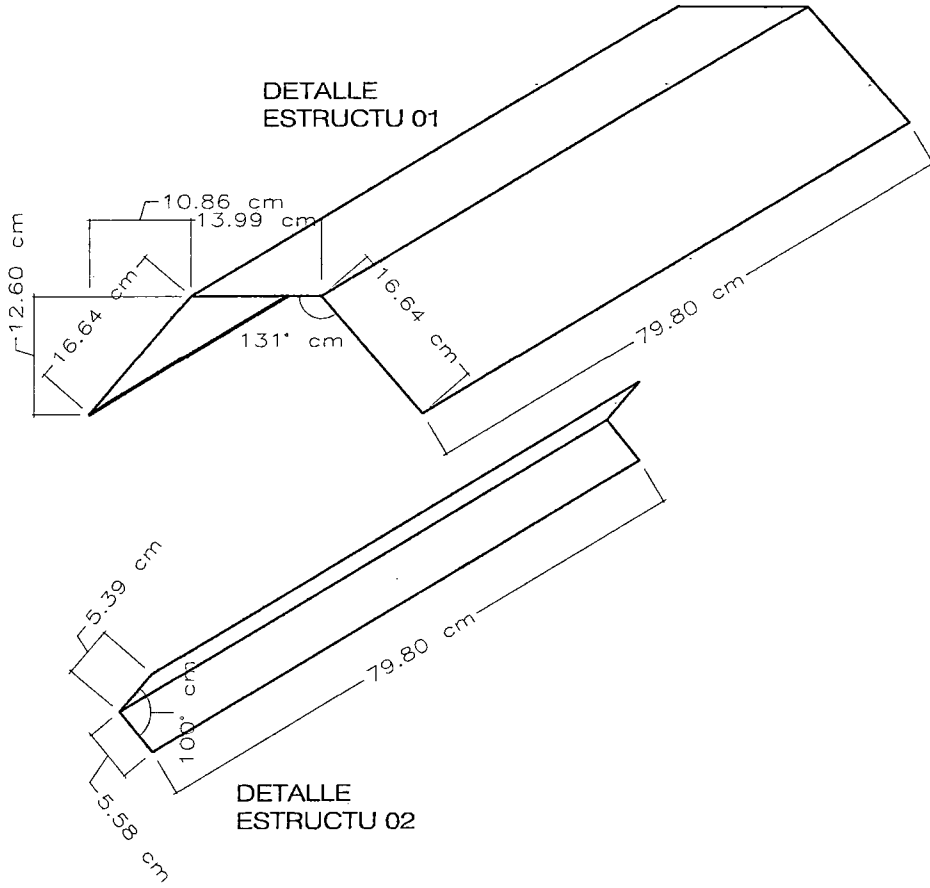


RAFA MODELO  
CORTE (Largo 79.80cm)  
ESCALA 1/50

- MODELO:  
-01 pescera de 44.10x39.20x79.80  
- 01 estructuras 01  
-02 estructuras 02



REPARTICION DE LA  
PLANCHA DE e= 6mm



RAFA MODELO  
PERSPECTIVA  
(Largo 79.80cm)  
ESCALA 1/50