

91
2 Gum

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica

ESTUDIO DEL SEDIMENTADOR DEL PROCESO
DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA

TESIS PROFESIONAL
Elaborada para obtener el
título de **INGENIERO CIVIL**

por:

Sylvie France C.M. Lefebvre Boulé

México, D.F. Junio 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	6
1.1 <i>Tratamiento primario</i>	9
1.2 <i>Mezcla y aeración</i>	10
1.3 <i>Sedimentación</i>	12
1.4 <i>Recirculación y desecho de los lodos</i>	13
2. IMPORTANCIA DEL SEDIMENTADOR SECUNDARIO	14
2.1 <i>Funciones del sedimentador secundario</i>	14
2.2 <i>Tipos de tanques de sedimentación</i>	18
2.3 <i>Sedimentación</i>	22
2.3.1 <i>Principios de sedimentación</i>	22
2.3.2 <i>Sedimentación por zonas</i>	24
3. METODOS CLASICOS DE DISEÑO DEL SEDIMENTADOR SECUNDARIO	28
3.1 <i>Datos de laboratorio</i>	31
3.2 <i>Determinación del área mínima</i>	32
3.3 <i>Ejemplo de diseño de un sedimentador secundario</i>	35

	Pág.
4. ANALISIS BIBLIOGRAFICO CRITICO DE LOS METODOS CLASICOS Y EL COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SEDIMENTADOR	40
5. MODELO A ESCALA PILOTO DE LA PLANTA DE CIUDAD UNIVERSITARIA	56
6. ANALISIS CRITICO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL MODELO	63
6.1 <i>Estudio hidráulico del sedimentador</i>	63
6.1.1 Clasificación de flujo continuo	64
6.1.2 Ensayos con trazador	64
6.1.3 Análisis de las características de un reactor	68
6.1.3.1 Modelos matemáticos	69
6.1.3.2 Modelo simplificado de la teoría Wolf Resnick	80
6.1.3.3 Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador	85
6.1.4 Determinación de las características hidráulicas del sedimentador secundario de la planta piloto de Ciudad <u>Un</u> iversitaria	88
6.1.5 Observaciones de los resultados	113
6.2 <i>Estudio de la variación de la compactación con el tiempo de retención hidráulico y la recirculación</i>	114

	Pág.
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
7.1 Conclusiones y recomendaciones del estudio hidráulico del sedimentador	121
7.2 Conclusiones y recomendaciones del estudio de la variación del grado de compactación con el tiempo de retención hidráulico y la tasa de recirculación	123
7.3 Conclusiones del estudio bibliográfico	124

INTRODUCCION

El proceso de lodos activados es uno de los métodos más empleados en el tratamiento de las aguas residuales tanto municipales como industriales por su eficiencia y versatilidad. Este proceso tradicionalmente se diseña a partir de pruebas estacionarias de laboratorio generalmente realizadas para gastos y cargas orgánicas constantes, con el objeto de obtener los parámetros cinéticos del sistema. Asimismo las características de sedimentabilidad de los lodos se obtienen en forma estática.

Esta forma de trabajar plantea una serie de interrogantes relativos a si los parámetros resultantes de las pruebas y utilizados para dicho diseño son los adecuados. En realidad lo que sucede es que el diseño se vuelve empírico y en general las plantas resultan sobredimensionadas o son insuficientes

para el manejo de los gastos previstos. Es decir, una vez en funcionamiento las plantas se manejan en estado estacionario para cargas y gastos próximos a los de diseño y en forma totalmente empírica. Sin embargo, en la práctica muchas veces varían fuertemente tanto los gastos como la carga orgánica por tratar. También, tomando en cuenta que las exigencias legales sobre la calidad del agua tratada por descargar al ambiente son bajas, se ha hecho muy poco para estudiar el comportamiento dinámico del proceso y en particular acerca de la sedimentación de los lodos activados.

Una solución al problema planteado consiste en estudiar matemáticamente modelos físicos para poder dar soluciones prácticas y con base científica. Lo que se busca es llegar a diseñar plantas que sean más eficientes, más económicas, y de fácil operación y mantenimiento.

En los últimos años se han venido realizando estudios dinámicos de estos procesos en forma creciente pero aún no se ha logrado un criterio integral para el diseño de los procesos citados.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se decidió iniciar un estudio con una planta piloto instalada en la Ciudad Universitaria, con los objetivos fundamentales siguientes:

1. Profundizar el conocimiento de los procesos antes mencionados
2. Verificar la validez de los modelos y parámetros cinéticos
3. Estudiar el comportamiento del modelo del sistema y del modelo cinético frente a perturbaciones
4. Probar varias formas de arranque y estabilidad del sistema
5. Estudiar técnicas de optimización y de control del proceso.

Sobre las técnicas posibles para el control de este sistema se presentó un informe (1). En dicho informe se describen los criterios utilizados para la construcción de la planta piloto, el diseño de los experimentos y el análisis de los primeros resultados.

De los resultados del estudio antes mencionado se obtuvieron las siguientes conclusiones iniciales:

1. La planta piloto permite realizar un diseño más ajustado de la potencia requerida por unidad de volumen

2. Es posible construir modelos a partir del prototipo con base en criterios de similitud y números adimensionales para los que existen relaciones experimentales
3. Se comprobó que las ecuaciones clásicas no permiten describir el funcionamiento dinámico del sistema
4. Las ecuaciones clásicas sólo verifican el valor de los parámetros cinéticos para el estado estacionario y para una recirculación de 0,5
5. La planta piloto permite, independientemente de encontrar o no un modelo matemático que represente al sistema, explorar la región de funcionamiento de éste y ayuda a determinar la zona óptima de sedimentación y la amplitud de la misma
6. El estudio también proporciona información sobre las respuestas del sistema a alteraciones en el gasto o en la recirculación
7. El sistema también da información sobre los grados máximos de compactación de los lodos en un sedimentador sin rastras.

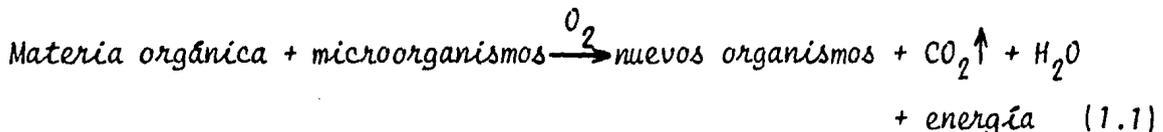
Asimismo y como resultado del estudio resalta la necesidad de

profundizar el estudio específico del sedimentador.

En el presente trabajo se presenta una descripción del proceso de los lodos activados; una revisión bibliográfica de investigaciones sobre sedimentadores; los resultados del análisis hidráulico del sedimentador estudiado, así como la variación de la compactación de los lodos con el tiempo de retención y con la recirculación.

1. EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

En la actualidad uno de los procesos más utilizados para la remoción de los contaminantes orgánicos de las aguas residuales es el denominado de lodos activados. El cual es un proceso biológico que consiste fundamentalmente en mezclar microorganismos (lodos activados) con la materia orgánica de las aguas residuales en un medio aerobio, es decir, rico en oxígeno. El mecanismo básico del proceso se puede representar por la siguiente reacción biológica



Como se puede apreciar en esta reacción el proceso incluye:

a) microorganismos que utilizan la materia orgánica como

alimento (sustrato) para producir más microorganismos, los cuales eventualmente se sedimentarán para retirarlos parcialmente del sistema,

- b) bióxido de carbono que se disipará en la atmósfera,
- c) agua que sale como parte del efluente final, y
- d) energía que es utilizada por los microorganismos para mantener sus sistemas vitales, es decir para la reproducción, asimilación, movimiento, etc.

El proceso convencional de lodos activados consta esencialmente de las siguientes etapas (fig 1.1) :

- 1) Tratamiento primario
- 2) Mezcla y aeración
- 3) Sedimentación
- 4) Recirculación y desecho de los lodos.

En la actualidad existen variantes al proceso convencional de lodos activados, tales como:

- 1) Aeración disminuida
- 2) Aeración escalonada
- 3) Proceso de lodos activados de alta tasa

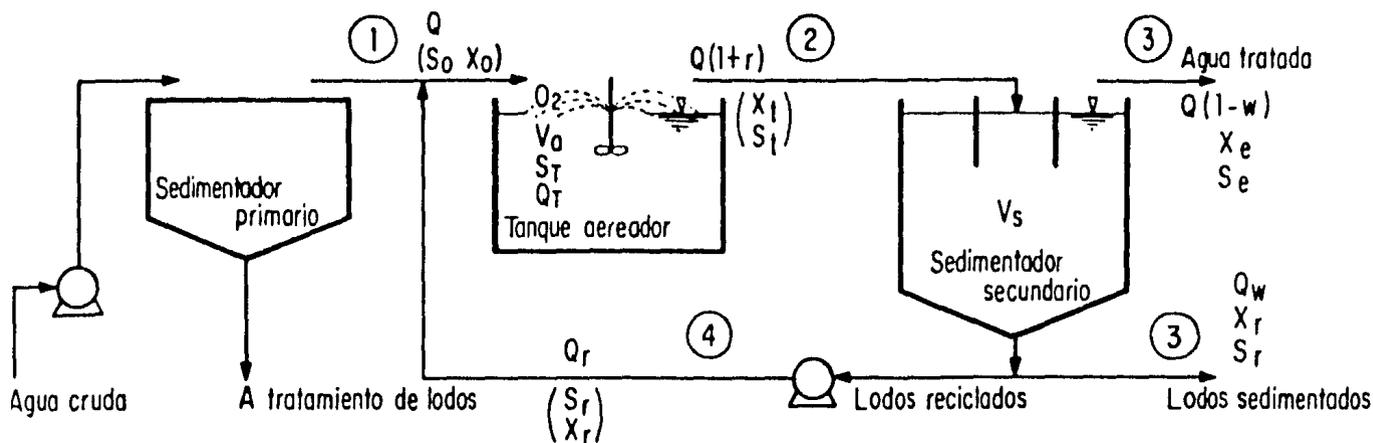


Fig 1.1 Esquema del proceso de lodos activados

SIMBOLOGIA

r	fracción de recicló
w	fracción de lodos desechados
S_o	DBO_5 en el influente
S_T	DBO_5 en el tanque
S_r	DBO_5 en el recicló
S_e	DBO_5 en el efluente
X_o	sólidos suspendidos volátiles en el influente
X_t	sólidos suspendidos volátiles en el tanque
X_r	sólidos suspendidos volátiles en el recicló
X_e	sólidos suspendidos volátiles en el efluente
Q	caudal de entrada de las aguas a tratar

- 4) Proceso de lodos activados completamente mezclado
- 5) Aeración extendida
- 6) Estabilización por contacto
- 7) Reaeración de lodos
- 8) Zanjas de oxidación

1.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene por objeto remover de las aguas residuales la mayor cantidad posible de elementos cuya naturaleza o dimensión sería perjudicial a los tratamientos ulteriores o podría obstruir los conductos, bombas, etc., como es el caso de arenas, sólidos en suspensión, etc.

Una planta para el tratamiento de aguas residuales puede tener uno o varios sistemas de tratamiento primario dependiendo de la calidad de las aguas residuales por tratar. Las principales operaciones de pre-tratamiento son:

- a) rejas o rejillas
- b) desmenuzadores
- c) desarenadores
- d) separadores de grasas o aceites
- e) sedimentador primario
- f) neutralización (cuando el agua es altamente alcalina ó ácida).

1.2 Mezcla y aeración

Después del tratamiento preliminar, las aguas residuales son conducidas al tanque de aeración (o reactor) donde se mezclan con los lodos activados recirculados para formar lo que se llama el licor mezclado (LM).

En el reactor las aguas residuales sufren una prolongada aeración. El aire se agrega al licor mezclado generalmente por alguno de los siguientes métodos:

- a) aeración por difusión o aeración a presión;
- b) aeración mecánica.

La aeración puede hacerse simplemente con aire, con un gas enriquecido con oxígeno o hasta con oxígeno puro.

Los sistemas de aeración tienen una doble finalidad:

- a) Proporcionar a los microorganismos de los lodos activados el oxígeno que necesitan para su metabolismo,
- b) Provocar un movimiento y una homogeneidad suficientes para asegurar un contacto íntimo entre el medio viviente, los elementos contaminantes y el oxígeno introducido.

La cantidad de oxígeno que se requiere depende de los siguientes factores:

- a) La carga orgánica ($\text{kg DBO}_5/\text{Kg SST}\cdot d$)
- b) El tiempo de aeración

La DBO_5 o sea la demanda bioquímica de oxígeno es el parámetro para cuantificar la contaminación orgánica más utilizado en el tratamiento de las aguas residuales. La medición de la DBO_5 es significativa porque se utiliza para determinar la cantidad de oxígeno que se necesita para estabilizar biológicamente la materia orgánica a 20°C y en oscuridad durante 5 días.

El intervalo de tiempo en que los microorganismos están en contacto con las aguas residuales se llama tiempo de retención hidráulico. Esto es un factor muy importante en el proceso, ya que hay que dar suficiente tiempo a los microorganismos para que asimilen la materia orgánica de las aguas residuales.

Si el tiempo de retención en el tanque es demasiado corto no se removerá toda la materia orgánica y la DBO_5 del efluente será alta. Por otra parte el empleo de cantidades excesivas de aire no solamente es un desperdicio sino que propicia la formación de lodos tan finamente dispersos que llegan a ser

de difícil sedimentación.

Normalmente, para lograr un tratamiento completo de las aguas residuales y para que el proceso convencional de lodos activados resulte más económico, se recomiendan tiempos de retención hidráulica de 6 a 8 horas con aire difundido y de 8 a 12 horas con aeración mecánica (2).

1.3 Sedimentación

En el proceso convencional de lodos activados la sedimentación secundaria sigue a la etapa de aeración. Una vez formados los flóculos de lodos activados, el problema radica en separar los sólidos del líquido. La sedimentación es el proceso empleado para remover los sólidos más densos que el agua y que tienen una velocidad de caída tal que pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable.

El efluente del sedimentador debe llenar los requisitos impuestos por la reglamentación, la cual estipula, generalmente y dependiendo del país, que tenga una concentración de DBO_5 inferior a 20 mg/l.

1.4 *Recirculación y desecho de los lodos*

Una parte de los lodos depositados en el tanque sedimentador es recirculada nuevamente al reactor. La cantidad de lodos recirculada al tanque de aeración debe ser suficiente para mantener una concentración deseada de microorganismos durante la aeración. Los lodos excedentes se mandan al sistema de tratamiento de lodos, pero indebidamente en algunos lugares se drenan a la red municipal de alcantarillado, como es el caso de la mayoría de las plantas de lodos activados construidas en México.

2. IMPORTANCIA DEL SEDIMENTADOR SECUNDARIO

2.1 *Funciones del sedimentador secundario:*

El sedimentador secundario en el proceso convencional de lodos activados juega un papel de gran importancia. Como cualquier tanque de sedimentación tiene la función principal de separar los sólidos suspendidos contenidos en el licor mezclado proveniente del tanque de aeración del agua ya tratada. De esta forma sale por la parte superior del sedimentador agua tratada casi libre de sólidos suspendidos y por la parte inferior salen los sólidos concentrados, de los cuales una parte se recircula al tanque de aeración y otra se desecha.

La importancia de esta función o sea la de sedimentación, es obvia, ya que finaliza el tratamiento de las aguas residuales entregando un efluente con una concentración mínima de sólidos.

dos suspendidos.

La DBO_5 total del efluente depende de dos factores:

- 1) la DBO_5 disuelta,
- 2) La DBO_5 de los sólidos suspendidos.

La DBO_5 disuelta depende del tratamiento biológico y de la carga orgánica inicial en la planta, por lo tanto, al llegar al sedimentador ya tiene un valor fijo. En la fig 2.1 (3) se puede apreciar como se deteriora la calidad del efluente por un mal funcionamiento del sedimentador al dejar escapar sólidos suspendidos en el efluente. Por ejemplo cuando la concentración de sólidos en el efluente es de aproximadamente 18 mg/l vemos que la DBO total está formada por 10 mg/l correspondientes a la DBO disuelta y otros 10 mg/l a los sólidos suspendidos que no fueron removidos por el proceso de sedimentación. Entre más alta la DBO total mayor es el porcentaje correspondiente a la DBO de los sólidos suspendidos.

En relación con la segunda función, la consecuencia de una deficiente compactación de los lodos, es más compleja, ya que un diseño erróneo en cuanto a la compactación de los lodos que debe lograrse en el sedimentador, puede llevar a una baja calidad del efluente por la pérdida de los sólidos en suspensión. En este caso la pérdida de los sólidos se debe a que el sedi-

mentador no es capaz de acumular adecuadamente los lodos en el fondo del mismo.

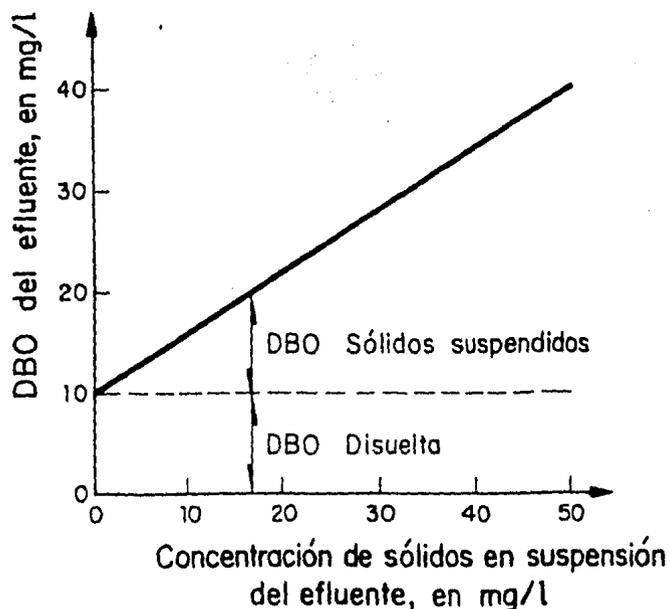


Fig 2.1 Efecto de la sedimentación en la calidad del efluente de una planta de los lodos activados

También se pueden alterar las condiciones en la fase biológica del proceso debido a una deficiente recirculación de los lodos que no se hayan compactado de acuerdo al factor de diseño.

Como se puede apreciar, el costo y la eficiencia de una plan-

ta de tratamiento de lodos activados son influenciados por el buen funcionamiento del sedimentador secundario. Para que su eficiencia sea máxima se necesita tener un diseño adecuado a las condiciones específicas de las aguas residuales por tratar, una buena construcción de las instalaciones, una operación ejecutada por personal capacitado y con los conocimientos necesarios para el buen funcionamiento de la planta y, finalmente, darle un buen mantenimiento a todas las unidades de la planta.

En la práctica se ha observado que las unidades de sedimentación secundaria en operación no proporcionan los resultados esperados. Varios factores internos y externos son los que contribuyen a las perturbaciones observadas en la calidad del efluente que producen. Entre otros se han identificado los siguientes factores:

- | | | |
|----|--------------------------------------|--|
| 1. | Variable del influente: | Gasto
DBO ₅
Sólidos en suspensión |
| 2. | Condiciones ambientales: | Temperatura de las aguas residuales
Viento
Turbulencias de diversos tipos |
| 3. | Parámetros biológicos operacionales: | Tiempo de residencia celular (θ_c)
Sólidos en suspensión del licor mezclado (SSLM)
Relación sustrato/microorganismos (F/M)
Gasto de recirculación (Q_r)
Concentración de sólidos en la recirculación (X_r)
Gasto de lodos de desecho (Q_w) |

- | | | |
|----|--------------------------------------|--|
| 4. | Características de la sedimentación: | Índice volumétrico de lodos (IVL)
Sólidos sedimentables |
| 5. | Tamaño de la planta | |
| 6. | Cambios temporales en el gasto | |
| 7. | Factores humanos | |

De lo anterior resalta la importancia de estudiar más a fondo las interacciones entre estos factores y su efecto sobre el funcionamiento de la planta en general y del sedimentador secundario en particular. Esto último se analizará con más detalle en el capítulo 4 del presente trabajo.

2.2 Tipos de tanques de sedimentación

Los tanques de sedimentación pueden funcionar sobre el principio de llenado y vaciado o sea de forma discontinua o pueden operar de manera continua. Los tanques de llenado y vaciado se usan rara vez a causa de su ineficiente utilización y de su mayor costo en comparación con los sedimentadores de funcionamiento continuo. En estos últimos se deja que el líquido fluya lenta y continuamente a través del tanque y la sedimentación tiene lugar a medida que el líquido va pasando por él.

Los sedimentadores de flujo continuo pueden dividirse en 4 categorías como se puede apreciar en la Tabla 2.1. En función

de la forma hay tres tipos de sedimentadores; circular, cuadrado y rectangular. Los sedimentadores de placas o de tubos, también llamados acelerados o de alta tasa, pueden adaptarse a cualquier configuración deseada, es decir se pueden incorporar a una forma circular, cuadrada o rectangular. Sin embargo se prefiere instalarlos en tanques rectangulares.

TABLA 2.1

Características	FORMA			
	CIRCULAR		RECTANGULAR	
Régimen de flujo	Radial Vertical		Líneal o, radial Vertical	
Alimentación	Central	periférica	por un costado	central
Salida	Periférica	central	costado opuesto a la alimentación	periférica
Extracción de lodos	Depende del tipo de rastras. Pueden ser rastras de empuje hacia una tolva o de succión			

El régimen de flujo en un tanque circular es de tipo radial. La entrada del influente puede hacerse por el centro en cuyo caso sería un tanque de alimentación central con la salida del efluente cerca de la periferia (ver fig 2.2) o pueden ser de

alimentación por la periferia con la salida por el centro, pero como frecuentemente se utilizan brazos superficiales para remover espumas, se coloca cerca de la periferia (ver fig 2.3).

Los tanques cuadrados pueden tener regímenes de flujo de tipo radial o lineal. Los tanques rectangulares son de flujo lineal horizontal.

Generalmente el equipo utilizado para la recolección de los lodos y de la espuma en los tanques circulares y en los cuadrados son rastras y brazos de tipo rotatorio. Las rastras para el lodo y la espuma están ligadas a una flecha motriz que las hace girar lentamente alrededor del centro. En este caso el puente de acceso es estático. Sin embargo hay sedimentadores con rastras y espumaderas que se mueven con el puente de acceso, ya que el desplazamiento se hace siguiendo la periferia del tanque.

En el caso del sedimentador estudiado, es decir el sedimentador de la planta piloto de Ciudad Universitaria, se trata de un tanque circular de alimentación central con régimen de flujo vertical ascendente, sin rastras.

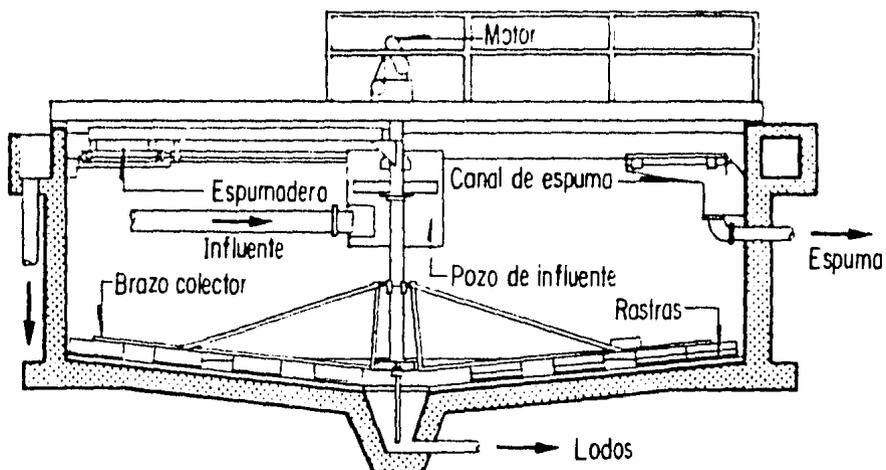


Fig 2.2 Sedimentador circular de alimentación central

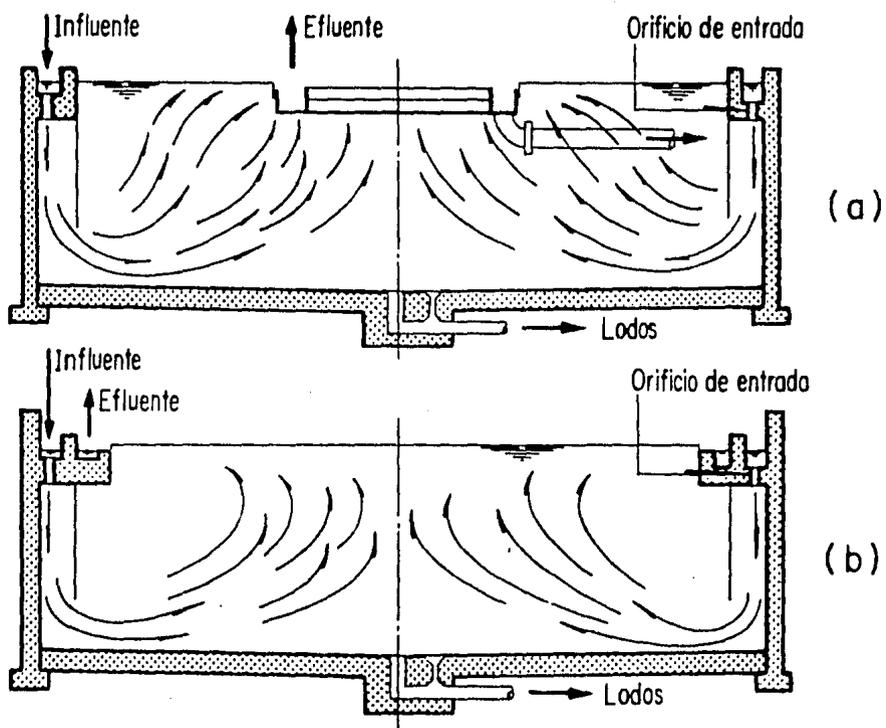


Fig 2.3 Alimentación periférica (a) sedimentador circular con efluente central (b) sedimentador circular con efluente periférico

2.3 Sedimentación:

2.3.1 Principios de sedimentación

La fuerza principal que actúa para que las sustancias en suspensión contenidas en el agua se sedimenten, es la gravedad. No se ha ideado fórmula alguna, teórica o empírica, que sea aplicable para el diseño integral de tanques de sedimentación, debido a la gran variedad de condiciones que se registran durante su funcionamiento. Entre estas condiciones figuran:

1. El tamaño de las partículas. Cuanto mayor sea este tamaño, mayor es la velocidad de asentamiento. La aglomeración, la degradación biológica, la solubilidad y la precipitación afectan al tamaño de las partículas durante la sedimentación.
2. El peso específico de las partículas en suspensión.
3. La concentración de los materiales en suspensión.
4. La temperatura. Cuanto mayor es la temperatura menor es la viscosidad del líquido y más rápida la sedimentación.

