

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“Estudio del Fenómeno de Sedimentación
en el Tratamiento del Agua en Tres
Casos de Estudio”**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO CIVIL

Presentada por:

**Juan Carlos Vega Guzmán
José Alfredo Villacreses Zambrano**



BIBLIOTECA FICT
ESPOL



Guayaquil :-: Ecuador

Año: 2006

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Estudio del Fenómeno de Sedimentación en el
Tratamiento del Agua en Tres Casos de Estudio”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Juan Carlos Vega Guzmán

José Alfredo Villacreses Zambrano



GUAYAQUIL – ECUADOR



**BIBLIOTECA FICT
ESPOL**

Año: 2006

AGRADECIMIENTO

Antes que todo queremos agradecer la ayuda de ese ser supremo que es Dios.

Nuestros sinceros agradecimientos, a los profesores, ya que de ellos recibimos las mejores enseñanzas, las cuales nos dieron impulso en nuestra carrera. A todos nuestros compañeros, ya que con ellos compartimos nuestra vida estudiantil.

Agradecemos de todo corazón a nuestro director de tesis Dr. David Matamoros, ya que con paciencia y dedicación supo guiarnos a lo largo de la realización de nuestra tesis, para conseguir nuestros objetivos deseados.

También agradecemos a la planta de hormigones Holcim por permitirnos tomar las muestras necesarias para el objetivo de nuestra investigación.



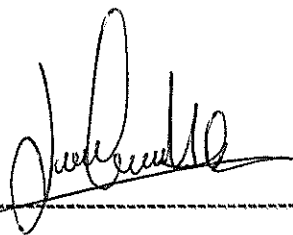
**BIBLIOTECA FICT
ESPOL**

DEDICATORIA

Con todo mi amor para mis queridos padres, **LEÓN MANUEL VEGA BORJA Y DOLORES PIEDAD GUZMÁN CAMACHO**. Ya que ellos siempre estuvieron apoyándome en los momentos mas duros de mi vida, para poder seguir adelante en mis propósitos.

A todos mis hermanos ya que con ellos compartí muchos momentos inolvidables, y que llevare siempre presente. A una persona muy especial dentro de mi vida personal Cinthia Esther Camacho Sánchez.

A todas las personas que colaboraron con la realización de la presente investigación.



Juan Carlos Vega Guzmán



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi Madre, por su apoyo, por los consejos en los momentos más difíciles y por ser mi constante inspiración, a mi Padre por ser mi guía y ejemplo a seguir; a mi Hermano por creer en mi, a mi Hermana por su apoyo incondicional. A mis profesores, en especial al Dr. David Matamoros por permitir que esta tesis se haga realidad, gracias a sus conocimientos, ideas, y confianza depositada en nosotros. Finalmente a Dios, por haberme permitido tener cerca a tantas personas especiales que de alguna manera me han ayudado a creer en mis ideas y a cumplir las metas que me he trazado en este camino que he empezado a recorrer.

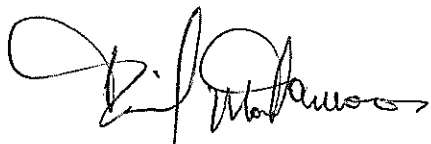


BIBLIOTECA FICT
ESPOL

José Alfredo Villacreses

José Alfredo Villacreses Zambrano

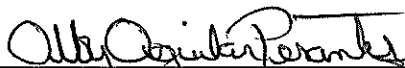
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dr. David Matamoros
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Msc. Manuel Gómez de la Torre Gómez
VOCAL PRINCIPAL



Ing. Msc. Alby Aguilar
VOCAL PRINCIPAL



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

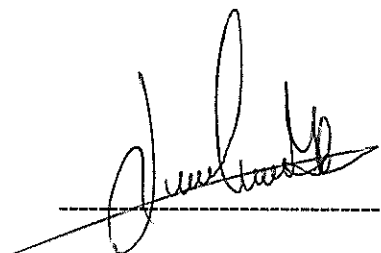
DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a los autores, y el patrimonio intelectual de la tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

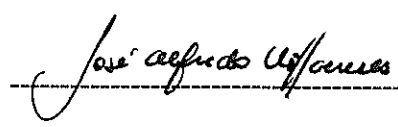
(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



**BIBLIOTECA FICT
ESPOL**



Juan Carlos Vega Guzmán



José Alfredo Vilacreses Zambrano

RESUMEN

Para el análisis de la sedimentación en el agua, se procede analizar tres diferentes tipos de muestras de agua "cruda" para tratamiento, una muestra de agua preparada con suelo, agua del lavado de camiones mezcladores de concreto, y una muestra de agua proveniente del río Daule cerca de la estación de tratamiento de agua potable "La Toma".

En el diseño de Sedimentadores, es necesario realizar análisis de sedimentabilidad del agua a tratar. Se tuvo que estudiar con detalle cada tipo de muestra, mediante la elaboración de curvas de sedimentación. A partir de dichas curvas se obtuvieron parámetros unitarios referenciales a ser utilizados en el futuro diseño de sedimentadores.

El agua residual "preparada" demostró tener un comportamiento similar a las otras muestras analizadas (agua del río Daule y el Agua de lavado de vehículos hormigoneros). Las curvas de sedimentación probaron ser útiles para determinar el área de sedimentación. Se determino que una concentración de sólidos alta resulta en una mayor área necesaria para la sedimentación.

Adicionalmente, hubo necesidad de usar Sulfato de aluminio como floculante en las muestras de agua del río como en la de agua residual preparada. La selección de la dosis optima se realizo usando también las columnas de sedimentación.



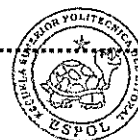
BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Este proyecto no hubiera sido posible realizarlo sin la ayuda de otras personas que colaboraron para el desarrollo de la tesis. En Ecuador se han realizado investigaciones de este tipo, pero no tan exhaustivamente. Adicionalmente, se decidió tomar este tema porque en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra no se posee un esquema elaborado de cómo realizar este tipo de ensayos. Normalmente, la bibliografía recomienda hacer estos ensayos con equipos mas sofisticados como columnas de 2.5 m de altura en adelante. Sin embargo, se ha ajustado a columnas de sedimentación más pequeñas para su mejor manejo en el laboratorio. Otros factores que incidieron en la selección de columnas pequeñas fueron las condiciones de logística, espacio y financiamiento,

La presente investigación es solo el primer paso que se ha dado en el campo de la sedimentación en la FICT, ya que existen diversos temas que pueden ser derivados en estudio de este fenómeno. Este es un tema muy importante que incide en el diseño de plantas de tratamiento de agua y por ende en los costos relacionados con el tratamiento del agua.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	01
ÍNDICE GENERAL.....	03
NOTACION.....	07
NOMENCLATURA.....	09
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
INDICE DE TABLAS.....	14
INDICE DE FOTOS.....	15
CAPITULO 1.	
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Generales.....	18
1.3.2 Especificos.....	18
1.4 Estructura de la tesis.....	19
CAPITULO 2.	
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	21
2.1 Teoría de la Sedimentación.....	22



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

2.1.1	Conceptos Generales.....	22
2.1.2	Sedimentación de partículas discretas.....	23
2.1.3	Sedimentación de partículas floculentas.....	23
2.1.4	Sedimentación por caída libre e interferida.....	24
2.2	Expresiones de velocidad de sedimentación.....	24
2.2.1	Partículas discretas con caída libre.....	24
2.2.2	Sedimentación de partículas floculentas.....	33
2.3	Factores que influyen en el proceso de sedimentación.....	38
2.3.1	Calidad del agua.....	38
2.3.2	Condiciones hidráulicas.....	40
2.3.3	Factores externos.....	43
2.4	Clasificación de Sedimentadores.....	44
2.4.1	Sedimentadores y decantadores estáticos.....	44
2.4.2	Decantadores dinámicos.....	55
2.4.3	Componentes de una unidad.....	55
2.4.4	Tipos de Unidades Dinámicas.....	56
2.4.5	Decantadores laminares.....	66
2.4.6	Tipos de Sedimentadores Laminares.....	69
2.5	Teoría Columnas de Sedimentación.....	74
2.5.1	Etapas de las Columnas de Sedimentación.....	74
2.5.2	Criterios Generales.....	80
2.5.3	Columnas de Sedimentación.....	81

2.5.4 Selección del Método de Análisis de esta Investigación....	84
--	----

CAPITULO 3.