5. El periodo de retención. Cuanto mayor es este periodo, dentro de ciertos límites, mayor es la eficiencia de la sedimentación.
6. La profundidad, la forma, las características de las zonas de entrada y de salida y en general el funcionamiento hidráulico del tanque.
7. La velocidad y longitud del escurrimiento a través del tanque.
8. La acción del viento sobre la superficie del líquido en el tanque.
9. La acción metabólica.
10. Las fuerzas de tracción entre partículas.

El proceso de sedimentación se puede dividir básicamente en tres etapas dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en la solución; estas etapas son:

1. Sedimentación discreta. En este tipo de sedimentación las partículas sedimentadas conservan su individualidad, es decir, no se aglutinan con otras partículas, por lo tanto sus propiedades físicas (tamaño, forma, peso espe-

cífico), no se alteran durante el proceso. La sedimentación de partículas de arena es un ejemplo típico de la sedimentación discreta.

2. Sedimentación floculenta. Aquí la aglomeración de las partículas sedimentadas es acompañada por cambios en la densidad y por tanto en la velocidad de la sedimentación; un ejemplo de esto se presenta en los tanques de sedimentación primaria donde se remueven del agua residual gran parte de los materiales orgánicos e inorgánicos que contienen en suspensión.
3. Sedimentación por zonas. Los flóculos aglomerados en suspensión, forman una estructura reticulada o manto, la cual se sedimenta como una masa, presentando una división clara con la fase líquida durante el proceso de sedimentación. Ejemplo de esto se tiene en la sedimentación de lodos activados en los sedimentadores secundarios. A continuación se describe detalladamente este fenómeno.

2.3.2 Sedimentación por zonas

Debido a sus características, la sedimentación de los lodos activados está regida por la sedimentación por zonas, por consiguiente se estudiará esta última mas a fondo para comprender

mejor su comportamiento.

La sedimentación por zonas es típica de lodos activados y/o lodos químicamente floculados cuando las concentraciones de los sólidos son mayores de 500 mg/l. Suponiendo que el lodo tiene una concentración inicial uniforme X_0 , el proceso de se dimentación se distingue en varias zonas como queda mostrado en la fig 2.4.

Al principio, los lodos se sedimentan con velocidad constante, la cual es función de la concentración inicial de sólidos X_0 .

Luego aparece una zona de transición cuando la velocidad de sedimentación decrece debido al aumento en la concentración de los sólidos. Mientras tanto, en el fondo, la capa de lodos sedimentados aumenta con una velocidad constante, la cual se llama zona de compactación. En un momento t_c las dos capas 1 y 2 de agua clara y de compactación se encuentran y desaparece la zona de transición. En este instante los lodos tienen una concentración X_c , la cual se llama comúnmente concentración crítica. Se inicia entonces realmente la compactación y los lodos empiezan a ser más densos eventualmente alcanzando una concentración última X_u .

La velocidad de sedimentación en el tiempo t_c corresponde a V_c la cual está dada por la pendiente de la tangente a la cur

va de sedimentación en C como se indica en la fig 2.5 donde $v_C < v_S$.

La gráfica mostrada en la fig 2.5 es la base de cálculo para el diseño de los sedimentadores secundarios, su procedimiento se explica en el siguiente capítulo.

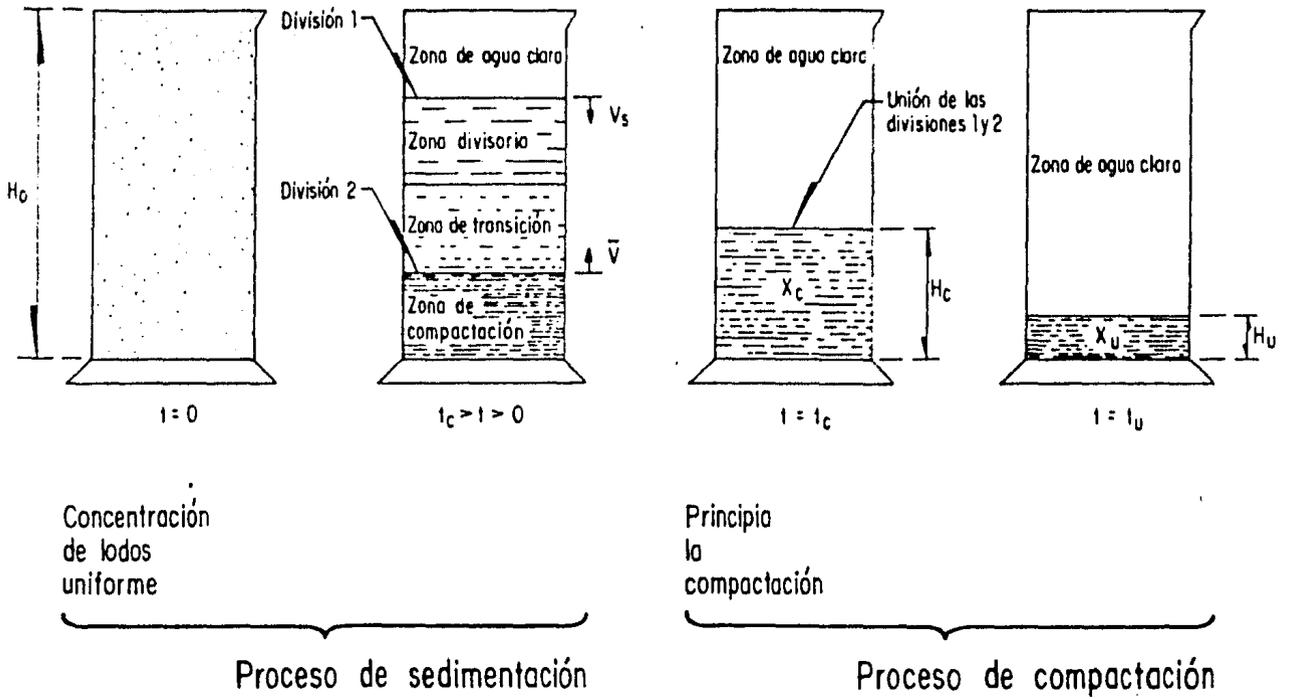


Fig 2.4 Sedimentación por zonas

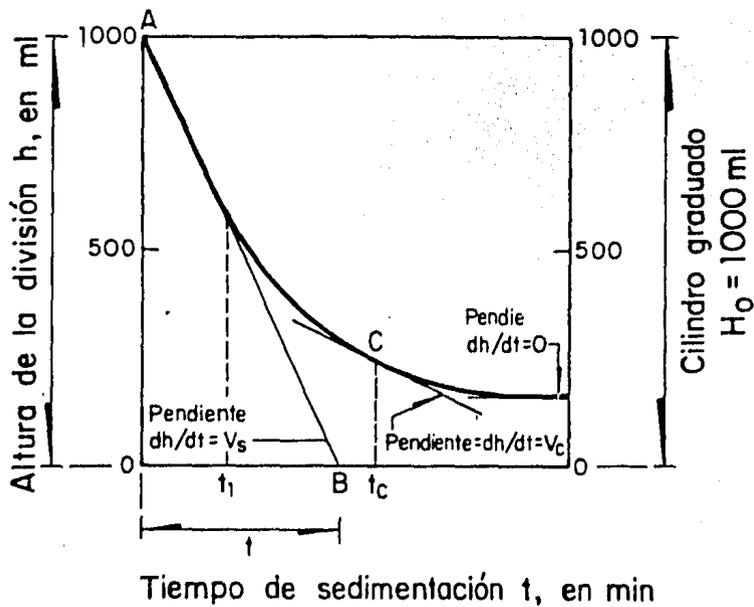


Fig 2.5 Gráfica de sedimentación de lodos

3. METODOS CLASICOS DE DISEÑO DEL SEDIMENTADOR SECUNDARIO

A principios del siglo XX, en 1904, Hazen (4) empezó a estudiar el problema de la sedimentación como proceso de separación mecánica. Hizo una distinción entre la sedimentación en estado de reposo y en estado de turbulencia y restringió sus estudios a suspensiones de partículas discretas con velocidad única (fig 3.1). Sus conclusiones fueron que la remoción de la materia suspendida depende del área de la superficie y no del volumen del tanque. Asimismo encontró que las características de sedimentación de las suspensiones por sedimentar se tomaban rara vez en cuenta en el diseño de los sedimentadores.

Camp (5), en 1946 siguió los estudios de Hazen ampliándolos en el caso de partículas discretas con velocidades de sedimentación variables en un sedimentador ideal. De esta manera desarrolló un modelo que se emplea todavía cuando se diseñan se

dimetadores de flujo continuo en condiciones de reposo. Sus análisis demostraron que:

$$V_{\Delta} = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

donde

Q gasto del sedimentador, (m^3/min)

A área del sedimentador (m^2)

V_{Δ} velocidad de sedimentación (m/min)

La cantidad Q/A es conocida como "carga superficial" o "velocidad de derrame" del tanque sedimentador y es igual a la velocidad de sedimentación de las partículas con un tamaño tal que son completamente removidas de la masa de agua a su paso por el tanque sedimentador. También de la ecuación 3.1 resalta que la eficiencia de la sedimentación es principalmente función del área del tanque más que de la profundidad. Esto en principio lleva a querer utilizar un tanque de gran área y poca profundidad, sin embargo existen ciertas razones que demandan utilizar sedimentadores con alguna profundidad tales como:

- a) Satisfacer las necesidades de remoción de los lodos por medio de una rastra mecánica
- b) Prevenir el efecto de barrido de las partículas de lodo

ya sedimentadas

Dobbins (6) en 1944 empleando conceptos de turbulencia de flujos, estudió la sedimentación de partículas discretas con velocidad de sedimentación única en condiciones de turbulencia y desarrolló una ecuación para el perfil de la concentración durante la sedimentación. Camp integró esta ecuación para obtener una expresión para determinar la remoción de las partículas con velocidad de sedimentación única. Aunque de mucha importancia el modelo de Dobbins es de aplicación limitada sobre todo porque las ecuaciones son demasiado incómodas para tener un uso práctico.

La sedimentación que tiene lugar en un sedimentador secundario de lodos activados es la llamada sedimentación por zonas como ya se vió en el capítulo anterior. Camp llegó a estudiar su comportamiento sin embargo no hizo recomendaciones especiales para el diseño de un tanque con dicho tipo de sedimentación. No fue sino hasta varios años después que en la práctica se comenzaran a utilizar datos de pruebas de laboratorio del asentamiento de los lodos activados para el diseño de los tanques sedimentadores secundarios. Con base en los datos obtenidos mediante dichas pruebas, se podía calcular el área mínima requerida para permitir la sedimentación de los lodos y la profundidad del tanque.

3.1 Datos de laboratorio

Para obtener los parámetros necesarios para el diseño del sedimentador se procede a realizar una prueba de sedimentación de lodos utilizando un cilindro de vidrio, graduado, de 1000 ml, el cual debe contar con un dispositivo para mover la solución con el fin de simular las rastras para lodos de los sedimentadores y para evitar la estratificación de los lodos.

El cilindro se llena con el licor mezclado, el cual al inicio de la prueba debe de tener una concentración de sólidos suspendidos uniforme. Se dejan sedimentar los lodos en condiciones de reposo y a ciertos intervalos de tiempo se mide la altura de la capa de lodos. Con los datos de la prueba se puede construir una curva de sedimentación como la mostrada en la fig 3.2.

En dicha figura, la velocidad de sedimentación de zona v_{SZ} corresponde a la pendiente de la tangente AB, o sea:

$$v_{SZ} = \frac{\partial A}{\partial B} = \frac{H_0}{t} \quad (3.2)$$

donde

H_0 es la altura del cilindro (cm)

t es el tiempo (min)

Esta determinación en laboratorio de la velocidad de sedimentación de zona debe repetirse con diferentes concentraciones iniciales de sólidos suspendidos X_0 , con el fin de obtener una familia de curvas de sedimentación.

3.2 Determinación del área mínima

El área mínima requerida para la sedimentación A_{se} depende de la velocidad V_{SZ} . Bajo condiciones de flujo continuo la velocidad del agua en el vertedor del efluente no puede exceder V_{SZ} si se desea una buena calidad del efluente. Esto resulta directamente del concepto básico del tanque sedimentador ideal planteado por Camp el cual se vió en la ecuación 3.1.

El valor de la velocidad de sedimentación de zona V_{SZ} se determina como se indica en la fig 3.2 para la curva correspondiente a la concentración de sólidos suspendidos en el efluente, X_0 , de diseño, la cual normalmente se toma como la máxima concentración esperada en el sistema.

Se calcula el área con la ecuación 3.3 que es un reacomodo de la ecuación 3.1 con el caudal del efluente y la velocidad de sedimentación de zona obtenida.

$$A_{se} = \frac{Q_e}{V_{SZ}} \quad (3.3)$$

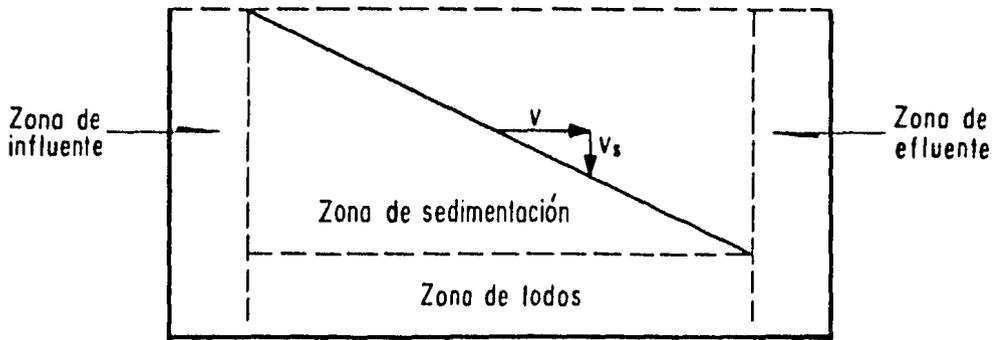


Fig 3.1 Modelo del tanque de sedimentación ideal

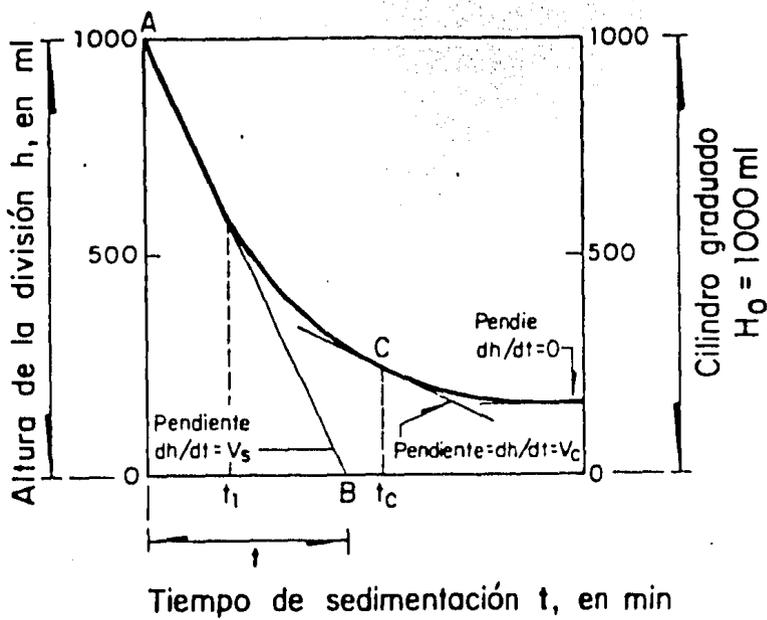


Fig 3.2 Gráfica de sedimentación de lodos

donde

Q_e gasto del sedimentador (m^3/min)

V_{SZ} velocidad de sedimentación de zona (m/min)

A_{se} área mínima requerida para la sedimentación (m^2)

Para el cálculo de Q_e se tiene que hacer un balance de masa del sistema:

$$Q = Q_e + Q_r \quad (3.4)$$

donde

Q gasto del sedimentador

Q_e gasto del efluente

Q_r gasto de recirculación

$$QX_o = Q_e X_e + Q_r X_r \quad (3.5)$$

$$Q_e = \frac{Q(X_r - X_o)}{X_r - X_e} \quad (3.6)$$

donde

X_o concentración de sólidos en el influente

X_e concentración de sólidos en el efluente

X_r concentración de sólidos en la recirculación

3.3 Ejemplo de diseño de un sedimentador secundario

Se desea diseñar un sedimentador secundario para un gasto de $8000 \text{ m}^3/\text{día}$. Los sólidos suspendidos en el influente son de 400 mg/l . Se hizo la prueba de sedimentación de los lodos y los resultados fueron los siguientes:

t (min)	Altura de lodos (ml)
0	1000
2,5	850
5,0	710
7,5	600
10,0	500
12,5	430
15,0	365
20	265
25	200
30	165
35	135
40	120
45	115

La concentración deseada de sólidos en la recirculación es de 12000 mg/l y en el efluente de 0 mg/l .

Solución:

a) Cálculo de V_{SZ}

Se grafican los datos de sedimentación como se muestra en la

fig 3.3. Se traza una tangente a la sección inicial de la curva y se prolonga hasta el eje de las abscisas. El punto interceptado $B = 17,8 \text{ min}$.

$$v_{SZ} = \frac{1000 \text{ ml}}{17,8 \text{ min}} = \frac{34,4 \text{ cm}}{17,8 \text{ min}} = 1,918 \text{ cm/min}$$

b) Determinación del caudal del efluente

De la ecuación 3.6

$$Q_e = Q \frac{X_n - X_0}{X_n - X_e} \quad (3.6)$$

$$= 8000 \text{ m}^3/\text{día} \frac{(12000 \text{ mg/l} - 4000 \text{ mg/l})}{12000 \text{ mg/l}}$$

$$= 5333,33 \text{ m}^3/\text{día}$$

c) Cálculo del área

$$A_{se} = \frac{Q_e}{v_{SZ}} \quad (3.3)$$

$$= \frac{5333,33 \text{ m}^3/\text{día}}{1,918 \times 10^{-2} \times 1440 \text{ m/día}}$$

$$= 193,10 \text{ m}^2$$

Si el sedimentador fuera circular

$$D = \frac{4A_{se}}{\pi}$$

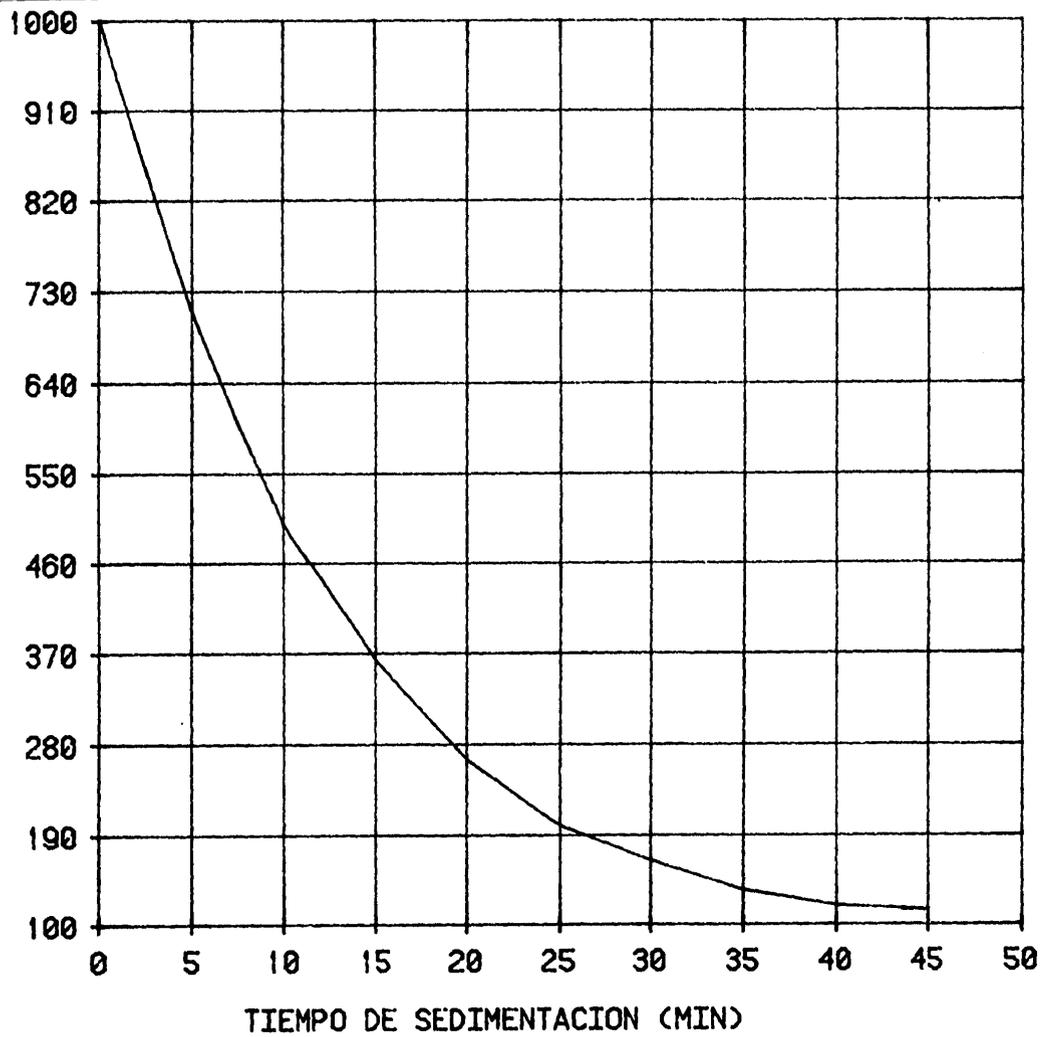


FIG 3.3 CURVA DE SEDIMENTACION DE LODOS XT=4000 MG/L

$$= 15,68 \text{ m}$$

Si se deja un diámetro de 16 m el área real será de:

$$A = \frac{\pi(16)^2}{4}$$

$$= 201,06 \text{ m}^2$$

d) Cálculo del volumen del sedimentador

Si se escoge un tiempo de retención hidráulico del sedimentador de 2 horas se tiene:

$$V_{se} = Q t$$

$$= \frac{8000 \text{ m}^3/\text{día} \times 2 \text{ horas}}{24 \text{ horas/día}}$$

$$= 666,67 \text{ m}^3$$

donde

t es el tiempo de retención hidráulica en horas

e) Cálculo de la profundidad

$$H = \frac{V_{se}}{A_{se}} = \frac{666,67 \text{ m}^3}{201,06 \text{ m}^2} = 3,3 \text{ m}$$

O sea que el sedimentador resultaría con las dimensiones siguientes:

$$D = 16.0 \text{ m}$$

$$H = 3.3 \text{ m}$$

4. ANALISIS BIBLIOGRAFICO CRITICO DE LOS METODOS CLASICOS Y EL COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SEDIMENTADOR

En el capítulo anterior se presentó de manera general el diseño de los sedimentadores secundarios a partir de las teorías de Hazen y Camp. Este diseño se ve limitado por factores que no corresponden a la realidad como son:

1. La aplicación de la teoría de sedimentación de partículas discretas;
2. Se supone que el sistema está en estado estacionario;
3. Que el flujo es laminar (no existe turbulencia);
4. Que se obtendrá la concentración de diseño en los lodos de recirculación.