3. CASOS DE ESTUDIOS.....	99
3.1 Generalidades.....	90
3.2 Caso de Estudio 1: Agua Proveniente del Río Guayas.....	94
3.2.1 Preparación de la Muestra y Propósito.....	94
3.2.2 Ensayos Realizados sin Utilizar Floculante.....	96
3.2.3 Ensayos Realizados Usando Floculante.....	97
3.2.4 Resultados.....	98
3.3 Caso de Estudio 2: Agua Proveniente del Lavado de camiones Mezcladores de Hormigón.....	108
3.3.1 Sitio Escogido para la toma de la Muestra.....	108
3.3.2 Implementación del Ensayo.....	110
3.3.3 Ensayos Realizados.....	110
3.3.4 Resultados.....	112
3.4 Caso de Estudio 3: Agua Río Daule cerca de la Estación la Toma.....	113
3.4.1 Selección del sitio del muestreo.....	113
3.4.2 Preparación de la Muestra.....	113
3.4.3 Ensayos de Concentración Original sin Floculante.....	114
3.4.4 Ensayos de Concentración Original con Floculante.....	115
3.4.5 Ensayos a diferentes concentraciones con dosis óptima de floculante.....	117
3.4.6 Resultados.....	118

CAPITULO 4.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	121
4.1 Determinación del Área de Sedimentación Mínima respecto a un caudal unitario.....	122
4.2 Análisis de Curvas de Sedimentación Zonal.....	131
4.2.1 Discusión sobre la Dosis de Flocculante.....	136
4.3 Determinación de la Superficie necesaria de Sedimentación a partir del Análisis del Flujo de Sólidos.....	138

CAPITULO 5.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	159
5.1 Conclusiones.....	160
5.1.1 Metodología Utilizada.....	160
5.1.2 Limitaciones Encontradas.....	160
5.1.3 Aplicabilidad de la Investigación.....	161
5.1.4 Uso de la Flocculación Química.....	162
5.2 Recomendaciones.....	163
ANEXOS.....	165
BIBLIOGRAFIA.....	181



**BIBLIOTECA FICT
ESPOL**

NOTACION

g	Aceleración de la Gravedad	m/s^2
h_0	Altura de la Columna de Sedimentación	cm
H	Altura de Sedimentador	m
H_u	Altura a la cual todos los sólidos se encuentran a la concentración deseada en el fondo del tanque	cm
H_0	Altura inicial de la interfase en la columna	m
CL	Concentración de Lodos Limitante	mg/l
C_0	Concentración inicial de sólidos en el caudal de entrada	mg/l
C_0/SFL	Concentración Inicial sobre flujo de sólidos limitante	$m^2 h/m^3$
Q	Caudal ingreso al sedimentador	m^3/h
Q_r o Q_u	Caudal de recirculación en el sedimentador	m^3/h
C_i	Concentración de sólidos en el punto de estudio	mg/l
cm	Centímetros	
C_D	Coefficiente de Arrastre de Newton	Kg/m^3
K_1, K_2	Constantes de sedimentación de la ecuación de Faiz, Geyer y Okun	-
C_u	Concentración deseada en el fondo del tanque	m
C_2	Concertación critica que controla la capacidad de manipulación del fango en un tanque	mg/l
K	Constante de conversión en flujo de sólidos	-
ρ	Densidad del liquido	Kg/m^3
ρ_s	Densidad del sólido	Kg/m^3
S_S	Densidad Relativa	
d	Diámetro de Partículas	mm
SFL	Flujo de Sólido Limitante	$Kg/m^2.h$
SF_u	Flujo de sólidos debido a la extracción de fangos	$Kg/m^2.h$
SF_g	Flujo de sólidos debido a la gravedad	$Kg/m^2.h$
F_F	Fuerza de Flotación	N
F_G	Fuerza gravitacional	N
F_i	Fuerza Resultante o Fuerza de Impulsión	N
F_R	Fuerza Resultante	N
L	Longitud de Sedimentador	m
Re_0	Numero de Reynolds	$(Kg/m^3)^{-1}$