Es obvio que la realidad es otra, pero no existiendo otra teoría para predecir la concentración de los sólidos suspendidos en el efluente de un sedimentador secundario, la posibilidad de optimizar los costos y la eficiencia ha sido limitada simplemente a la experiencia.

En el diseño y operación de los tanques de sedimentación siguen sin resolverse una gran variedad de problemas ya que poco se conoce del complejo mecanismo del comportamiento hidráulico y de la dinámica de los sedimentadores.

Desde hace aproximadamente quince años en los Estados Unidos se ha observado un auge en la investigación científica relativa a los sedimentadores finales. Seguramente existe un fenómeno similar en otros países, pero desafortunadamente la limitada información que se tiene en México relativa a estas investigaciones reduce la posibilidad de tomar referencias de ellos.

Después de los estudios de Hazen y Camp pasaron muchos años antes de que alguien se interesara en los mencionados estudios.

En 1957 Fitch (7) decía que el tiempo de retención hidráulico más que la carga superficial del sedimentador es la variable que gobierna la remoción de los sólidos. Este tiempo se define como:

$$\theta_H = \frac{V_t}{Q} \quad (4.1)$$

donde

- V_t volumen del sedimentador (m^3)
 Q gasto del sedimentador (m^3/h)
 θ_H tiempo de retención hidráulica (h)

La carga superficial del sedimentador se define como:

$$q_e = \frac{Q_e}{A_{S_e}} \quad (4.2)$$

donde

- Q_e gasto o caudal del efluente (m^3/h)
 A_{S_e} área del sedimentador (m^2)
 q_e carga superficial ($m^3/m^2/día$)

Pflanz (8) en 1969 observó y estudió durante dos años un sedimentador circular y dos rectangulares. Encontró que los factores que afectan la sedimentabilidad son: la carga superficial del sedimentador (q_e), la concentración de los sólidos suspendidos en el influente del sedimentador (SSLM), la temperatura y el viento. Según él la sedimentabilidad no se afecta con la tasa de recirculación de los lodos (r).

Uno de los estudios que parece haber sido bien aceptado en el ámbito de la ingeniería sanitaria (16) es la teoría que elabora

ró Dick (3) en 1970. Este investigador hace hincapié en la importancia de diseñar el sedimentador final en función de la compactación de los lodos y no solamente de la sedimentación de los mismos. Afirma que puede haber una pérdida de los sólidos en suspensión en el efluente debido a la incapacidad del tanque para llevar los sólidos al fondo. Por lo tanto concluye que si el sedimentador puede diseñarse para asegurar que los sólidos regresen al tanque con suficiente concentración, la cantidad de sólidos requeridos en el tanque de aeración puede contenerse en un tanque de aeración pequeño.

Para asegurarse de que el sedimentador cumple satisfactoriamente su función de compactación se debe de proveer suficiente área transversal para que la velocidad horizontal (q_i) no exceda la velocidad a la cual los sólidos alcanzan el fondo del tanque.

$$q_i = \frac{Q}{A_{S_e}} \quad (4.3)$$

donde

Q caudal del influente (m^3/d)

A_{S_e} área transversal del sedimentador (m^2)

q_i tasa de flujo del influente ($m^3/m^2/día$)

Los lodos son transportados al fondo del sedimentador por dos mecanismos:

- 1) Por la influencia de la gravedad;
- 2) Por el efecto de la extracción de los lodos para la recirculación y el desecho de los mismos.

La tasa total a la cual los sólidos de concentración inicial X_t llegan al fondo es igual a:

$$G = X_t V_s + X_t V_e \quad (4.4)$$

donde

G es el flujo de sólidos ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

X_t concentración de sólidos suspendidos en el influente del sedimentador (mg/m^3)

V_s velocidad de sedimentación de los lodos a la concentración (X_t) ($\text{m}/\text{día}$)

V_e velocidad promedio causada por la extracción de los lodos ($\text{m}/\text{día}$)

Se puede observar que por medio de esta fórmula la meta de un control de sólidos óptimo en el proceso de lodos activados sería la de llevar los sólidos al fondo del tanque maximizando V_s , mejorando así las características de sedimentación de los lodos y minimizando V_e , removiendo los lodos a la mayor concentración posible.

El valor mínimo de G es la capacidad de manejo de sólidos lí-

mite (GL) y es la base para determinar el área requerida en el tanque sedimentador para alcanzar el grado de compactación deseado. El área se calcula de la siguiente manera:

$$A_{co} = \frac{Q X_t}{GL} \quad (4.5)$$

donde:

- Q caudal del influente ($m^3/\text{día}$)
- X_t concentración de sólidos suspendidos del influente (mg/día)
- GL capacidad de flujo de sólidos límite (ver figura 4.1) ($m^3/m^2/\text{día}$)
- A_{co} área requerida para la compactación (m^2)

Entonces según Dick, el diseño de un sedimentador se hace mediante dos cálculos:

- 1) Área requerida para la sedimentación
- 2) Área requerida para la compactación

y se escoge el área mayor para luego determinar la profundidad del sedimentador.

En 1975 Shiba (10) realizó estudios de los cuales resalta la importancia de comprender las características de los sedimentadores, no solamente en estado estacionario sino también en condiciones no estacionarias.

Teóricamente según se ha visto, la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos depende sólo de la carga superficial del sedimentador y la profundidad no tiene efectos sobre la eficiencia. Sin embargo, según Shiba, la eficiencia de un tanque depende mucho de la profundidad y de varias condiciones de flujo tales como la turbulencia, cortos circuitos y espacios muertos (5). En un sedimentador estas condiciones interfieren con la sedimentación y pueden volver a poner en suspensión las partículas ya sedimentadas.

En muchas plantas de tratamiento de agua, el caudal de entrada y la concentración de los sólidos suspendidos en el sedimentador no son siempre constantes y pueden variar mucho con el tiempo (11), lo que da como resultado que las condiciones hidráulicas en un sedimentador sean variables con el tiempo. Por lo tanto, para predecir la concentración de los sólidos suspendidos en el efluente y para operar un sedimentador en tales condiciones se necesitaría un modelo matemático diferente al del tanque ideal.

Contrariamente a lo expuesto por Camp, Boyle (12) sostiene

que la profundidad del sedimentador es de gran importancia. Sus estudios parten del hecho de que los lodos activados se se dimentan con velocidad no constante, como ya se explicó en el capítulo 2. Boyle hizo pruebas de sedimentación en cilindros graduados con el tiempo de retención hidráulico del sedimentador ($\theta_{H_{se}}$) constante y variando la concentración de sólidos suspendidos SSLM. Cualitativamente los resultados observados se pueden apreciar en la fig 4.2.

La zona crítica para la calidad del efluente es la zona de agua clara. Como se puede observar en la fig 4.2, la profundidad de esta zona varía inversamente con la concentración de sólidos y en el caso (d) no se tiene porque no se dió suficiente volumen al tanque es decir, se dió poca profundidad.

Según Schmidt - Bregas (13) los límites de la relación profundidad sobre longitud (o radio) son:

Para sedimentador rectangular:

$$\frac{1}{200} > \frac{H}{L} > \frac{1}{35} \quad (4.6)$$

Para sedimentador circular:

$$\frac{1}{5} > \frac{H}{R} > \frac{1}{8} \quad (4.7)$$

donde

- H es la profundidad del sedimentador
- L es la longitud del sedimentador rectangular
- R es el radio del sedimentador circular

Según Metcalf-Eddy (17) el radio del sedimentador no debería de exceder 5 veces la profundidad.

Sería conveniente hacer pruebas cuantitativas sobre sedimentadores para verificar dichos límites y comprobar los estudios de laboratorio de Boyle. Se podría hacer un estudio relativo del área y profundidad del sedimentador con relación a la altura de la zona de agua clara.

En 1983 Tuntoolavest (14) realizó estudios en una planta piloto utilizando aguas residuales artificiales. Este investigador consideró que los factores que pueden afectar la eficiencia del sedimentador son dos:

- 1) Los factores que afectan la biofloculación en el reactor:
 - a) tiempo de retención celular (θ_c)
 - b) sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM)
 - c) turbulencia en el reactor debida a la velocidad del aire
 - d) la tasa de recirculación de los lodos (μ)

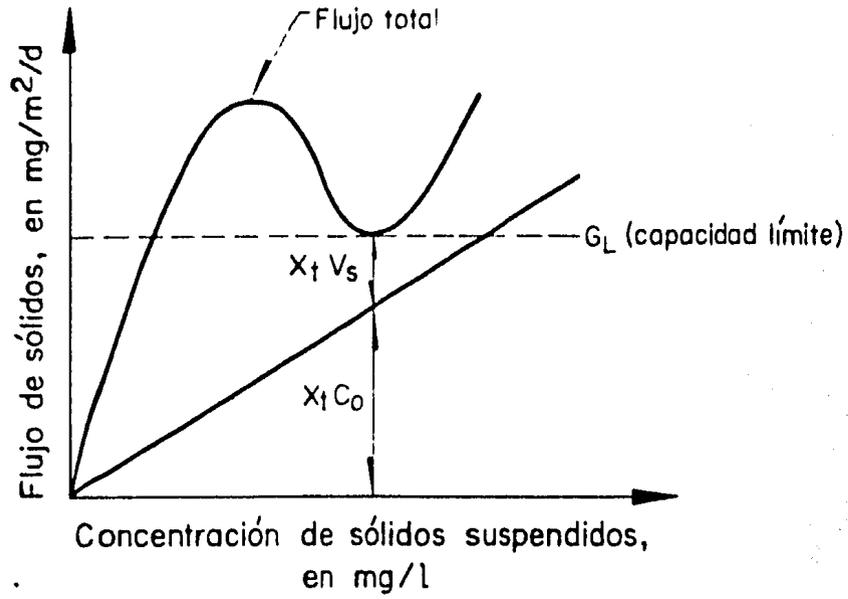
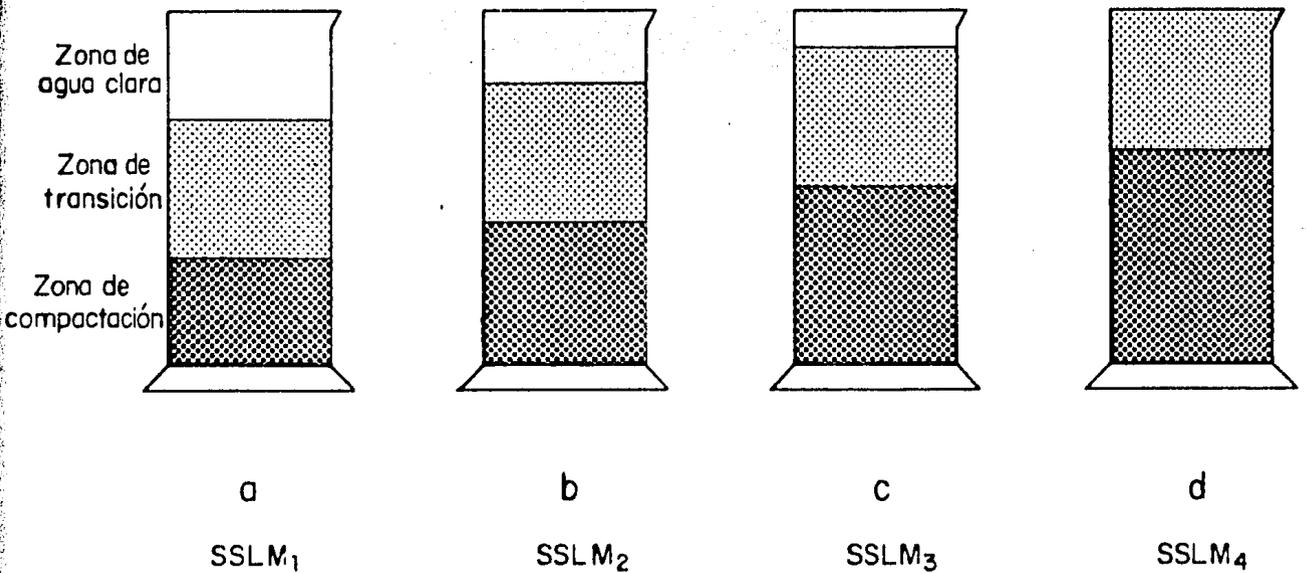


Fig 4.1



$$SSLM_1 < SSLM_2 < SSLM_3 < SSLM_4$$

Fig 4.2

2) Los factores que afectan la sedimentación de los lodos en el sedimentador:

a) *SSLM*

b) κ

c) la carga superficial (q_e)

d) el tiempo de retención hidráulico del sedimentador

$(\theta_{H_{se}})$

Este autor realizó pruebas que interrelacionan estos factores. De dichas pruebas se pudo concluir que:

1. Un incremento de los sólidos suspendidos en el reactor (*SSLM*), favorece una disgregación de los flóculos, lo que produce más partículas dispersas en el sedimentador ocasionando un aumento de sólidos suspendidos en el efluente debido a una sedimentación ineficaz
2. Al relacionar la tasa de recirculación κ y la velocidad del aire (turbulencia), se vió que cuando κ es mayor del 55%, al aumentar la turbulencia aumentaban los sólidos suspendidos en el efluente (X_e), sin embargo cuando κ era igual al 30%, al aumentar la turbulencia disminuían dichos sólidos.

Esto nos lleva a pensar que para recirculaciones altas existe mayor disgregación de flóculos, mientras que para recirculaciones reducidas la formación de los flóculos predomina, lo cual favorece la sedimentación.

3. Cuando se estudiaron los efectos de la tasa de recirculación con los *SSLM* y la velocidad del aire como parámetros se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) A baja turbulencia en el reactor un incremento en la recirculación reduce los sólidos suspendidos en el efluente (X_e)
- b) A alta turbulencia en el reactor un incremento en la recirculación provoca un incremento en los sólidos suspendidos en el efluente (X_e)
- c) A una turbulencia intermedia, la recirculación podría incrementar o disminuir los sólidos suspendidos en el efluente (X_e) dependiendo del valor de los *SSLM*.

Una posible explicación de este comportamiento es que podría deberse a la influencia del tiempo de retención hidráulico θ_H y de la formación de los flóculos. Por ende, sería conveniente profundizar los estudios implicando las 4 variables θ_H , *SSLM*, μ y la turbulencia

4. Los análisis relacionados con el sedimentador mostraron que χ_e era directamente proporcional a la carga superficial (q_e) e inversamente proporcional al tiempo de retención hidráulica del sedimentador ($\theta_{H\Delta e}$), aunque estas variables influyen en menor grado que la concentración de sólidos del licor mezclado (SSLM).

De estos estudios se pueden hacer varios comentarios en relación con el diseño del sedimentador:

Si se escoge un tiempo de retención celular θ_c , se tiene un valor de oxígeno necesario fijo. Si se aumenta el volumen del reactor, los SSLM disminuyen la turbulencia también, por lo que la tasa de recirculación τ óptima para este caso sería mayor que la que normalmente se usa para mejorar la calidad del efluente, o sea disminuir χ_e . Entonces contrariamente a lo que afirma Dick, el diseño más económico sería cuando el valor de los SSLM fuera más bajo es decir teniendo un volumen de reactor mayor.

Por otra parte Cashion (15) también realizó estudios experimentales en 1983, con vistas a definir los efectos de tres parámetros sobre la eficiencia del sedimentador. Estos parámetros son:

- 1) θ_c tiempo de retención celular
- 2) θ_H tiempo de retención hidráulico
- 3) q_e carga superficial del sedimentador

Sin embargo, los estudios de Cashion deben de tomarse con reservas ya que sus estudios los realizó con valores particulares para varios de los parámetros y por tanto no pueden extrapolarse a todas las condiciones.

Los resultados cualitativos obtenidos se exponen a continuación:

- 1) Al mantener constante el tiempo de retención celular igual a 5 días se notaban pocos cambios en los sólidos suspendidos en el efluente debido a las variaciones de los otros dos parámetros;
- 2) Al mantener constante el tiempo de retención hidráulico θ_H igual a 4 horas:
 - a) Aumentando el tiempo de retención celular θ_c y la carga superficial, aumentaban los sólidos suspendidos en el efluente (X_e),
 - b) Disminuyendo el tiempo de retención celular θ_c y la carga superficial q_e se observa poco cambio en los só

lidos suspendidos en el efluente (X_e).

- 3) Al mantener la carga superficial constante igual a $24.5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$:
- a) Aumentando el tiempo de retención celular θ_c y el tiempo de retención hidráulico θ_H , aumentaban los sólidos suspendidos en el efluente (X_e);
 - b) Disminuyendo el tiempo de retención celular θ_c y el tiempo de retención hidráulico θ_H , aumentaban los sólidos suspendidos en el efluente (X_e);
 - c) Al aumentar uno de los dos parámetros mientras disminuía el otro se notaba una mejora en los sólidos suspendidos en el efluente (X_e);
 - d) Proporcionalmente, el tiempo de retención celular θ_c es más susceptible de alterar los sólidos suspendidos que el tiempo de retención hidráulico θ_H ;

Según las pruebas realizadas por Cashion la carga superficial q_e no es un parámetro significativo en la eficiencia del sedimentador. Esta conclusión tiene implicaciones particulares en el diseño de las plantas de tratamiento de lodos activados, es decir que el área del sedimentador no es tan importante según

Cashion ya que la carga superficial q_e es función del área

$$q_e = \frac{Q_e}{A_{S_e}} \quad (4.2)$$

Desde el punto de vista operacional, Cashion encuentra dos soluciones para reducir la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente:

- 1) Dar un tiempo de retención celular bajo y un tiempo de retención hidráulico alto;
- 2) Dar un tiempo de retención celular alto y un tiempo de retención hidráulico bajo.

Como antes se dijo estas conclusiones de Cashion deben de tomarse con reservas ya que lo más conveniente hubiera sido que en los estudios se hubiera cubierto un mayor espectro de valores para que los resultados tuvieran más aplicación.

En general al revisar la literatura técnica relativa a estos temas, se puede notar que aún es poco lo que se ha hecho en materia de sedimentación secundaria y, en lo existente, se encuentran muchas discrepancias.

5. MODELO A ESCALA PILOTO DE LA PLANTA DE CIUDAD UNIVERSITARIA

Para la realización de los experimentos mencionados en la introducción se construyó una planta piloto a escala, de la planta de tratamiento de lodos activados existente en la Ciudad Universitaria.

A continuación se presenta una descripción detallada de dicha planta piloto, cuyo esquema se presenta en la fig 5.1 y el diagrama de flujo en la fig 5.2:

Descripción:

1. Influyente. El agua residual por tratar proviene de tres colectores de la Ciudad Universitaria: del área de Ciencias, (Instituto de Biología, Veterinaria, Facultad de

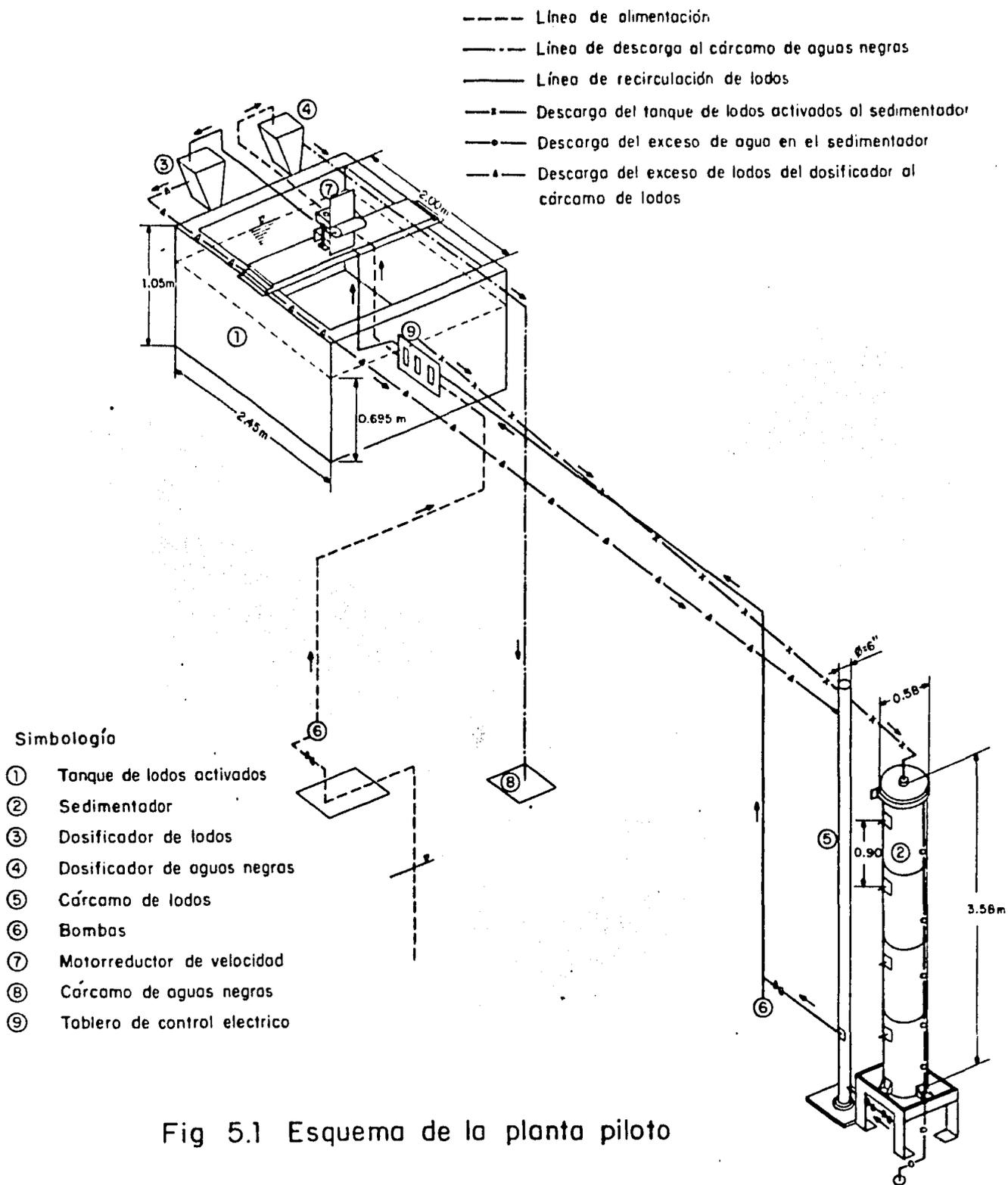
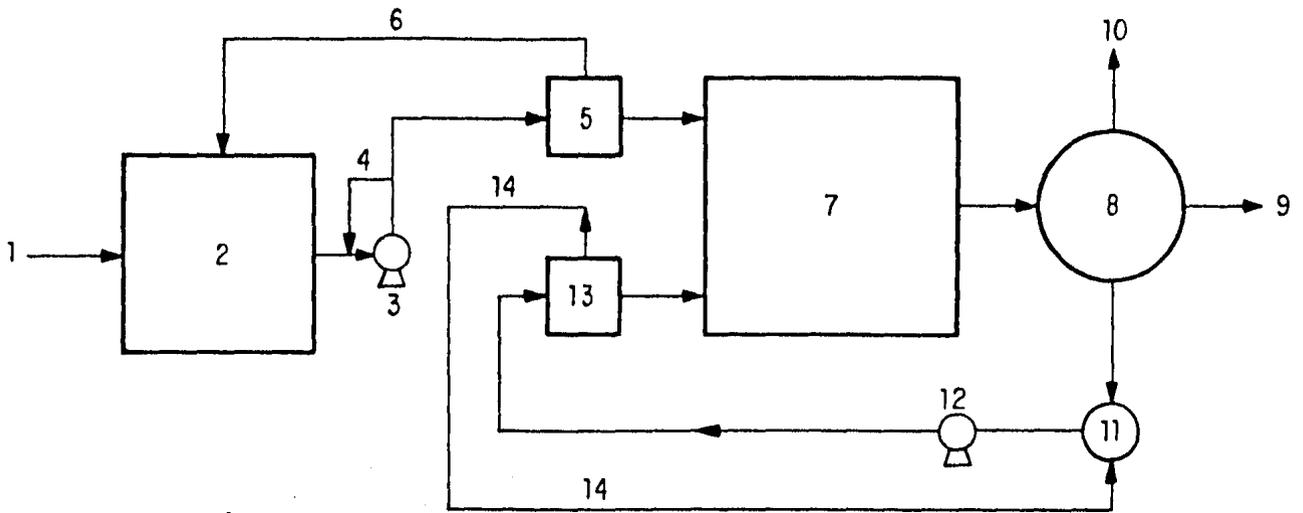


Fig 5.1 Esquema de la planta piloto

ciencias, etc.); del área de Humanidades (Facultades de Medicina, de Química, de Odontología, etc.) y del área de la colonia Copilco El Alto.

2. Cárcamo de captación. Se usó como tal, un cárcamo existente en la planta de tratamiento, cuya función principal es la de alimentar el sistema del filtro rociador instalado en la misma planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria.
3. Bombeo al sistema. El agua suministrada al sistema piloto se envió mediante una bomba de 1/2 HP con impulsor abierto.
4. Derivación del gasto en exceso. Debido a que la bomba usada para la alimentación proporcionó mucho más gasto del necesario se adaptó en su descarga una derivación con el fin de que a la planta piloto pasara únicamente el gasto necesario.
5. Tanque dosificador de agua cruda. Con el objeto de poder dosificar con la mayor precisión el gasto alimentado a la planta piloto, se instaló un tanque dosificador consistente en un pequeño recipiente trapecial como se indica en las figs 5.1 y 5.3, el cual tenía en una de sus caras perforaciones de diferentes diámetros y a varias profundida-



Influente (agua cruda)

Cárcamo de bombeo

Bombeo a la planta piloto

Derivación del gasto en exceso

Tanque dosificador de agua cruda

Retorno de gasto no dosificado

Tanque de aeración

8 Sedimentador

9 Efluente

10 Drenado de lodos

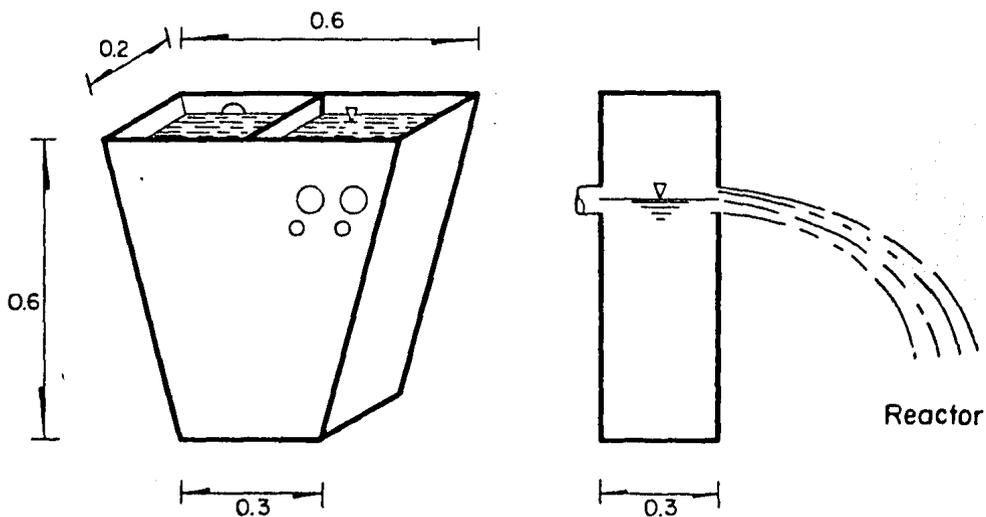
11 Cárcamo de lodos

12 Bombeo para la recirculación de los lodos

13 Tanque dosificador de lodos

14 Retorno de lodos no dosificados

Fig 5.2 Diagrama de flujo de la planta piloto de ciudad universitaria



Acotaciones, en m

Fig 5.3 Tanque dosificador de agua cruda

des, para lograr dosificar el gasto deseado.

6. Retorno del gasto no dosificado. Con el fin de mantener una carga hidráulica constante en el tanque dosificador, el gasto en exceso se retornaba por gravedad al cárcamo de captación.
7. Tanque de aeración. Consistente en una caja de concreto con un volumen de 2.835 m^3 que contaba con un agitador mecánico superficial de 1 HP. ver fig.5.4.
8. Sedimentador secundario. Integrado por una columna construida con 4 barriles metálicos de 200 litros de capacidad cada uno, unidos con soldadura. En la parte baja tenía un cono de lámina, ver fig 5.5. La tubería de llegada del agua aerada la descargaba dentro de un tramo de tubería de PVC de 150 mm (6") de diámetro que servía como mampara en el sedimentador. El agua tratada entraba por una canaleta de 7 cm de ancho que se construyó en la parte superior de este recipiente.
9. Efluente. El agua tratada se recolectó mediante la canaleta antes mencionada. Esta agua se vertía en el cárcamo de agua tratada del filtro rociador

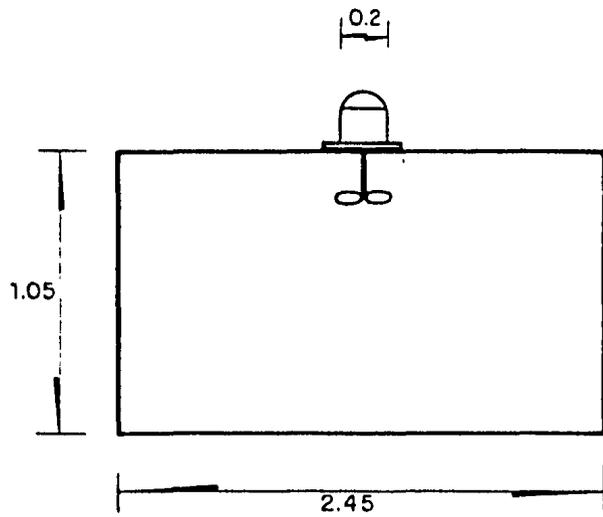


Fig 5.4 Tanque de aeración

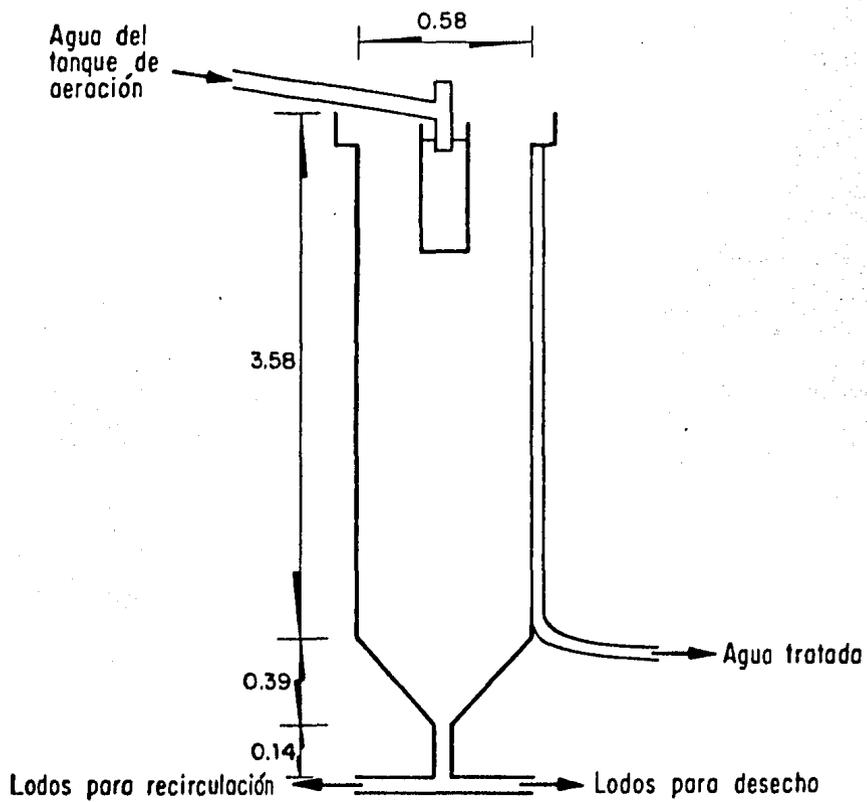


Fig 5.5 Tanque de sedimentación

10. Drenado de lodos. Mediante una válvula de globo localizada en el fondo del sedimentador se controlaba la extracción de los lodos del sedimentador.
11. Cárcamo de lodos. Se utilizó como tal una columna de PVC de 150 mm (6") de diámetro, ligeramente más alta que el sedimentador e intercomunicada con este por la parte baja.
12. Bombeo para la recirculación de lodos. Para tal efecto se utilizó una bomba de 1/4 HP que succionaba del cárcamo de lodos.
13. Tanque dosificador de lodos. Se usó como tal un tanque de las mismas características que el tanque dosificador de agua cruda.
14. Retorno de lodos no dosificados. Los lodos excedentes bombeados hacia el tanque dosificador de lodos, se retornaban al cárcamo de lodos mediante una tubería de PVC de 50 mm (2") de diámetro, la cual llegaba a la parte superior de dicha columna.

6. ANALISIS CRITICO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL MODELO

6.1 *Estudio hidráulico del sedimentador*

La eficiencia de la mayoría de los procesos en ingeniería sanitaria dependen en gran parte de las características hidráulicas de la unidad en la cual tienen lugar. Por lo tanto, el análisis de la eficiencia hidráulica de tales unidades es de gran importancia en la evaluación de su funcionamiento. El término eficiencia hidráulica utilizado en la terminología de la ingeniería sanitaria se refiere a la distribución del tiempo de retención de un fluido, al régimen de flujo en la unidad y a la determinación de los espacios muertos y los cortos circuitos.

En muchas plantas de tratamiento de aguas residuales no se pue

de lograr la eficiencia buscada debido a deficiencias hidráulicas que ocasionan diferentes distribuciones de flujo y afectan los periodos de retención del agua en los tanques o reactores.

6.1.1 Clasificación de flujo continuo

El flujo continuo se puede clasificar desde el punto de vista hidráulico en: modelos de flujo tipo pistón y en modelos con mezcla

- a) Flujo tipo pistón. Es aquel en que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella 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 y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad
- b) Flujo con mezcla. Implica una mezcla parcial o total del fluido entrante con el fluido que está en la unidad.

6.1.2 Ensayos con trazador

Para visualizar el funcionamiento de una unidad de tratamiento desde el punto de vista hidráulico es conveniente utilizar una sustancia trazadora (sal, colorante, sustancia radioactiva)

que pueda inyectarse en la entrada de la unidad y simultáneamente se pueda medir su concentración a la salida.

En el caso de los ensayos con trazador que se efectuó en el modelo de la planta de tratamiento de lodos activados, se utilizó cloruro de sodio en solución (3 Kg $NaCl$ en 10 l de agua). Dicha solución se vació en el punto central superior del sedimentador (fig 6.1) donde llega el agua proveniente del tanque de aeración, punto D. El muestreo se hizo en dos puntos en el efluente y en la recirculación. Antes de elegir esta sustancia se verificó que la concentración de la misma en el agua cruda era constante y baja. Se adicionó el trazador en forma instantánea con una concentración C_0 a la entrada del sedimentador en un tiempo muy corto (inferior a $1/30$ del tiempo teórico de detención t_0).

Se efectuaron 3 pruebas. En las dos primeras pruebas 1 y 2, el muestreo fue en los puntos A y B (fig 6.1), descargando al drenaje la recirculación. Los caudales en estas pruebas fueron:

Prueba No.	Gastos Teóricos		Gastos Reales		r
	Q(l/min)	Q(l/min)	Q_i (l/min)	Q (l/min)	
1	6.14	1.53	6.60	1.50	28%
2	20.28	8.35	20.10	8.40	42%

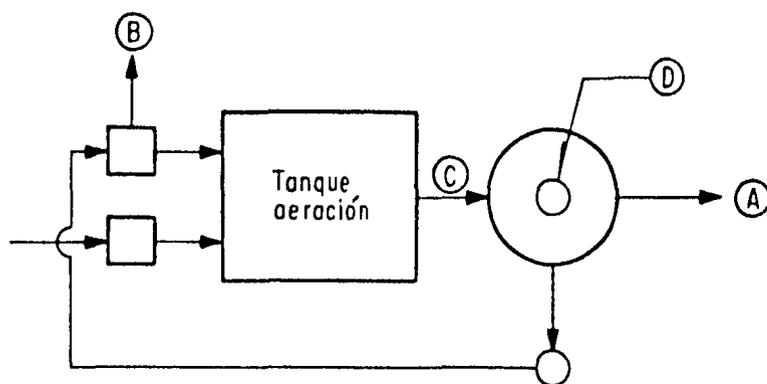
La tercera prueba se efectuó en forma similar pero con recirculación en el tanque de aeración (punto C) donde se hizo un muestreo junto con el del punto A.

Prueba No.	Gastos Teóricos		Gastos Reales		r
	Q_i (l/min)	Q_r (l/min)	Q_i (l/min)	Q_r (l/min)	
3	17.90	5.98	17.90	6.00	36%

Analizaremos aquí el caso de la inyección instantánea, supongamos que la concentración inicial C_0 , del trazador permanece constante durante el breve tiempo de inyección, Δt_0 . La representación de la concentración del trazador en función del tiempo a la entrada y durante la inyección de la sustancia será del tipo de la figura 6.2.

En el caso de una unidad en condiciones reales de funcionamiento (o sea con cierto grado de mezcla, corto circuitos, regiones muertas, corrientes de inercia), al medir y graficar la concentración del trazador a la salida en función del tiempo, se obtiene una curva del tipo de la indicada en la figura 6.3, (curva de Gauss).

Sumando los valores de la concentración obtenemos una segunda curva denominada $F(t)$ (fig 6.4), la cual representa la fracción de la totalidad del trazador que ha llegado a la salida



- (A) Agua tratada (efluente del sistema)
- (B) Agua recirculado desviado al drenaje
- (C) Agua que sale del reactor
- (D) Zona de entrada al sedimentador (punto de inyección de la solución trazadora)

Fig 6.1

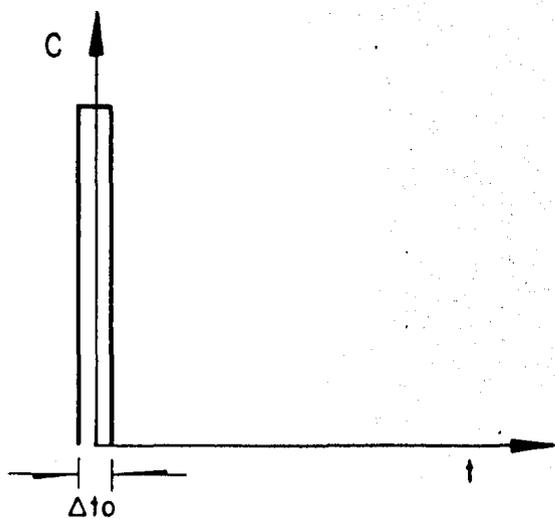


Fig 6.2

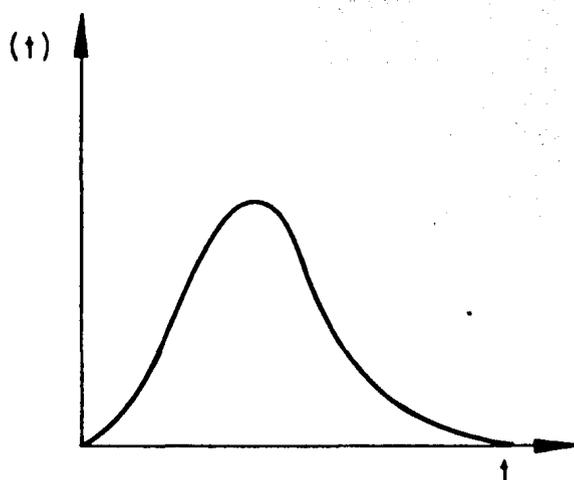


Fig 6.3

del reactor.

Al graficar el valor del logaritmo de los valores de $1-F(t)$ de esta segunda curva con los valores de (t/T) , siendo t el tiempo en el cual se toma la muestra a la salida del reactor y T el tiempo teórico de retención; se obtiene una curva que presenta una tendencia recta, fig 6.5, la cual es muy útil para la determinación de las características principales concomitantes al tiempo de retención o sea si el flujo producido es de tipo pistón, mezclado y si tiene o no espacios muertos.

6.1.3 Análisis de las características de un reactor

Generalmente se utilizan dos sistemas para evaluar las características hidráulicas de un reactor:

- a) Modelos matemáticos, especialmente el método desarrollado por Wolf y Resnick (18)
- b) Análisis de la curva de tendencia (curva de Gauss) y su correlación con las características hidráulicas.

6.1.3.1 Modelos matemáticos

Teoría General

Supongamos el caso de un tanque o reactor, que tenga un volumen de agua V , a la cual se le aplica una cantidad P de una sustancia (trazador), la cual se disuelve y mezcla completamente en toda la masa de agua. En este caso la concentración de esta sustancia en el volumen V será $C_0 = \frac{P}{V}$. Si en ese reactor se introduce el flujo Q en el tiempo inicial $t = 0$ y toda el agua que entra se mezcla completa e instantáneamente con el agua que había en el reactor, al medir la concentración de dicha sustancia a la salida del mismo, se encontrará que C va disminuyendo progresivamente a través del tiempo (ver fig 6.6).

Haciendo el balance de masa

Cantidad que entra

$$C_0 = \frac{P}{V} = \frac{QC}{V}$$

$$t_0 = \frac{V}{Q}; \quad C_0 = \frac{C}{t_0}$$

Cantidad que sale

$$- \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{C}{t_0} = - \frac{dC}{dt}$$

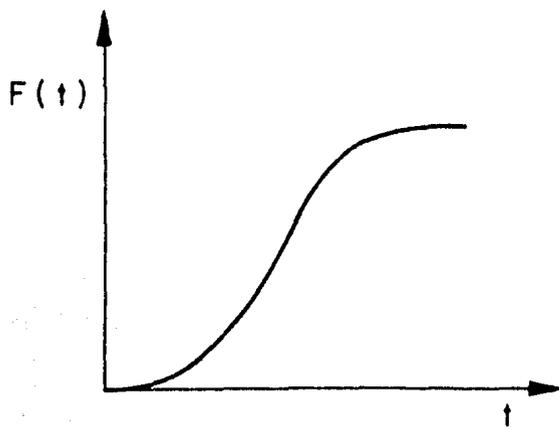


Fig 6.4

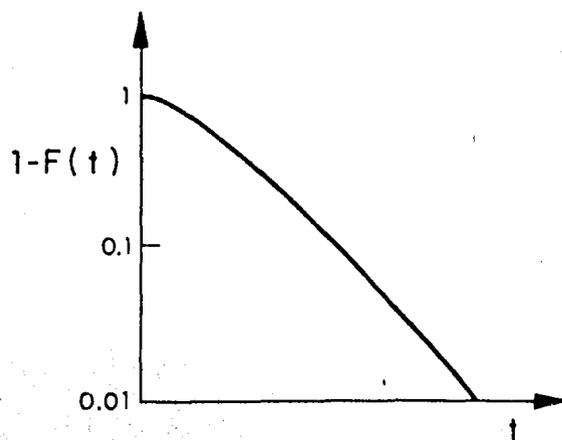


Fig 6.5

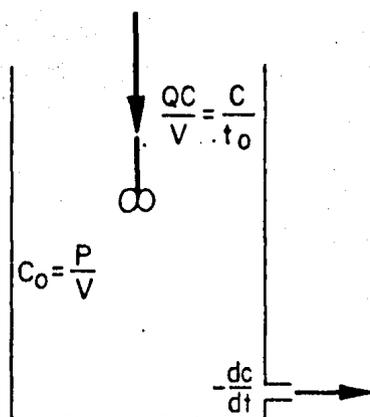


Fig 6.6

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dt}{t_0}$$

integrando

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = - \int_0^t \frac{dt}{t_0} = - \frac{1}{t_0} \int_0^t dt$$

$$\ln C - \ln C_0 = - \frac{t}{t_0}$$

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (6.1)$$

donde

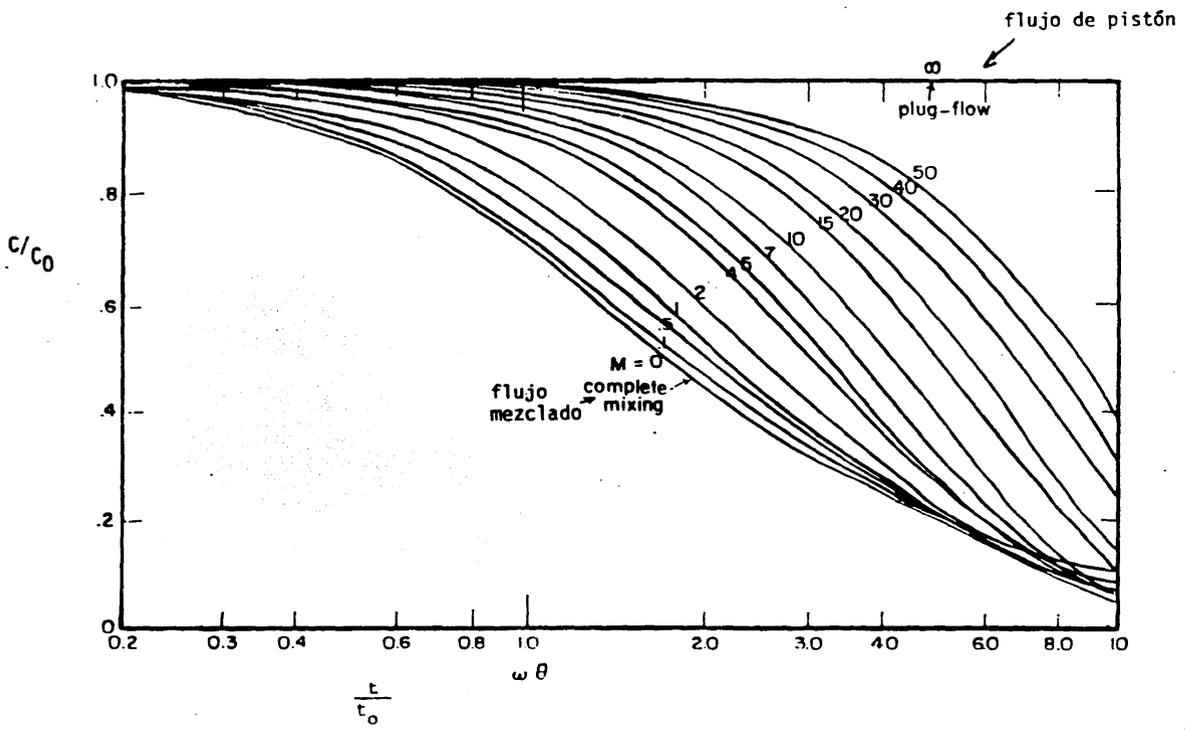
C concentración que permanece en el reactor en el tiempo t

C_0 concentración aplicada en el tiempo $t = 0$

Con el procedimiento anterior se pueden obtener curvas similares a las presentadas en la fig 6.7. Para un reactor de flujo mezclado se obtiene la curva (0) y para flujo tipo pistón resulta la curva paralela al eje de las abscisas.

Si en lugar de un sólo reactor con un tiempo nominal de retención t_0 se tienen dos reactores idénticos con tiempo de retención $\frac{t_0}{2}$ cada uno

Figura 6.7
VARIACION DE LA CONCENTRACION VERSUS TIEMPO DE RETENCION



$$\frac{C}{C_0} = - \left(\frac{dC_1}{dt} \right) \left(\frac{dC_2}{dt} \right)$$

donde

C concentración que sale del primer reactor y entra al segundo

C_1 concentración inicial del segundo reactor, cuyo efluente tendrá la concentración C_2

Haciendo consideraciones similares para una serie n de reactores idénticos con un tiempo de retención cada uno de $\frac{t_0}{n}$, se llega a la fórmula general:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{n(nT)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-nT} \quad (6.2)$$

en donde

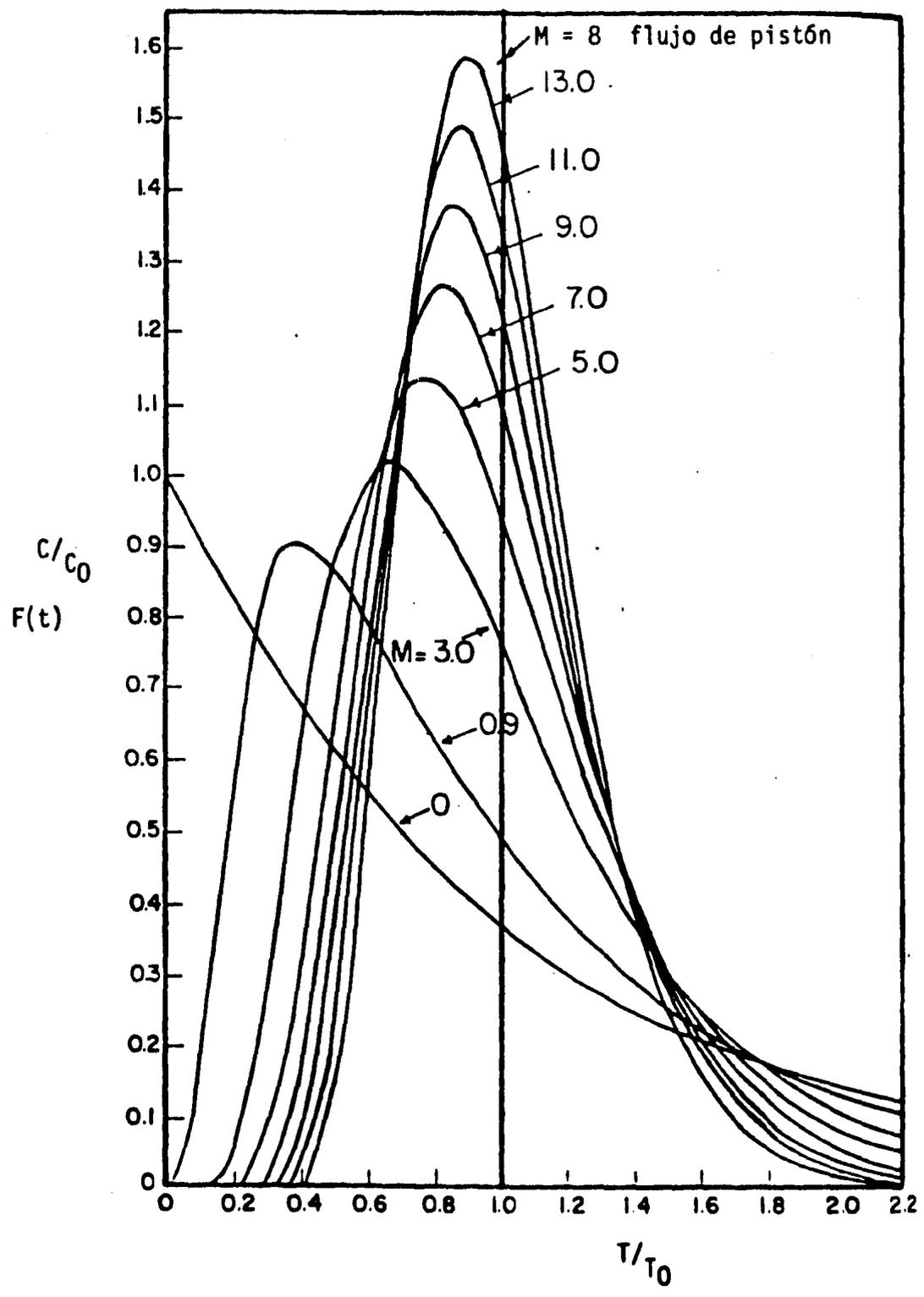
$$T = \frac{t}{t_0}$$

Graficando esta fórmula para diferentes valores de n se obtiene una familia de curvas en que para $n = 1$

$$\frac{C}{C_0} = e^{-T}$$

expresión igual a la (ec 6.1) y para $n = \infty$; $\frac{C}{C_0} = \infty$ ecuación de una línea recta vertical que pasa por $\frac{t}{t_0} = 1$ como se muestra en la figura 6.8. Esto significa que si se tiene una serie infinita de reactores para el tiempo $\frac{t}{t_0} = 1$, toda la sus-

Figura 6.8
REACTORES EN SERIE



tancia que se hubiera agregado instantáneamente al reactor sal
dría también instantáneamente y nada saldría antes de $\frac{t}{\tau_0} = 1$.
A esta condición se le llama flujo tipo pistón y se le podría
definir como "aquel que existe cuando las láminas líquidas de
espesor dl que entran al reactor se desplazan paralelas a si
mismas y perpendicularmente en el sentido del flujo sin mez-
clarse".

Por contraposición, el flujo totalmente mezclado es "aquel que
existe cuando la concentración en el efluente en cualquier ins
tante es idéntica a la de toda la masa líquida".

Sin embargo el flujo tipo pistón y el flujo mezclado son dos
casos extremos ideales que rara vez ocurren en la práctica en
las plantas de tratamiento. Por lo común coexisten los dos ti
pos de flujo.

Se define la fracción de flujo $F(t)$ igual a:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (6.3)$$

El valor de $F(t)$ para el flujo completamente mezclado es
igual a:

$$F(t) = 1 - e^{-T} \quad (6.4)$$

y sería representado por la curva $M=0$ de la fig 6.9.

En cambio el flujo tipo pistón sería representado por una línea recta para $\frac{t}{t_0} = 1$ $F(t) = 1$.

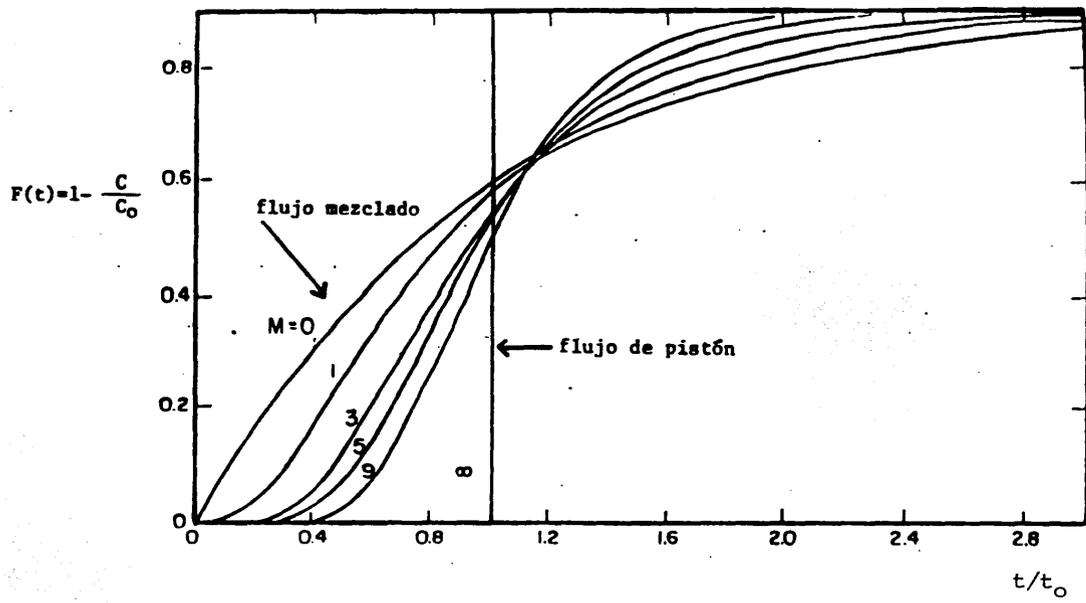
La determinación de la proporción de flujo tipo pistón en sedimentadores tiene una gran importancia, pues mide la fracción del volumen de agua que pasa por el reactor y que ha permanecido durante todo el tiempo de retención sometida al tratamiento deseado. En cambio, cuanto más flujo mezclado haya en un sedimentador, se puede considerar que una fracción mayor de la masa de agua ha sufrido un tratamiento más corto o más largo del que se desea, lo que en muchos casos es objetable.

Por eso, lo ideal es diseñar los sedimentadores de las plantas de tratamiento para que tengan el máximo de flujo tipo pistón, pues con esto se garantiza que el agua sufrirá el tratamiento que se busca durante el periodo de retención que se proyecta.

En reactores no ideales, además del flujo de pistón y del flujo mezclado, puede suceder que parte del volumen de agua que entra atraviese el tanque con tanta rapidez que salga instantáneamente sin permanecer almacenado en el mismo.

Este fenómeno recibe el nombre de cortocircuito y se presenta debido a defectos en el diseño de las zonas de entrada y de sa

Figura 6.9



lida que permiten el paso directo del agua entre unas y otras, por corrientes de densidad de origen térmico o por variación de concentración, etc. El cortocircuito se define por eso como aquella parte del flujo que tiene una velocidad infinita y un tiempo de retención cero.

Existiendo cortocircuitos en reactores, la prueba de trazadores y con flujo de pistón presenta características similares a las de la fig 6.10.

En la fig 6.11 se presentan los diagramas de los modelos de flujo tipo pistón y tipo mezclado.

En la figura 6.12 se presentan las curvas C/C_0 y $F(t)$ para este caso.

Otro fenómeno que puede ocurrir es que el flujo en ciertas zonas permanezca en reposo o que se quede almacenado en cualquier lugar del reactor, dando origen a una zona muerta que se define como "aquella parte del volumen del reactor en donde la velocidad de translación de la masa líquida es cero y/o el tiempo de retención llega a ser teóricamente infinito.

La existencia de zonas muertas se manifiesta en un desplazamiento de la curva del trazador hacia la derecha (ver fig 6.13).

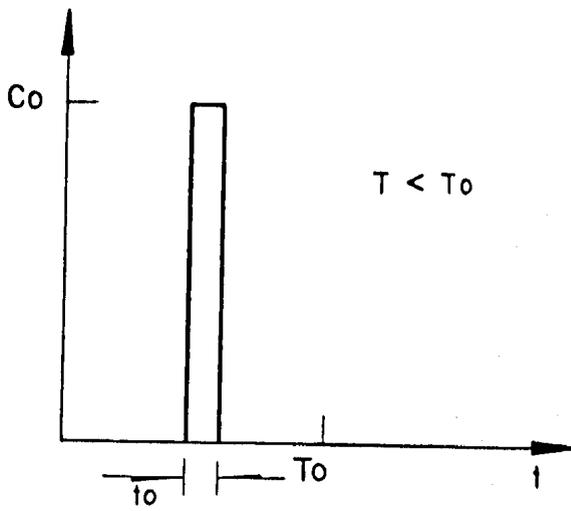
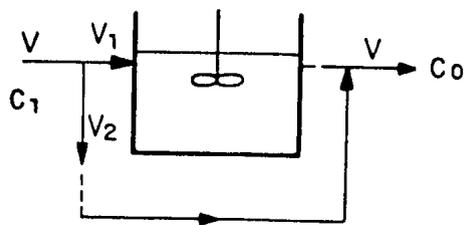
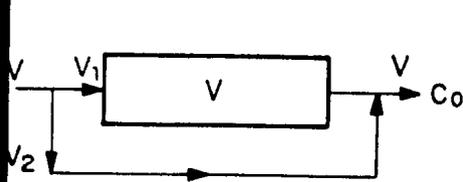


Fig 6.10



a) Diagrama del modelo físico de flujo pistón con corto circuito

b) Diagrama del modelo físico de mezcla completa con corto circuito

Fig 6.11

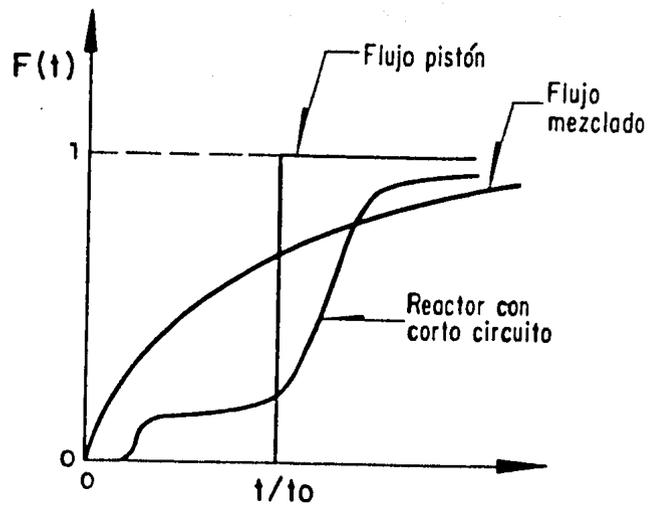
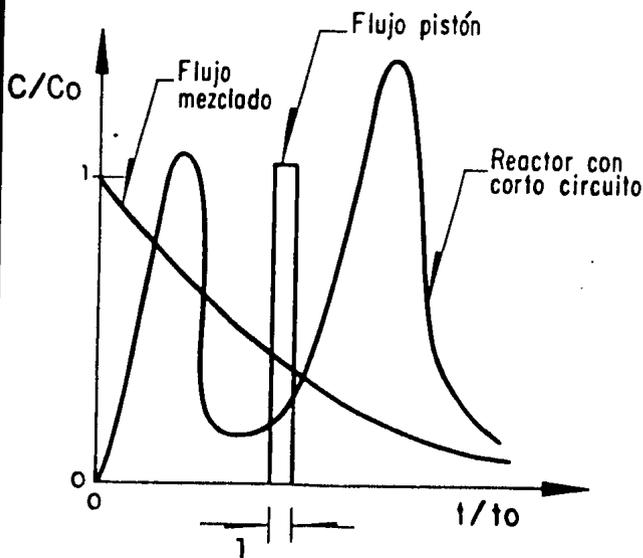


Fig 6.12

En la figura 6.14 se presentan los diagramas de modelos físicos para reactores con flujo de pistón y perfectamente mezclado.

En la figura 6.15 se representan las influencias de espacios muertos para C/C_0 y $F(t)$.

Un efecto similar es producido por la presencia de flujo de recirculación.

La existencia de pequeñas corrientes de inercia provocan flujo turbulento generalmente "homogéneo" en toda la unidad, provocando una dilución continua del trazador, el cual llega a la salida del reactor con un tiempo de retención t_0 , pero con una concentración diferente $C' < C_0$ en un lapso mayor $\Delta t > \Delta t_0$.

En la figura 6.16 se representa una curva típica provocada por corrientes de inercia cuando existe únicamente flujo tipo pistón.

6.1.3.2 Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick

Es evidente que cuando no hay espacios muertos, la fracción de flujo pistón (p) y la fracción de flujo no pistón ($1-p$) deben ser iguales a la unidad.

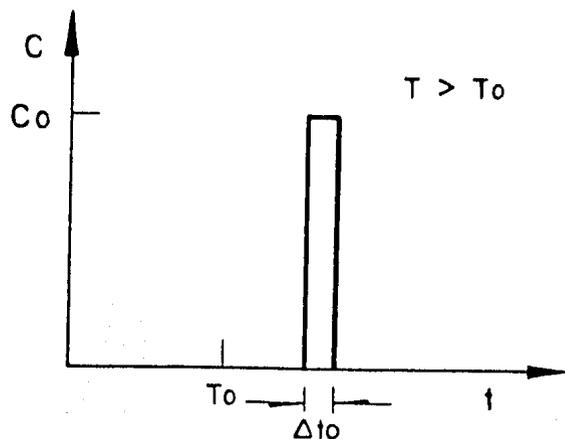
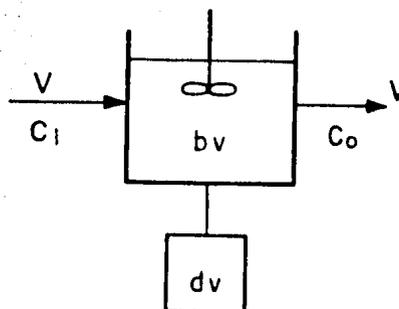
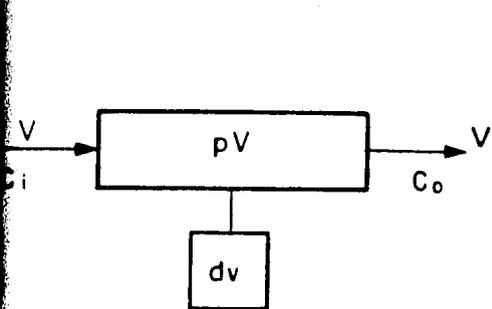


Fig 6.13



a) Diagrama del modelo físico de flujo de pistón con espacios muertos

b) Diagrama del modelo físico de flujo mezclado con espacios muertos

Fig 6.14

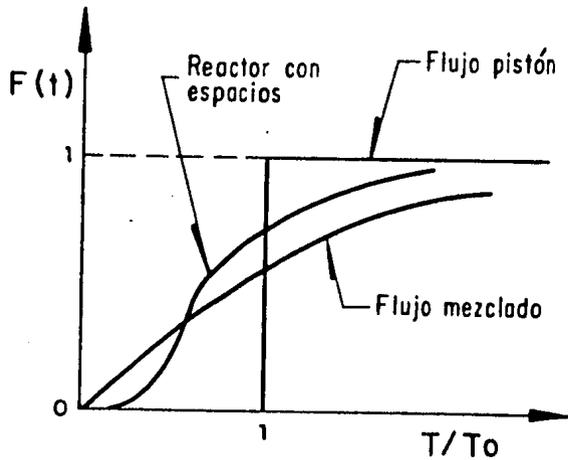
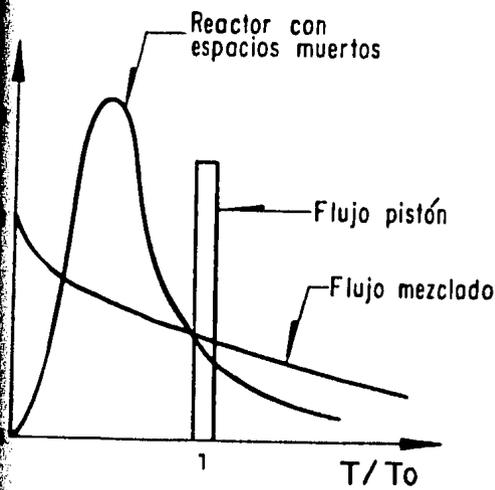


Fig 6.15

$$p + (1 - p) = 1$$

Cuando hay espacios muertos, si (m) es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción efectiva será igual a $(1-m)$ y por lo tanto

Flujo pistón + flujo no pistón + espacio muerto = 1

$$p(1 - m) + (1 - p)(1 - m) + m = 1$$

en la ecuación 6.1 se estableció que el flujo perfectamente mezclado es igual a

$$\frac{C}{C_0} = e^{-t/t_0} \quad (6.1)$$

Si se considera que en el reactor se presenta una combinación de flujo de pistón y flujo mezclado; la ecuación 6.1 se transforma en:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t-pt_0}{(1-p)t_0}} \quad (6.5)$$

en la cual

pt_0 es el tiempo de retención correspondiente a flujo tipo pistón y

$1-p$ es el volumen de mezcla perfecta

Simplificando tenemos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{1-p} \frac{t}{t_0} - p} \quad (6.6)$$

Si se considera que el sistema además tiene espacios muertos habría que introducir en la última ecuación el término $(1-m)$ para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta, luego se tendría:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)} \frac{t}{t_0} - p(1-m)} \quad (6.7)$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha llegado a la salida del reactor es

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (6.3)$$

reemplazando el valor de C/C_0

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)} \frac{t}{t_0} - p(1-m)} \quad (6.8)$$

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

$$\log 1-F(t) = \frac{\log e}{(1-p)(1-m)} \frac{t}{t_0} - p(1-m) \quad (6.9)$$

que corresponde a la ecuación de una línea recta (fig 6.17) cuya pendiente está dada por

$$tg \alpha = \frac{\log e}{(1-m)(1-p)} \quad (6.10)$$

Multiplicando y dividiendo por p y sustituyendo el valor de $\log e = 0,435$ se obtiene:

$$tg \alpha = \frac{0,435 p}{p(1-m)(1-p)} \quad (6.11)$$

Haciendo

$$\theta = p(1-m) \quad (6.12)$$

y reemplazando en la ecuación anterior se obtiene

$$tg \alpha = \frac{0,435 p}{\theta(1-p)} \quad (6.13)$$

Reordenando

$$\theta tg \alpha - \theta_p tg \alpha = 0,435 p$$

$$\theta tg \alpha = p(0,435 + \theta tg \alpha)$$

$$p = \frac{\theta tg \alpha}{0,435 + \theta tg \alpha} \quad (6.14)$$

de la ecuación 6.12 se puede deducir el volumen de espacio muerto que será igual a

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (6.15)$$

$$M = (1-p) \quad M = \text{flujo mezclado} \quad (6.16)$$

El valor de las incógnitas θ $\text{tg } \alpha$ se obtienen al trazar la curva de $\log 1-F(t)$

$$\theta = \frac{t}{t_0} \quad (6.17)$$

$$\text{tg } \theta = \frac{1}{\frac{t_1}{t_0} - \frac{t_2}{t_0}} \quad (6.18)$$

6.1.3.3 Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida se obtienen una serie de valores de concentración que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, originando una curva como la que se presenta en la fig 6.17.

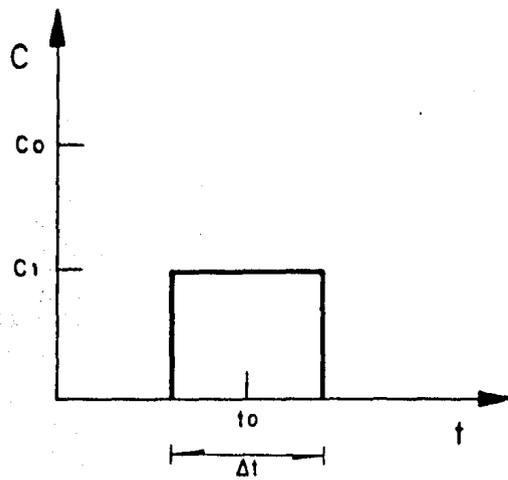


Fig 6.16

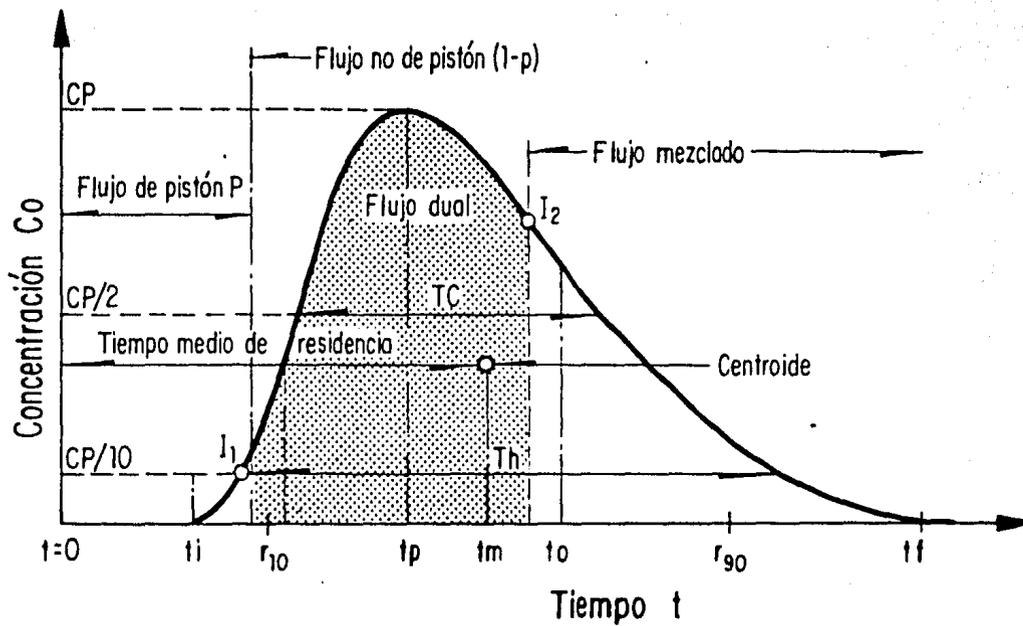


Fig 6.17

Sus principales parámetros son:

t_1 tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente

t_p tiempo modal correspondiente a la presentación de la máxima concentración

t_m tiempo mediano correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador

t_0 tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención
 $\frac{V}{\bar{Q}}$

t_f tiempo que transcurre hasta que el trazador atraviesa la totalidad del reactor

C_0 concentración inicial

C_p concentración máxima a la salida

Se pueden utilizar los siguientes criterios

a) $\frac{t_1}{t_0}$ (6.21)

mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flu-

jo tipo pistón y a 0 para flujo mezclado. Si $\frac{t}{t_0} < 0,3$ puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito)

$$b) \frac{t_m}{t_0} \quad (6.22)$$

Si la relación es menor que la unidad existe cortocircuito. Si es mayor hay errores experimentales o zonas muertas o sea que el trazador ha quedado retenido cierto tiempo y luego ha ido saliendo lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada.

$$c) \frac{t_p}{t_0} \quad (6.23)$$

indica la relación de flujo tipo pistón y de flujo mezclado

$$\frac{t_p}{t_0} = 1 \quad \text{flujo pistón}$$

$$\frac{t_p}{t_0} = 0 \quad \text{flujo mezclado}$$

6.1.4 Determinación de las características hidráulicas del sedimentador secundario de la planta piloto de Ciudad Universitaria

Ejemplo de cálculo de la prueba no. 1, con el muestreo realiza

TABLA 6.1 PRUEBA 1. MUESTREO EN EL EFLUENTE

T (min)	T/t_0	C (mg/l)	$C-C_0$ (mg/l)	$\Sigma(C-C_0)$ (mg/l)	$F(t)$	$1-F(t)$
0	0	13.3778		0	0	100
0,5	0,0033	22.9547	9.5769	2.7569	0.6263	99.3737
1	0.0066	22.9547	9.5769	19.1538	1.2526	98.7447
2	0.0133	22.9547	9.5769	28.7307	1.8789	98.1211
3	0.0199	22.9547	9.5769	38.3076	2.5052	97.4948
4	0.0266	22.9547	9.5769	47.8845	3.1315	96.8685
5	0.0332	45.3006	31.9228	79.8073	5.2192	94.7808
10	0.0664	45.3006	31.9228	111.7301	7.3069	92.6931
25	0.1660	358.1441	344.7663	456.4964	25.8539	66.8392
30	0.1992	447.5280	434.1502	890.6466	58.2463	41.7537
45	0.2988	243.2220	229.8442	1 120.4908	73.2776	26.7224
60	0.3984	166.6073	153.2295	1 273.7203	83.2985	16.6015
75	0.4980	102.7617	89.3839	1 363.1042	89.1440	10.8560
90	0.5976	74.0312	60.6534	1 423.7576	93.1106	6.8894
105	0.6972	51.6852	38.3074	1 462.0650	95.6159	4.3841
120	0.7968	38.2161	25.5383	1 487.6033	97.2860	2.7140
135	0.8964	32.5315	19.1537	1 506.7570	98.5386	1.4614
160	1.0624	26.1470	12.7692	1 519.5262	99.3737	0.6263
220	1.4608	22.9547	9.5769	1 529.1031	100	0
250	1.6600	13.3778	0	1 529.1031	100	0
310	2.0584	13.3778	0	1 529.1031	100	0
370	2.4568	13.3778	0	1 529.1031	100	0

TABLA 6.2 PRUEBA 2. MUESTREO EN EL EFLUENTE

T (min)	T/t_0	C (mg/l)	$C-C_0$ (mg/l)	$\Sigma(C-C_0)$ (mg/l)	F(t)	1-F(t)
0	0	0.6087	0	0	0	100
0,25	0.0050	0.6087	0	0	0	100
0,50	0.0101	0.6087	0	0	0	100
0,75	0.0151	0.6087	0	0	0	100
1	0.0201	0.6087	0	0	0	100
1,5	0.0202	0.6087	0	0	0	100
2	0.0402	0.6087	0	0	0	100
3	0.0603	0.6087	0	0	0	100
4	0.0804	0.6087	0	0	0	100
5	0.1005	0.6087	0	0	0	100
10	0.2010	0.6087	0	0	0	100
15	0.3015	211.2992	210.6905	210.6905	46.1538	53.8462
20	0.4020	121.9154	121.3067	331.9972	72.7273	27.2727
25	0.5025	74.0312	73.4225	405.4197	88.8112	11.1888
30	0.6030	51.6852	51.0765	456.4962	100	0
45	0.9045	0.6087	0	456.4962	100	0
60	1.2060	0.6087	0	456.4962	100	0
75	1.5075	0.6087	0	456.4962	100	0
90	1.8090	0.6087	0	456.4962	100	0
105	2.1105	0.6087	0	456.4962	100	0
120	2.4120	0.6087	0	456.4962	100	0
135	2.7135	0.6087	0	456.4962	100	0
150	3.0150	0.6087	0	456.4962	100	0
165	3.4420	0.6087	0	456.4962	100	0

TABLA 6.3 PRUEBA 3. MUESTREO EN EL EFLUENTE

T (min)	T/t_0	C (mg/l)	$C-C_0$ (mg/l)	$\Sigma(C-C_0)$ (mg/l)	F(t)	1-F(t)
0	0	6.9933	0	0	0	100
0,25	0.0045	22.9547	15.4614	15.9674	0.8306	99.1694
0,50	0.009	22.9547	15.9614	31.9228	1.6611	98.3389
0,75	0.0134	26.1470	19.1537	51.0765	2.6578	97.3422
1	0.0179	29.3392	22.3459	73.4224	3.8206	96.1794
1,5	0.0269	29.3392	22.3459	95.7683	4.9834	95.0166
2	0.0358	29.3392	22.3459	118.1142	6.1462	93.8538
3	0.0537	29.3392	22.3459	140.4601	7.3090	92.6910
4	0.0716	32.5315	25.5382	165.9983	8.6379	91.3621
5	0.0895	32.5315	25.5382	191.5365	9.9668	90.0332
10	0.1790	358.1441	351.1508	542.6873	28.2392	71.7608
15	0.2685	556.0655	543.0722	1 091.7595	56.8106	43.1894
20	0.3580	332.6059	325.6126	1 417.3721	73.7542	26.2458
25	0.4475	204.9147	197.9214	1 615.2935	84.0532	15.9468
30	0.5370	172.9919	165.9986	1 781.2921	92.6910	7.3090
45	0.8055	74.0312	67.0379	1 848.3300	96.1794	3.8206
60	1.0740	45.3006	38.3073	1 886.6373	98.1728	1.8272
75	1.3425	26.1470	19.1537	1 905.7910	99.1694	0.8306
90	1.6110	13.3778	6.3845	1 912.1755	99.5017	0.4983
105	1.8795	13.3778	6.3845	1 916.5600	99.7298	0.2702
120	2.1480	10.1856	3.1923	1 921.7523	100	0
135	2.4165	6.9933	0	1 921.7523	100	0

TABLA 6.4 PRUEBA 1. MUESTREO EN LA RECIRCULACION

T (min)	T/t ₀	C (mg/l)	C-C ₀ (mg/l)	Σ(C-C ₀) (mg/l)	F(t)	1-F(t)
0	0	38.9161	0	0	0	100
5	0.0032	677.3722	638.4561	638.4561	1.3879	98.6121
10	0.0664	1 162.5988	1 123.6827	1 762.1388	3.8305	96.1695
25	0.1660	1 545.6725	1 506.7564	3 268.8952	7.1059	92.8941
30	0.1992	1 737.2093	1 698.2932	4 967.1884	10.7977	89.2023
45	0.2988	2 184.1286	2 145.2125	7 112.4009	15.4609	84.5391
60	0.3984	2 439.5110	2 400.5949	9 512.9958	20.6793	79.3207
75	0.4980	2 822.5847	2 783.6686	12 296.6644	26.7304	73.2696
90	0.5976	2 950.2759	2 911.3698	15 208.0342	33.0592	66.9408
105	0.6972	3 141.8127	3 102.8966	18 310.9208	39.8042	60.1958
120	0.7968	3 269.5040	3 230.5879	21 541.5187	46.8269	53.1731
135	0.8964	3 397.1952	3 358.2791	24 899.7978	54.1271	45.8729
160	1.0624	3 524.8864	3 485.9703	28 385.7681	61.7049	38.2951
220	1.4608	3 524.8864	3 485.9703	31,871.7384	69.2826	30.7174
250	1.6600	3 588.7320	3 549.8159	35 421.5543	76.9992	23.0008
310	2.0584	3 524.8864	3 485.9703	38 907.5246	84.5770	15.4230
370	2.4568	3 320.6078	3 281.6917	42 189.2548	91.7108	8.2892
520	3.4528	3 221.6463	3 182.7302	45 371.9850	98.6294	1.3706
760	5.0464	428.3795	389.4634	45 761.4484	99.4760	0.5240
1000	6.6400	234.0199	195.1038	45 956.552	99.9001	0.0999
1250	8.3000	84.8528	45.9367	46 002.4889	100	0
1442	9.5749	38.9161	0			

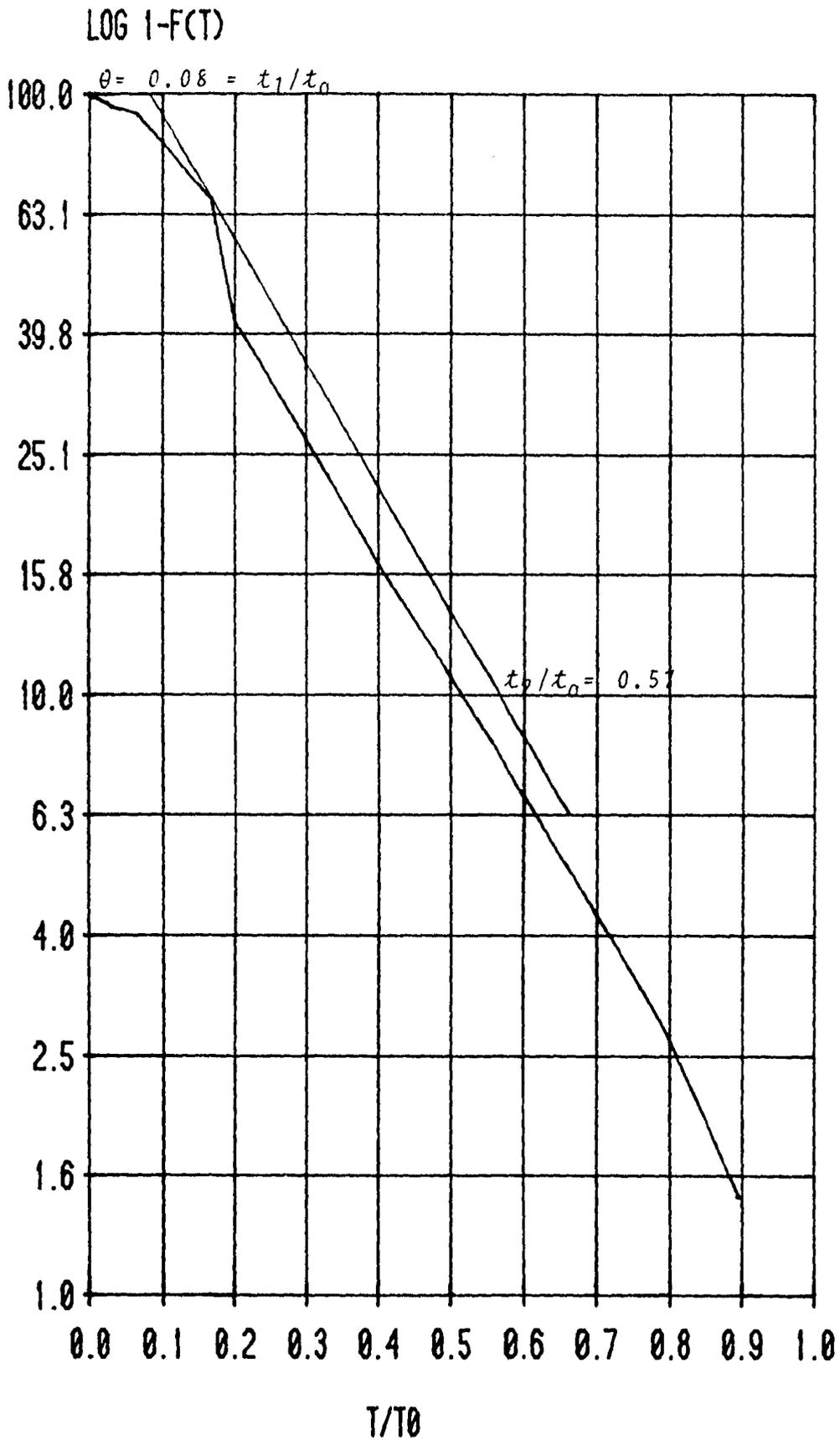
TABLA 6.5 PRUEBA 2. MUESTREO EN LA RECIRCULACION

T (min)	T/t ₀	C (mg/l)	C-C ₀ (mg/l)	Σ(C-C ₀) (mg/l)	F(t)	1-F(t)
0	0	0.6087				
1	0.0201	0.6087	0	0	0	
1,5	0.0302	0.6087	0	0	0	100
2	0.0402	753.869	0	0	0	100
3	0.0603	1 433.9427	753.3782	753.3782	0	100
4	0.0804	2 056.4374	1 433.3340	2 186.7122	2.2483	97.7517
5	0.1005	3 205.6583	2 055.8287	4 242.5409	6.5257	93.4743
10	0.2010	3 397.1952	3 205.0496	7 447.5905	12.6608	87.3392
15	0.3015	3 077.9671	3 396.5865	10 844.1770	22.2254	77.7746
20	0.4020	3 077.9671	3 077.3584	13 921.5354	32.3616	67.6384
25	0.5025	3 077.9671	3 077.3584	16 998.8938	41.5452	58.4548
30	0.6030	3 077.9671	3 077.3584	20 076.2522	50.7288	49.2712
45	0.9045	3 077.9671	3 077.3584	23 153.6106	59.9124	40.0876
60	1.2060	3 141.8127	3 077.3584	26 230.9690	69.0959	30.9041
75	1.5075	3 109.8899	3 141.2040	29 372.1730	78.2795	21.7205
90	1.8090	473.0663	3 109.2812	32 481.4542	87.6536	12.3464
105	2.1105	243.2220	472.4576	32 953.9118	96.9325	3.0675
120	2.4120	198.5301	242.6133	33 196.5251	98.3424	1.6576
135	2.7135	77.2235	197.9214	33 394.4465	99.0664	0.9336
150	3.0150	32.5315	76.6148	33 471.0613	99.6570	0.3430
165	3.4420	6.9933	31.9228	33 502.9841	99.8857	0.1143
180	3.6180	0.6087	6.3846	33 509.3687	99.9809	0.0191
			0	33 509.3687	100	0
					100	0

TABLA 6.6 PRUEBA 3. MUESTREO EN LA RECIRCULACION

T (min)	T/t_0	C (mg/l)	$C-C_0$ (mg/l)	$\Sigma(C-C_0)$ (mg/l)	F(t)	1-F(t)
0	0	13.3778	0	0	0	100
3	0.0537	13.3778	0	0	0	100
5	0.0895	1 258.367	1 244.9892	1 244.9892	3.2765	96.7235
10	0.1790	2 439.511	2 426.1332	3 671.1224	9.6614	90.3386
15	0.2685	2 631.0479	2 617.6701	6 288.7925	16.5504	83.4496
20	0.3580	2 886.4303	2 873.0525	9 161.8450	24.1116	75.8884
25	0.4475	3 077.9671	3 064.5893	12 226.4343	32.1768	67.8232
30	0.5370	3 237.5811	3 224.2033	15 450.6376	40.6620	59.3380
45	0.8055	3 397.1952	3 383.8174	18 834.4550	49.5673	50.4327
60	1.0740	3 492.9636	3 479.5858	22 314.0408	58.7247	41.2753
75	1.3425	3 556.8092	3 543.4314	25 857.4722	68.0501	31.9499
90	1.6110	3 524.8864	3 511.5086	29 368.9808	77.2914	22.7886
105	1.8795	3 492.9636	3 479.5858	32 848.5666	86.4488	13.5512
120	2.1480	3 492.9636	3 479.5858	36 328.1524	95.6061	4.3939
135	2.4165	1 609.5181	1 596.1403	37 924.2957	99.8068	0.1932
165	2.9535	77.2235	63.8457	37 988.1384	99.9748	0.0252
195	3.4905	22.9547	9.5769	37 997.7153	100	0
225	4.0275	13.3778	0	37 997.7153		

Figura 6.18 PRUEBA 1 MUESTREO EN EL EFLUENTE



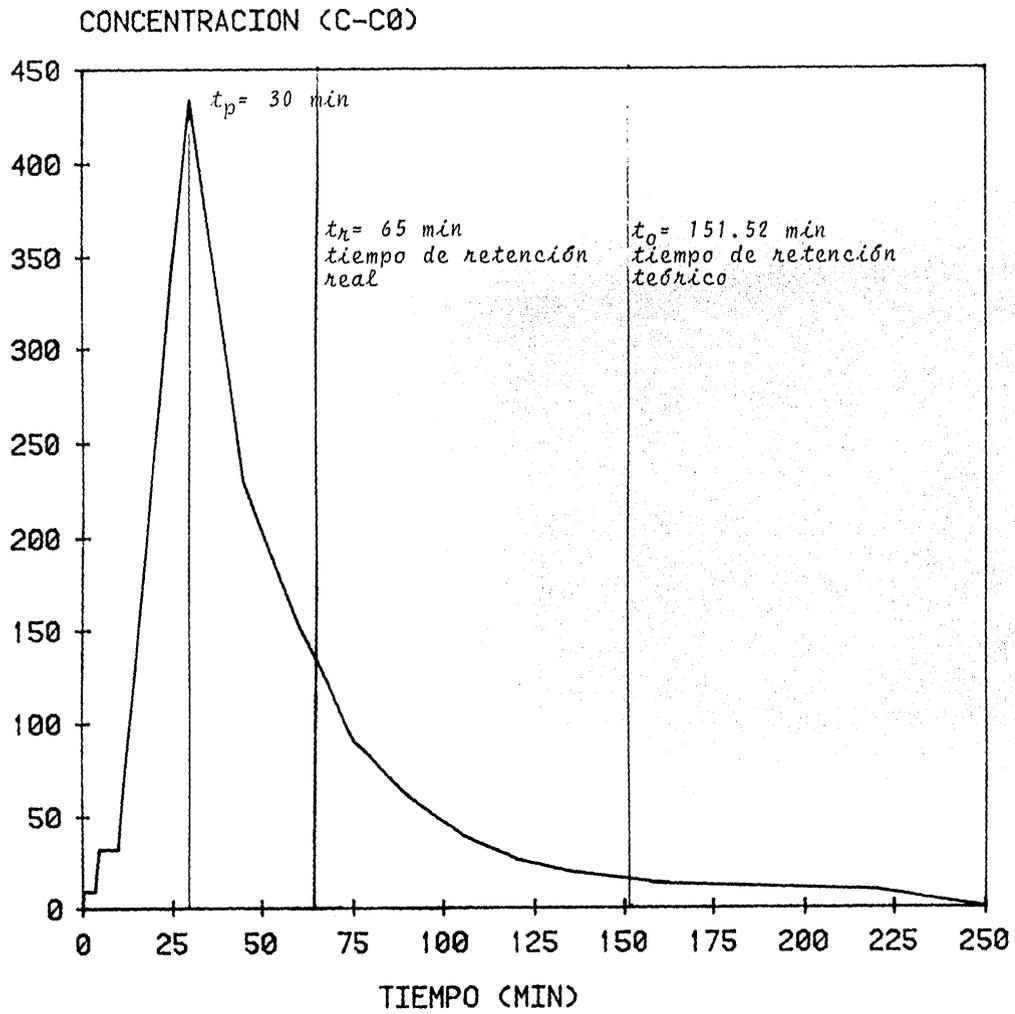


Figura 6.20 PRUEBA 1 MUESTREO EN LA RECIRCULACION

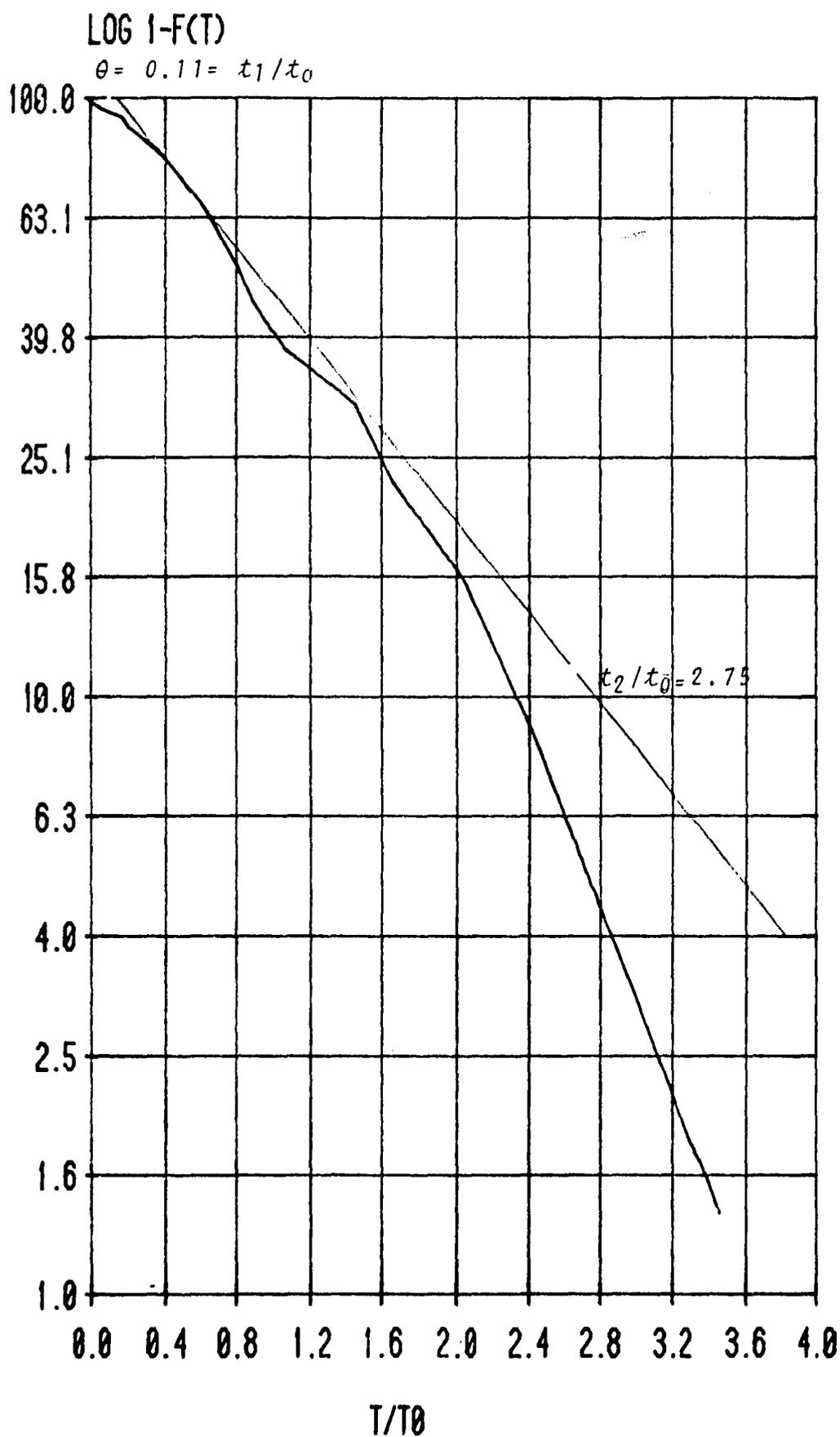


Figura 6.21 PROEBA 1 MOSTRADO EN LA RECIRCULACION

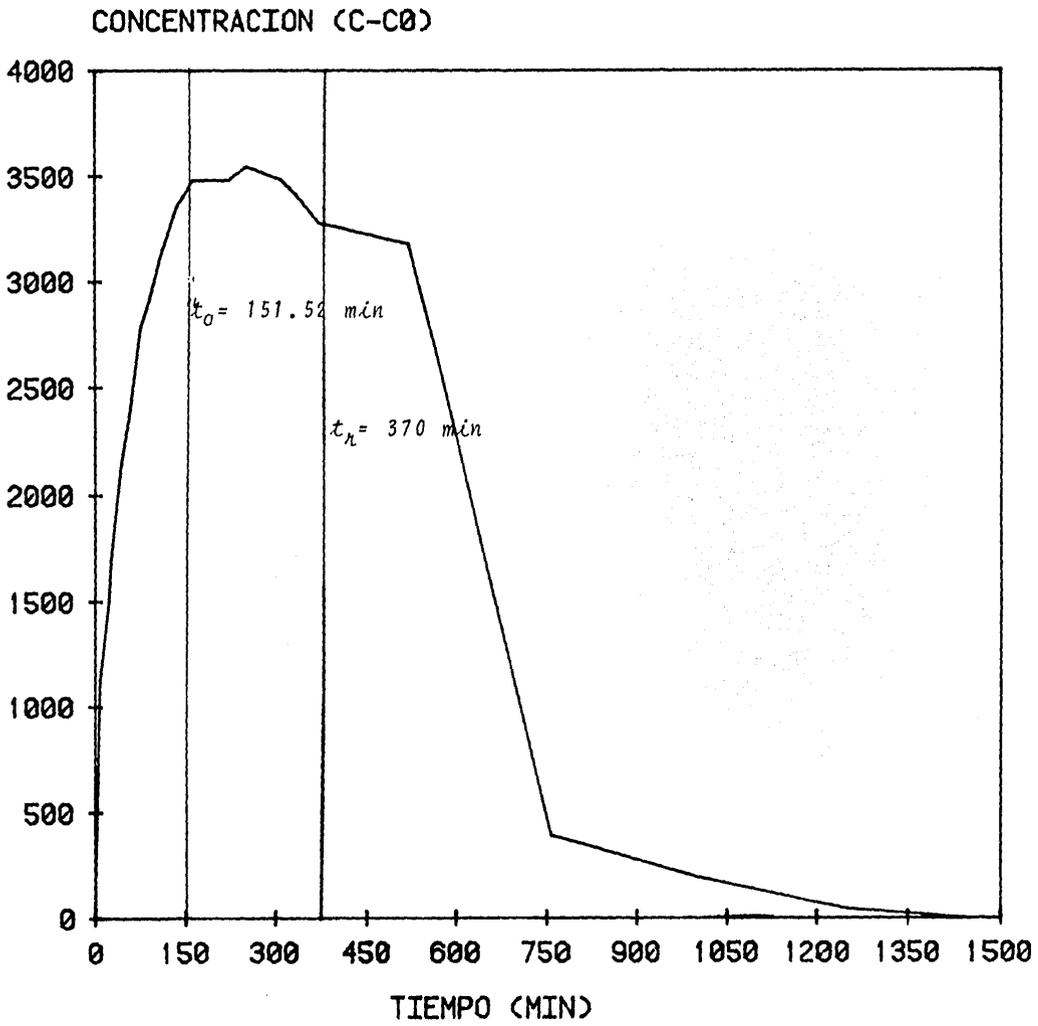
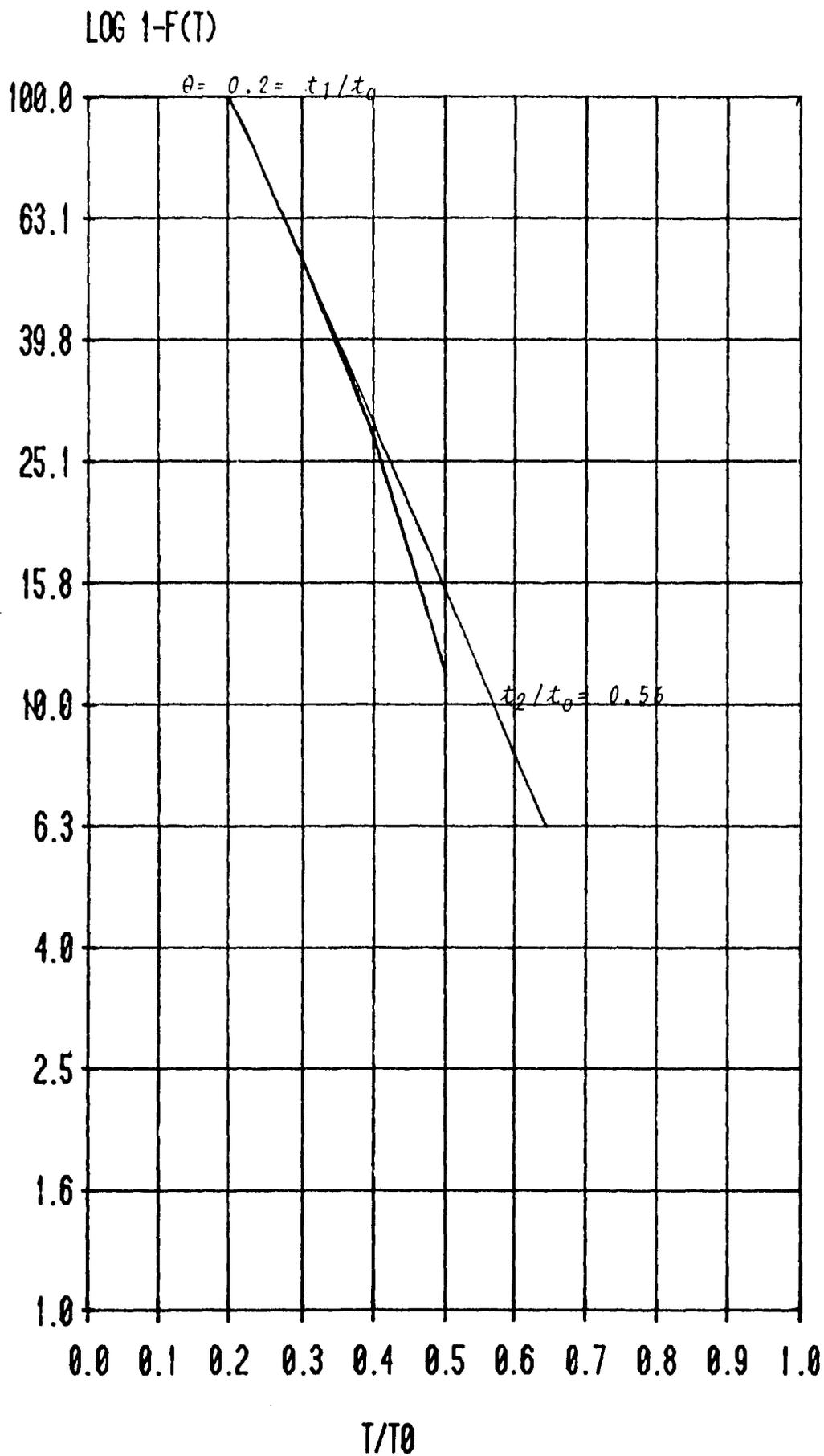


Figura 6.22 PRUEBA 2 MUESTREO EN EL EFLUENTE



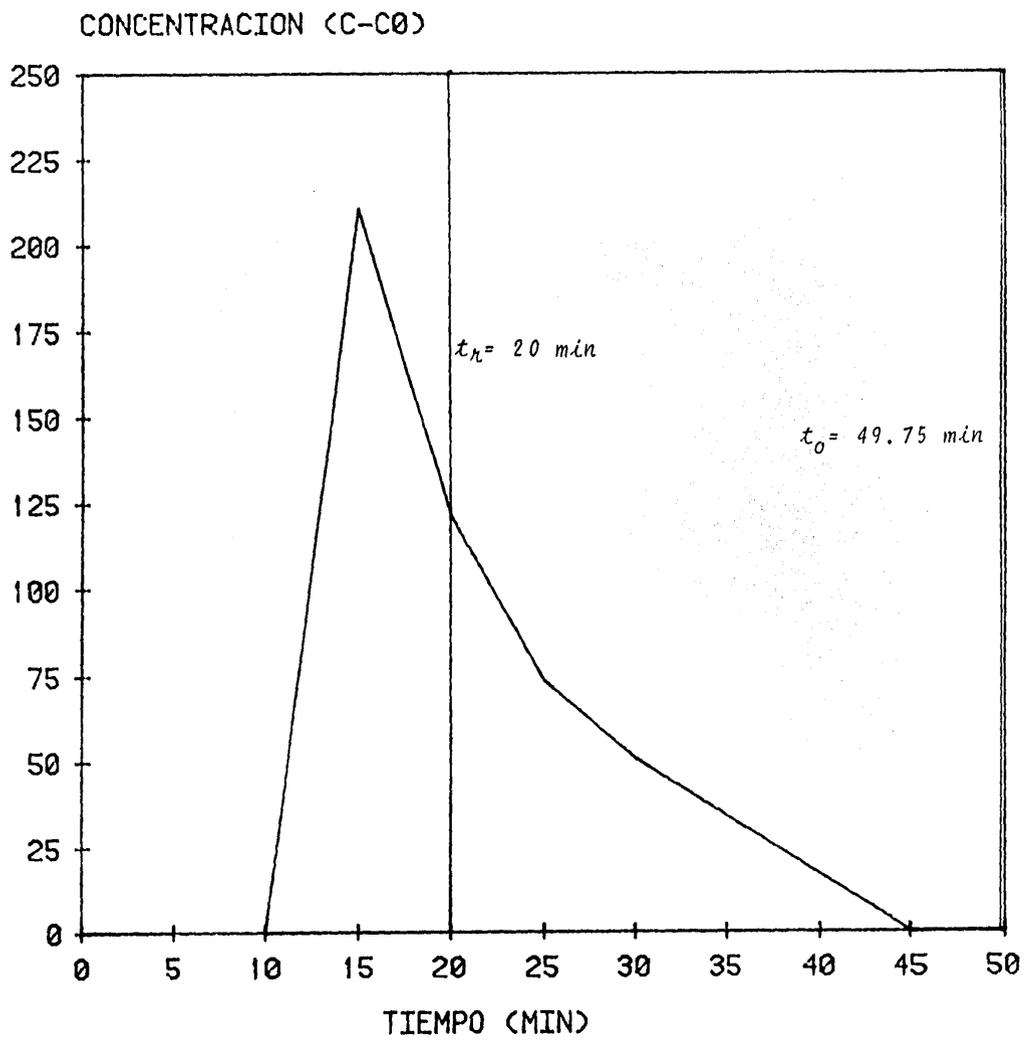
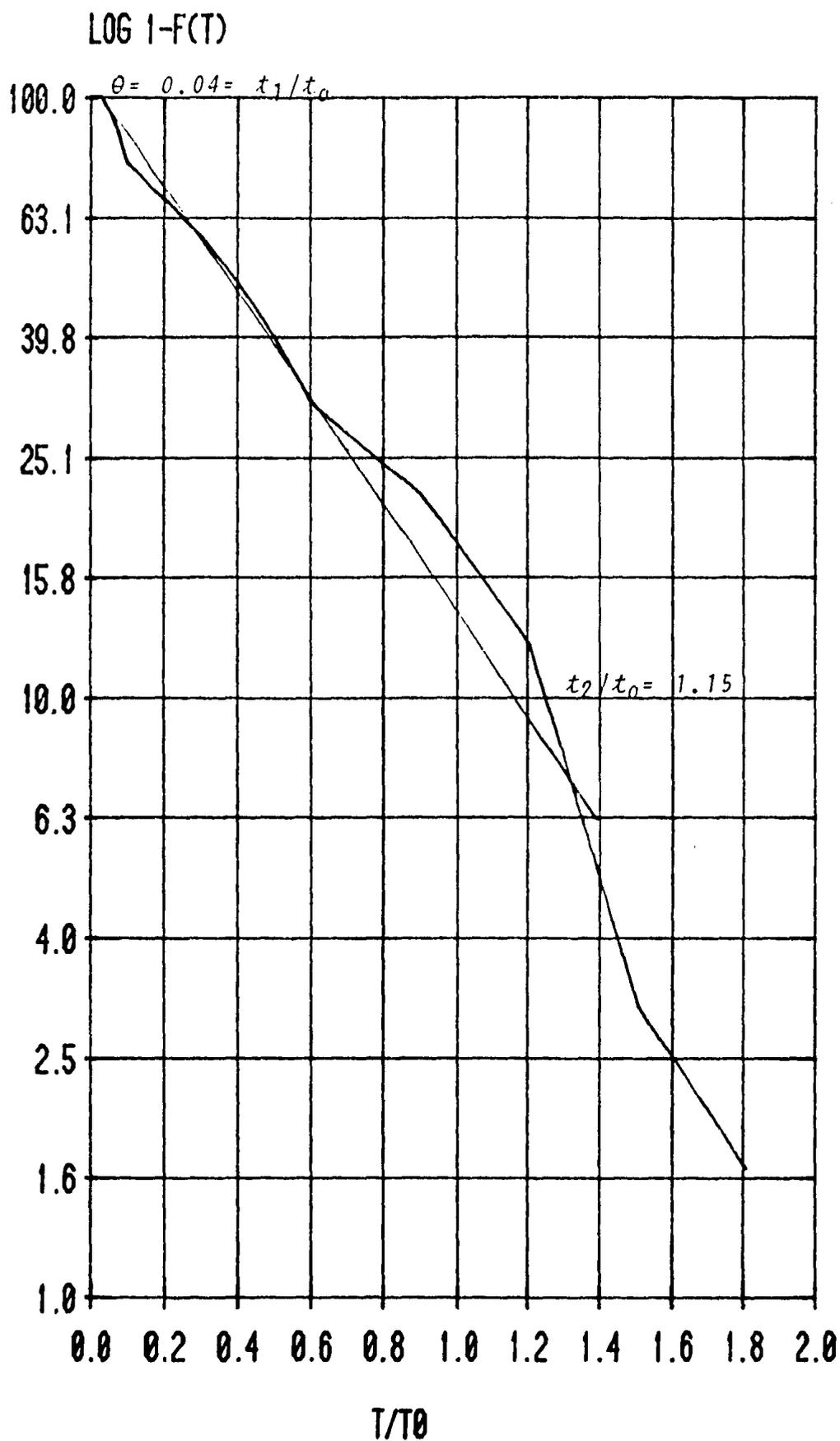


Figura 6.24 PRUEBA 2 MUESTREO EN LA RECIRCULACION



CONCENTRACION (C-C0)

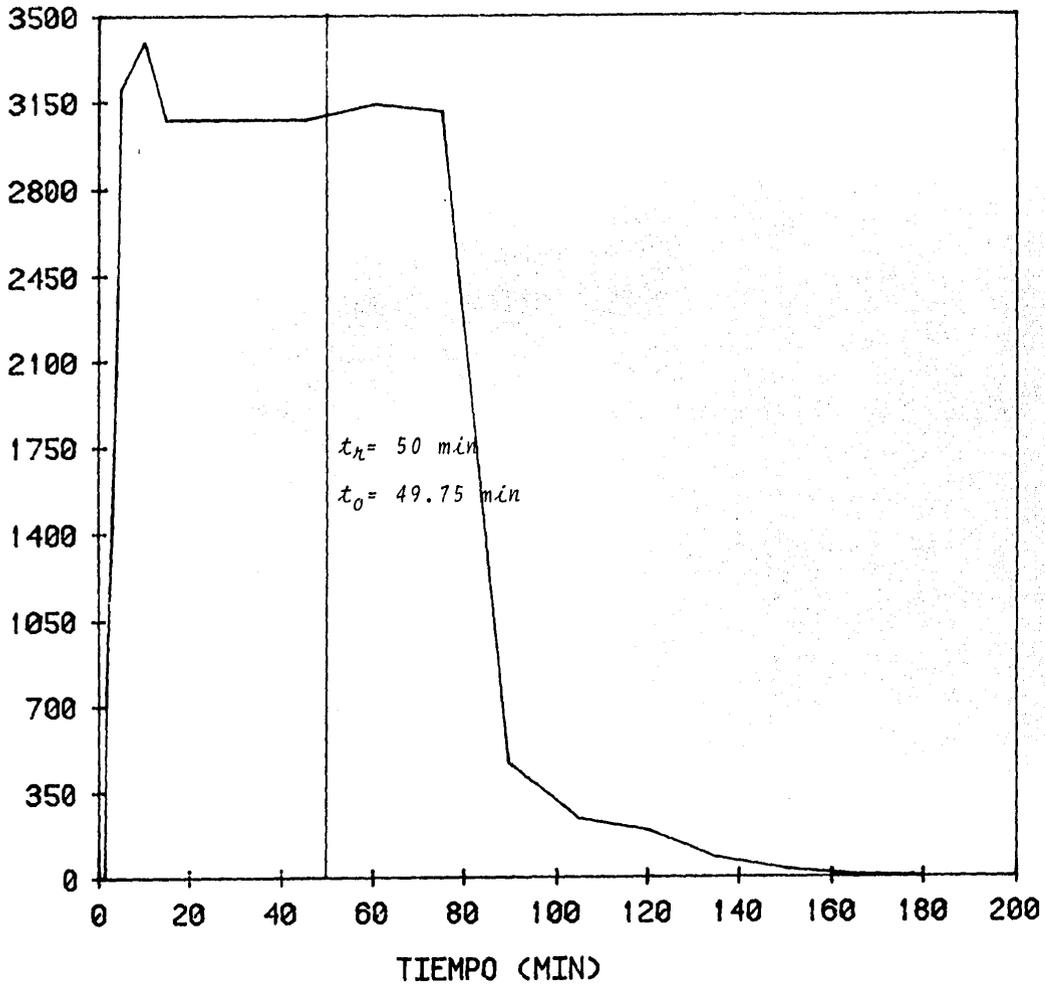
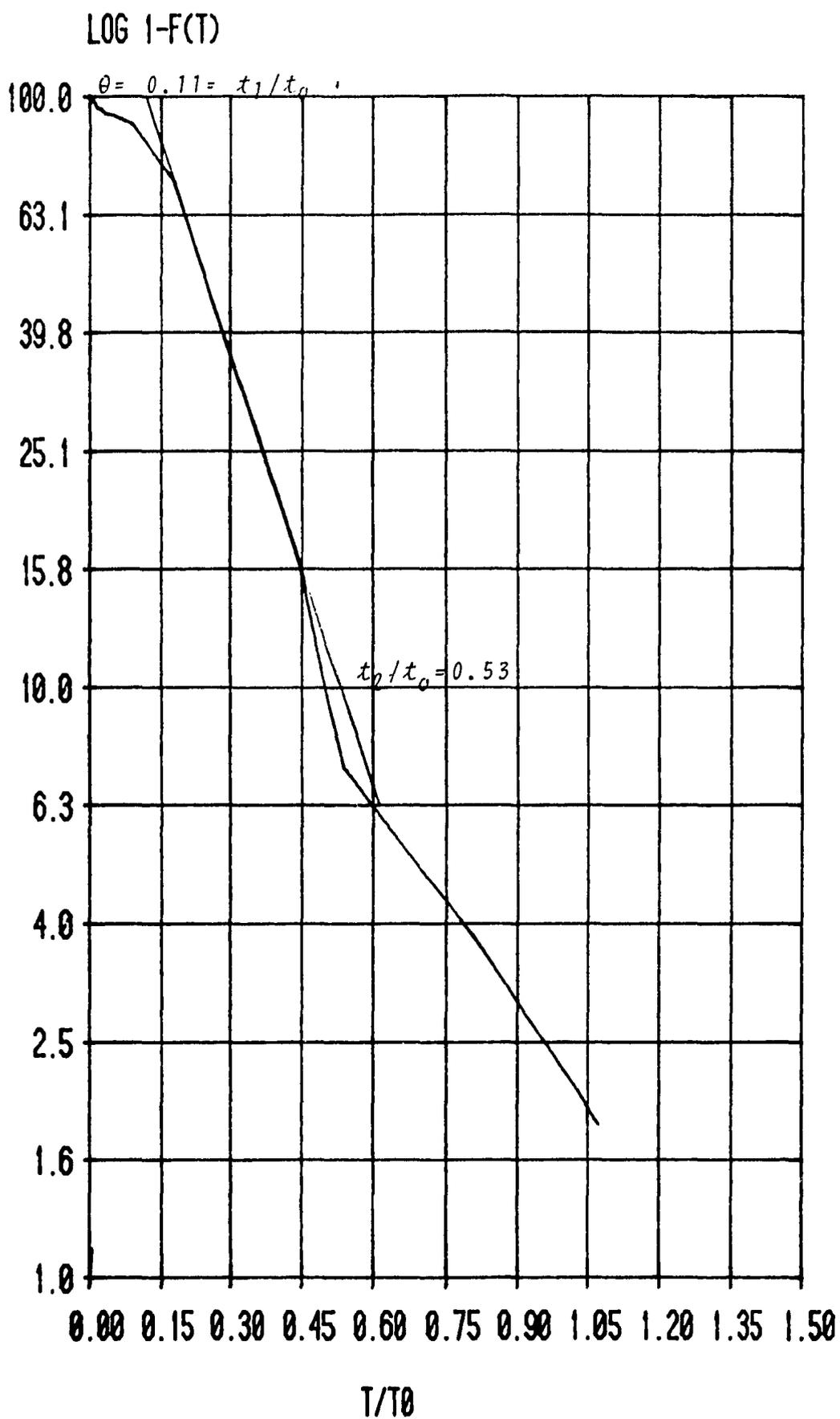


Figura 6.26 PRUEBA 3 MUESTREO EN EL EFLUENTE



CONCENTRACION (C-C0)

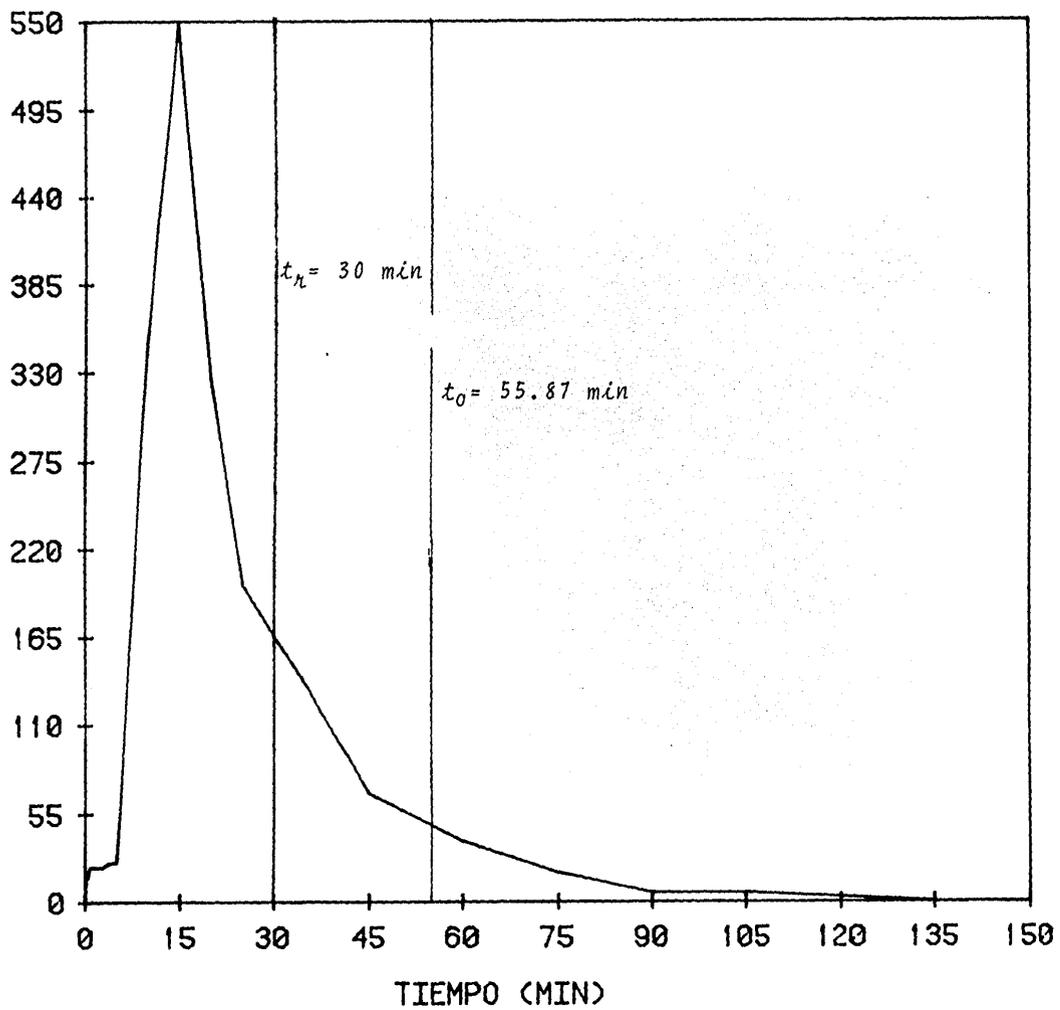
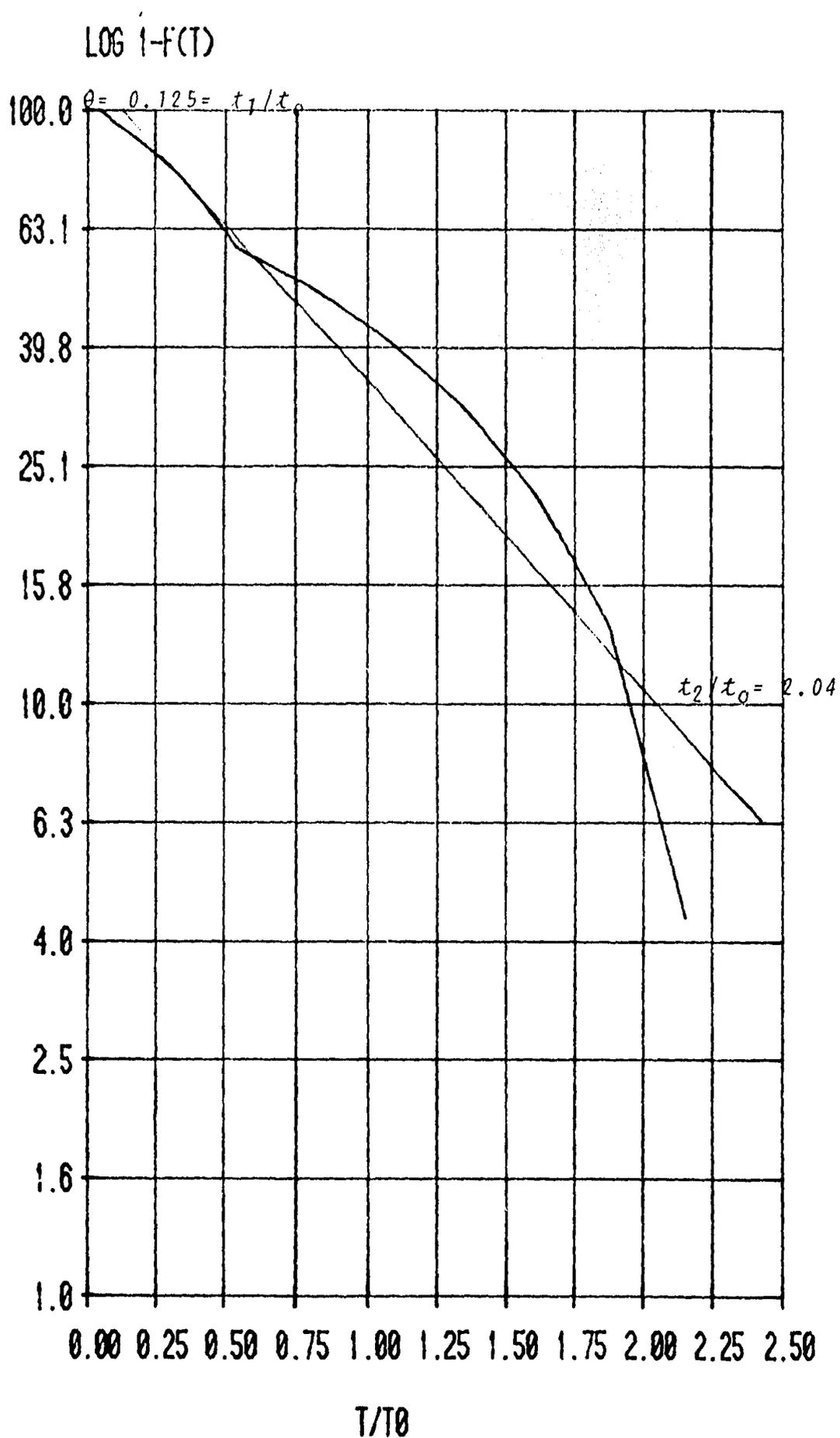
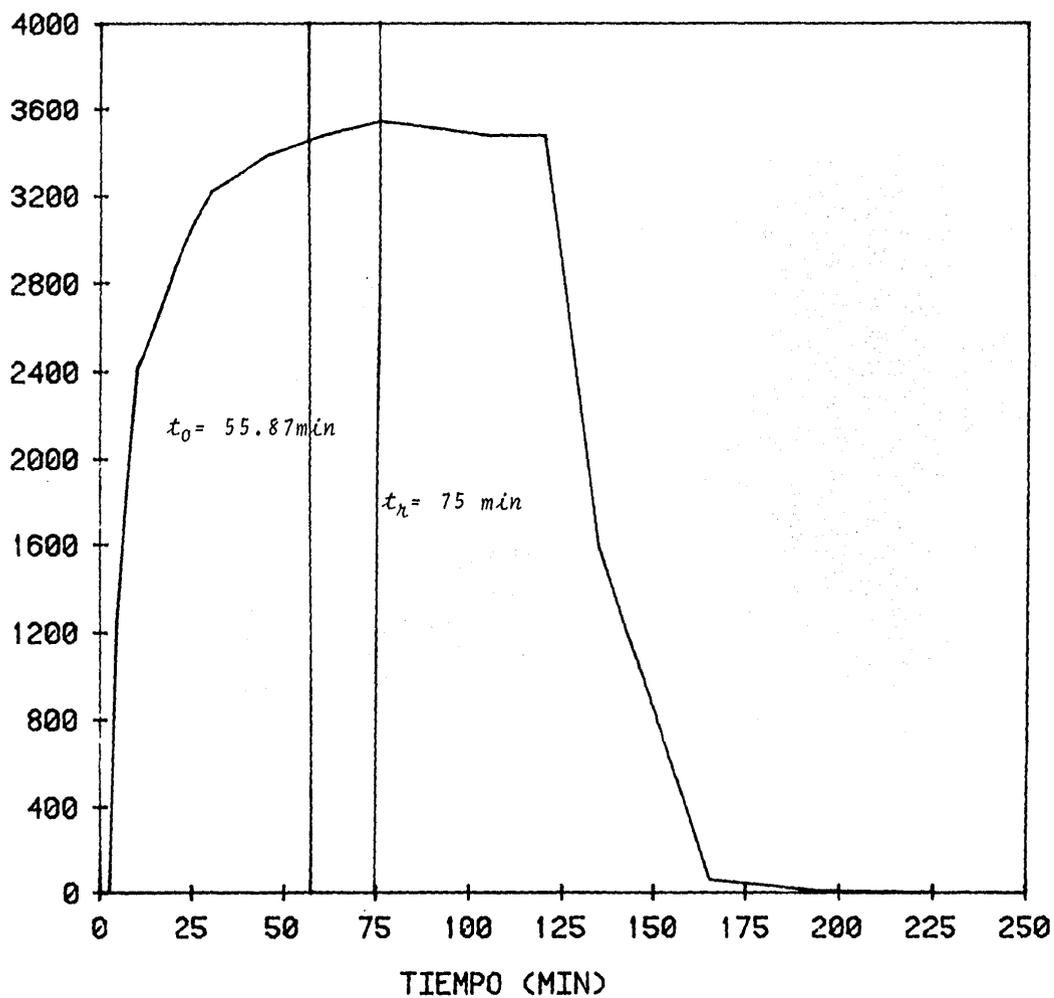


Figura 6.28 PRUEBA 3 MUESTREO EN LA RECIRCULACION



CONCENTRACION (C-C0)



do en el efluente.

1) Tiempo de retención hidráulico

$$Q = 6.60 \text{ l/min}$$

$$V = 1000 \text{ l}$$

$$t_0 = \frac{V}{Q} = 151,52 \text{ min}$$

2) Análisis por el método Wolf-Resnick

Los datos de las comunas 2 y 7 de la tabla 6.1 t/t_0 y $1-F(t)$ se grafican en papel aritmético - logarítmico, obteniéndose la curva que representa la cantidad de trazador que permanece en el reactor. Se traza la tangente a la parte superior de la curva; obteniéndose: (ver fig 6.18)

$$\theta = 0.08$$

$$t_1/t_0 = 0.08$$

$$t_2/t_0 = 0,57$$

Utilizando la ecuación 6.18

$$\tan \alpha = \frac{1}{t_2/t_0 - t_1/t_0} \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{1}{0.515 - 0.08} \\ &= 2.0408 \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación 6.14, se calcula el porcentaje de flujo pistón.

$$\begin{aligned} p &= \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} && (6.14) \\ p &= \frac{(0.08)(2.0408)}{0.435 + (0.08)(2.0408)} \\ p &= 0.2729 \\ p &= 27.29\% \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación 6.15 se calcula el porcentaje de espacios muertos

$$\begin{aligned} m &= 1 - \frac{\theta}{p} && (6.15) \\ &= 1 - \frac{0.08}{0.2729} \\ &= 0.7029 \\ &= 70.29\% \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación 6.16 se calcula el porcentaje de flujo mezclado

$$M = 1 - p$$

$$M = 1 - 0.2729$$

$$= 0.7271$$

$$= 72.71\%$$

2. Análisis siguiendo procedimientos convencionales

Los datos de las columnas 1 y 4 de la tabla 6.1 sirven para elaborar la gráfica de la concentración vs. el tiempo, de la cual se determinan los siguientes valores (ver fig 6.19)

tiempo de aparición del trazador $t_1 = 0.5 \text{ min}$

tiempo modal (máxima concentración) $t_p = 30 \text{ min}$

tiempo para que atraviese la totalidad del trazador $t_f = 250 \text{ min}$

tiempo mediano, corresponde al paso del 50% del trazador $t_m = 28.73 \text{ min}$

Adicionalmente se tiene el tiempo teórico de retención $t_0 = 151.52 \text{ min}$

Aplicando los criterios teóricos presentados en la sección

6.1.3.3 se obtiene:

$t_1/t_0 = 0.0033 < 0.3$	Existencia apreciable de cortocircuitos
< 1	Predominio de flujo mezclado
$t_m/t_0 = 0.19 < 1$	Existencia de cortocircuitos
$t_p/t_0 = 0.20 < 1$	Predominio de flujo mezclado
$e = 1.27 < 2.3$	Existencia de más de 50% de flujo mezclado

Al estudiar la curva $C-C_0$ vs T se puede observar que el tiempo real de retención ($t_n = 65 \text{ min}$) está desplazado hacia la izquierda en relación con el tiempo teórico de retención $t_0 = 151.52 \text{ min}$ lo que nos indica la presencia de un alto porcentaje de cortocircuitos.

Observaciones

En el sedimentador se está encontrando un predominio del flujo mezclado. Se presentan cortocircuitos apreciables que originan un tiempo de retención mucho más pequeño que el teórico. Este hecho tiene las siguientes consecuencias:

- El volumen útil del sedimentador es sólo un 40% del calculado
- El tiempo de retención hidráulico real del sedimentador

no permite una buena sedimentación de los sólidos, lo cual altera su eficiencia.

En forma similar se calcularon los resultados de las otras pruebas, los cuales se encuentran en las tablas 6.7 y 6.8

TABLA 6.7

(muestreo en el efluente)

A) Wolf-Resnick

Prueba	p	m	M	Q (l/min)
1	27.29%	70.29%	71.72%	6.6
2	56.10%	64.35%	43.90%	20.1
3	37.58%	70.73%	62.42%	17.9

B) Tradicional

Prueba	t_1/t_0	t_m/t_p	t_p/t_0	e	t_0 (min)	t_r (min)
1	0.0033	0.19	0.20	1.26	151.51	65
2	0.20	0.316	0.30	0.50	49.75	20
3	0.00	0.2472	0.2685	1.88	55.87	30

TABLA 6.8

(muestreo en la recirculación)

A) Wolf-Resnick

Prueba	p	m	M	Q (l/min)
1	8.74%	-0.26%	91.26%	6.6
2	7.65%	47.71%	92.35%	20.1
3	13.05%	4.21%	86.95%	17.9

B) Tradicional

Prueba	t_1/t_0	t_m/t_0	t_p/t_0	e	t_0 (min)	t_r (min)
1	0.0332	0.8401	1.66	6.29	151.52	370
2	0.0201	0.3940	0.201	2.94	49.75	50
3	0.0537	0.8182	1.3525	0.86	55.87	75

6.1.5 Observaciones de los resultados

Al analizar los resultados de la tabla 6.1, se observa un predominio del flujo mezclado, a diferencia de la prueba 2, donde se obtuvo un 56% de flujo tipo pistón con el índice de Wolf-Resnick, sin embargo en esta misma prueba los índices tradicionales señalan un predominio de flujo mezclado en el sistema. Se observó también una gran cantidad de espacios muertos en el sistema. De las gráficas 6.19, 6.23 y 6.27, que corresponden a las gráficas de la concentración versus el tiempo de las tres pruebas con muestreo en el efluente, se aprecian cortocircuitos, ya que el tiempo de retención real t_h se recorre hacia la izquierda. Estas conclusiones se ven reforzadas por los índices tradicionales con los que se detecta el predominio del flujo mezclado y la existencia de los cortocircuitos.

Al analizar la tabla 6.2, se observa una menor cantidad de flujo tipo pistón cuando se muestra en la recirculación ($p = 8.74\%$, 7.65% 13.15%). También se observaron menos espacios muertos que para el caso del muestreo en el efluente.

De las gráficas 6.21 y 6.29, se puede observar que el tiempo de retención real está recorrido hacia la derecha del tiempo de retención teórico, lo cual nos señala la presencia de espacios muertos aunque para el caso de la gráfica 6.21 que corres

ponde a la prueba no. 1 el índice de Wolf-Resnick resultó negativo.

Por otra parte, en el caso de la prueba no. 2 el índice de Wolf-Resnick señala la presencia de un 41.71% de espacios muertos y por la gráfica 6.25 se puede observar una coincidencia de los tiempos de retención teórico y real, lo que significa un flujo libre de cortocircuitos y espacios muertos. Estas discrepancias pueden atribuirse a errores experimentales. Se encontró que los dos métodos dan una idea general del comportamiento hidráulico del sedimentador. El flujo parece ser predominantemente de tipo mezclado y con una minoría de flujo tipo pistón, encontrándose también una gran cantidad de espacios muertos y cortocircuitos.

Como se puede apreciar en las gráficas 6.20 y 6.24 no es fácil determinar la tangente a la parte superior de la curva $\log 1 - F(t)$ vs T/t_0 y en esta determinación puede influir bastante el criterio de la persona que lo hace, lo cual puede afectar los resultados del análisis.

6.2 Estudio de la variación de la compactación con el tiempo de retención hidráulico y la recirculación

En la literatura técnica se ha encontrado que para efectos de diseño el valor del grado de compactación de los lodos en un

sedimentador se toma invariablemente igual a tres (16). O sea que si por ejemplo el valor máximo esperado de sólidos suspendidos en el tanque de aeración es de 400 mg/l, se diseñará el sedimentador para que se produzca una recirculación con una concentración igual a 1200 mg/l. En ningún libro se ha encontrado la razón de esto.

En el modelo de la planta de tratamiento de lodos activados de C.U. se efectuaron varias pruebas, haciendo variar los parámetros siguientes: el tiempo de retención hidráulico (θ_H), el tiempo de retención celular (θ_c), la tasa de recirculación (r), el caudal del influente (Q) y los sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM). Se observaron los valores de los sólidos suspendidos en el tanque (X_T) y los sólidos suspendidos en la recirculación (X_r), se tomaron también los valores de la DBO_5 del influente y del efluente pudiéndose así medir el grado de compactación alcanzado en el sedimentador y la eficiencia de remoción de la DBO_5 en el sistema.

$$\text{Grado de compactación} = \frac{X_r}{X_t} \quad (6.24)$$

donde

X_r sólidos suspendidos en la recirculación

X_t sólidos suspendidos en el tanque de aeración

Eficiencia

$$\eta = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \quad (6.25)$$

donde

$$S_o = \text{DBO}_5$$

$$S_e = \text{DBO}_5$$

Los datos y resultados de las pruebas mencionadas se presentan en la tabla (6.9). A partir de estos datos se graficó el valor del grado de compactación (X_n/X_T) en función de la fracción de recirculación (fig 6.30). Se agruparon los datos en función del caudal de entrada y del tiempo de retención hidráulico del tanque. En la tabla (6.10) se presentan los coeficientes de correlación de cada recta encontrada.

De la tabla de resultados se puede apreciar que en general la eficiencia de la planta η es buena, siendo la más baja del 81.2% de remoción de la DBO lo cual es un valor muy aceptable.

Al observar la gráfica de la fig 6.30 nos damos cuenta que se forma una familia de rectas agrupadas por caudal y tiempo de retención hidráulico que se cruzan en un mismo punto, el cual corresponde aproximadamente a $(r, X_n/X_T) = (0.6, 3)$. Estos resultados indican que aunque exista una variación en el gasto (Q) y en el tiempo de retención hidráulico (θ_H), si se utiliza un valor de recirculación (r) de 0.6, se obtendrá invariablemente un grado de compactación (X_n/X_T) igual a tres. Lo más probable es que la práctica se había llegado a esta conclusión en forma empírica.

TABLA 6.9. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DE COMPACTACION

Prueba #	θ_H (h)	θ_c (d)	Q (l/min)	n	X_n/X_t	$\frac{S_o - S_e}{S_o}$
1	9.6	4	4.91	0.24	7.4	90.9
2	9.1	5.4	5.19	0.68	2.8	90.6
3	8.9	8	5.29	0.4	3.8	88.1
4	6.7	8.9	7.08	0.47	3.7	92.0
5	6.6	4.6	7.17	0.66	2.5	81.2
6	6.5	4.5	7.22	0.46	4.3	96.2
7	6.5	4.7	7.21	0.29	5.7	95.9
8	6.46	4.77	7.31	0.52	3.5	87.1
9	6.43	5.88	7.35	0.68	2.9	85.7
10	6.40	4.32	7.38	0.27	5.5	84.6
11	4.22	8.6	11.19	0.68	2.5	89.2
12	4.20	4.5	11.31	0.60	3.1	91.0
13	4.07	5.1	11.60	0.68	2.9	93.4
14	4.02	3.8	11.76	0.49	3.3	87.7
15	4.0	5.2	11.87	0.31	4.3	94.0
16	3.9	4.1	12.03	0.67	2.9	88.5

TABLA 6.10

RECTA 1

Prueba	θ_H (h)	Q (l/min)	X_n/X_t	r
1	9.6	4.91	7.4	0.24
2	9.1	5.9	2.8	0.68
3	8.9	5.29	3.8	0.4

$$\bar{\theta}_{H1} = 9.2 \text{ h}$$

$$\bar{Q}_1 = 5.13 \text{ l/min}$$

$$r' = 0.9$$

donde r' es el coeficiente de correlación

$$(r, X_n/X_t) = (0.6, 3.2)$$

RECTA 2

Prueba	θ_H (h)	Q (l/min)	X_n/X_t	r
4	6.7	7.08	3.7	0.47
5	6.6	7.17	2.5	0.66
6	6.5	7.22	4.3	0.46
7	6.5	7.21	5.7	0.29
8	6.46	7.31	3.5	0.52
9	6.43	7.35	2.9	0.68
10	6.4	7.38	5.5	0.27

$$\bar{\theta}_{H2} = 6.51 \text{ h}$$

$$\bar{Q}_2 = 7.25 \text{ l/min}$$

$$r' = 0.94$$

$$(r, X_n/X_t) = (0.6, 3.11)$$

RECTA 3

Prueba	θ_H (h)	Q (l/min)	X_n/X_t	n
11	4.22	11.19	2.5	89.2
12	4.20	11.32	3.1	91.0
13	4.07	11.60	2.9	93.4
14	4.02	11.76	3.3	87.7
15	4.0	11.87	4.3	94.0
16	3.9	12.03	2.9	88.5

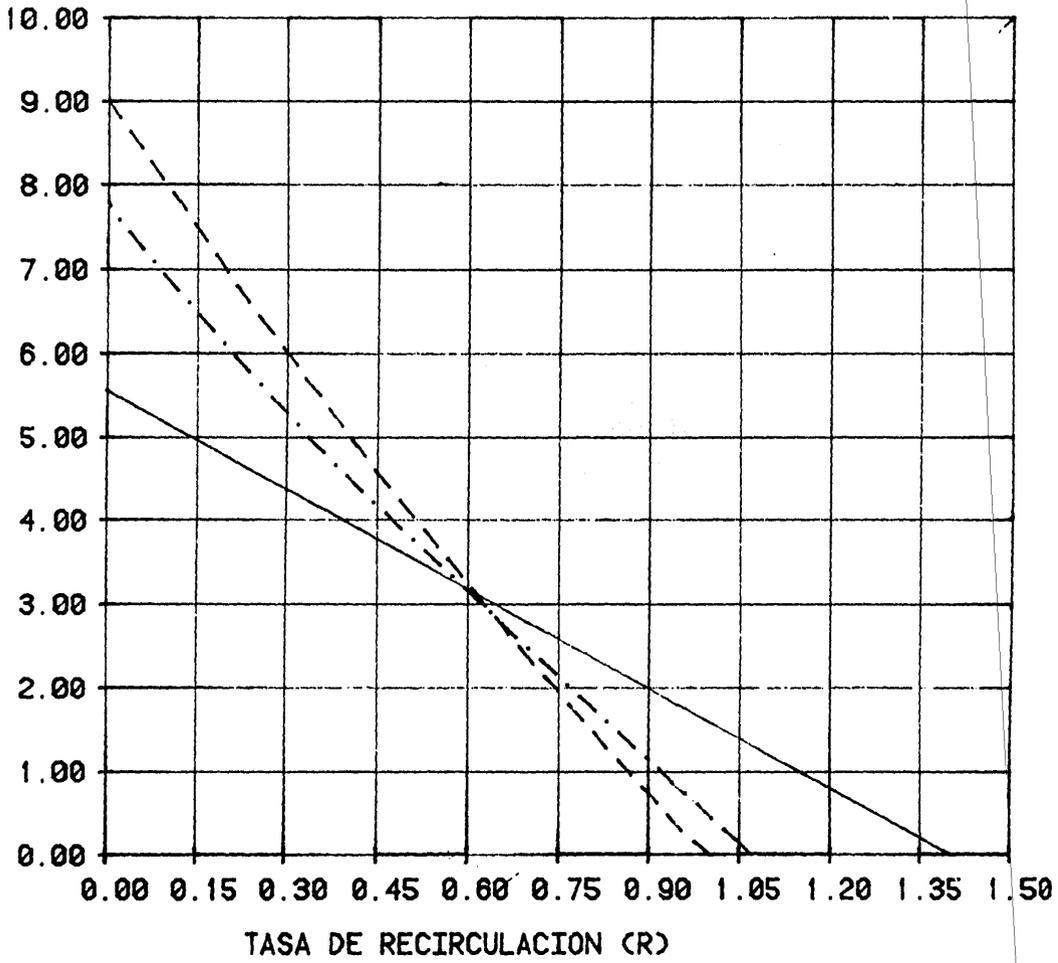
$$\bar{\theta}_{H_3} = 4.07 \text{ h}$$

$$\bar{Q}_3 = 11.63 \text{ l/min}$$

$$n' = 0.96$$

$$(n, X_n/X_t) = (0.6, 3.05)$$

GRADO DE COMPACTACION (XR/XT)



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten deducir las siguientes conclusiones.

7.1 Conclusiones y recomendaciones del estudio hidráulico del sedimentador

- a) Se notó un predominio del flujo mezclado en el sedimentador, teniéndose aproximadamente un 80% de flujo mezclado y un 20% de flujo tipo pistón
- b) Se observó la presencia de cortocircuitos y espacios muertos

Las consecuencias resultantes de la situación anterior son:

- a) El sedimentador no trabaja al 100% de su capacidad volumétrica
- b) El agua no permanece el tiempo suficiente en el sedimentador para que se efectúe adecuadamente el proceso
- c) Las turbulencias provocadas por el flujo mezclado afectan también la eficiencia del sedimentador.

Las recomendaciones que pueden plantearse a partir de los resultados y conclusiones son:

- a) Aumentar la longitud de la mampara del sedimentador piloto para disminuir los cortocircuitos y la turbulencia, mejorando así la calidad del efluente al darle mayor tiempo de retención a las partículas para lograr una mejor sedimentación
- b) Colocar una pantalla perforada en la parte inferior del sedimentador (en la división del cilindro y el cono) permitiendo así reducir el efecto de turbulencia causado por la extracción de los lodos
- c) La prueba de trazadores y el análisis de los resultados por los métodos tradicionales y por el método de Wolf-Resnick, se pueden utilizar en forma general con facili-

dad para evaluar el comportamiento hidráulico de un sedimentador y así corregir las fallas del mismo, optimizando su eficiencia

7.2 *Conclusiones y recomendaciones del estudio de la variación del grado de compactación con el tiempo de retención hidráulico y la tasa de recirculación*

- a) En los resultados de esta prueba se ha encontrado que en el sedimentador de la planta piloto, al variar el gasto Q y el tiempo de retención hidráulico θ_H , si se recirculaban los lodos a una tasa de 0.6, se obtenía invariablemente un grado de compactación de 3
- b) Se recomienda que se utilice una tasa de recirculación de 0.6 en el sedimentador secundario de la planta de tratamiento de C.U., así se tendrá una mejor eficiencia en el proceso ya que varía mucho el gasto en esta planta
- c) Para complementar y ampliar la aplicación de esta conclusión a nivel general, sería conveniente hacer nuevas pruebas variando la forma geométrica del sedimentador y hacer otras con un sedimentador provisto de rastras.

7.3 Conclusiones del estudio bibliográfico

- a) En la limitada revisión bibliográfica efectuada se encontró que hasta la fecha se ha hecho poca investigación sobre sedimentadores secundarios en los Estados Unidos
- b) En la literatura revisada, muchos autores encuentran resultados que se contradicen entre sí
- c) Sería conveniente ampliar este estudio con bibliografía de otros países para así tener más información respecto a los sedimentadores secundarios.

REFERENCIAS

1. Viñas M., "Estudio dinámico del proceso de lodos activados (1a. Etapa)", Informe interno del Instituto de Ingeniería, noviembre 1984
2. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, "Manual de Tratamiento de Aguas Negras", Ed. Limusa, México, 1980
3. Dick, R., "Role of the activated sludge final settling tanks", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE. Vol, 96, abril (1970)
4. Hazen, A., "On Sedimentation", Transactions, ASCE, Vol. 53, (1904)
5. Camp, T., "Sedimentation and the design of settling tanks", Transactions, Vol, 111, (1946)
6. Dobbins, W., "Effect of turbulence on Sedimentation" Transactions, ASCE, Vol, 109, (1944)
7. Fitch, E.B., "The Significance of detection in Sedimentation", Sew. Ind. Wastes, Vol, 29 (1975)

8. Pflanz, P., "Performance of (Activated Sludge) Secondary Sedimentation Basins", Adv. Water Pollution Res.,; Proceedings of the 4th International Conference, S.H. Jenkins (ED), Pergamon Press, New York, N.Y. (1969)
9. Ramalho, R.S., "Introduction to Wastewater Treatment Process" 2nd Edition, Academic Press, (1983)
10. Shiba, S., "Dynamic response of settling basins", Journal of the Environmental Engineering. Division ASCE, Vol, 101, october (1975)
11. Tai, S., "Fourier Analysis of flow rate and concentration of inflow into waste water treatment plants", Journal of Water and Waste, Vol. 7, (1965)
12. Boyle, W., "Don't forget side water depth", Water Wastes Engineering, June (1975)
13. Degrémont, "Mémento technique de l'eau", 8^{eme} édition, Degrémont, Paris (1978)
14. Tuntoolavest, M., "Factors affecting the clasification performance of activated sludge final settlers", Journal Water Pollution Control Federation, wl, 55, March (1983)

15. Cashion, B., "Control strategies for the activated sludge process", Journal Water Pollution Control Federation, Vol, 51, abril (1979)
16. Eckenfelder W.W., Ford, D.L., "Water Pollution Control Experimental Procedures for Process Design". Pemberton Press, (1970)
17. Mecalff and Eddy, Inc.; "Wastewater Engineering", Mc Graw Hill Book Company (1972)
18. Wolf-Resnick, "Residence time distribution in real systems", Chemical Engineering Department, Israel Institute of Technology, Haifa, November 1963.