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

A_{min}	Superficie mínima para espesado de fangos	m^2
A	Superficie necesaria para el espesado de fangos	m^2
t_0	Tiempo inicial	min
t_u	Tiempo necesario para alcanzar la concentración de fangos deseados en el fondo del tanque	s
T_o	Tiempo de Retención	s
U_b	Velocidad de la masa por bombeo	m/h
V_i	Velocidad de sedimentación de los sólidos a la concentración C_i	m/h
$K =$	1/1000	
V_s	Velocidad de Sedimentación	m/h
u	Viscosidad cinemática (Stokes)	s/m^2
V_H	Velocidad Horizontal del liquido	m/s
V	Volumen del sólido	m^3
V	Volumen de la Unidad	m^3

NOMENCLATURA

CERGRENE	Center Enseignement Recherche pour Gestion Ressources Naturelles Environnement
CRADA	Cooperative Research and Development Agreement
EPA	Environmental Protection Agency
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
SS	Sólidos Suspendidos
UWMB	Urban Watershed Management Branch.
NTU	Unidad Nefelométricas de Turbiedad
WWF	Wet Weather Flows



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

ÍNDICE DE FIGURAS



		Pág.
Figura 01.	Fuerzas Actuantes en una Partícula.....	25
Figura 02.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático Valores K_1 . $V_s = K_2 X_2$	31
Figura 03.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático Valores K_2 . $V_s = K_2 X_2$	32
Figura 04.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático $V_s = K_2 X_2$	33
Figura 05.	Índices de Willcomb para Determinar el Tamaño del Flóculo.....	35
Figura 06.	Decantación por Caída Interferida.....	36
Figura 07.	Análisis de la Curva de Sedimentación Interferida.....	37
Figura 08.	Influencia de las Corrientes Térmicas en los Procesos de Sedimentación.....	39
Figura 09.	Corrientes Cinéticas.....	42
Figura 10.	Efecto de la Zona de Salida en las Líneas de Flujo.....	43
Figura 11.	Partículas Discretas.....	45
Figura 12.	Zonificación de un Sedimentador.....	47
Figura 13.	Desarenador Rectangular.....	48
Figura 14.	Sedimentadores o Decantadores Estáticos Rectangulares.....	50
Figura 15.	Sedimentadores o Decantadores Estáticos Circulares.....	51
Figura 16.	Sedimentador Estático de Flujo Vertical.....	53
Figura 17.	Sedimentador Estático de Flujo Helicoidal.....	54
Figura 18.	Componentes de un Clarificados de Manto de Lodos.....	56
Figura 19.	Decantadores de Manto de Lodos.....	58
Figura 20.	Unidad de Manto de Lodos con Agitación Simple.....	60
Figura 21.	Unidades de Separación Dinámica Acclator Infilco.....	61
Figura 22.	Unidades de Separación Dinámica Decantador de Brno (Checoslovaquia).....	62
Figura 23.	Unidades de Separación Dinámica Decantador Aquazur- B.....	63
Figura 24.	Decantador de Manto de Lodos Tipo Pulsante.....	65
Figura 25.	Efecto de Introducción de superficies intermedias de Sedimentación en los Decantadores Convencionales.....	66
Figura 26.	Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.....	68
Figura 27.	Sedimentador Laminar de Flujo Horizontal.....	70
Figura 28.	Decantador de Placas con Canaletas Laterales de Recolección de Agua Decantada, Tolvas Continuas para Lodos y Extracción Mediante Sifones.....	71
Figura 29.	Decantador de Placas Adecuado para Plantas Grandes: Canal Central de Distribución, Sistemas de Recolección	

	Mediante Tuberías y Tolvas de Lodos con Colectores de Extracción Uniforme.....	72
Figura 30.	Decantador de placas adecuado para plantas pequeñas: tuberías de distribución uniforme, vertederos de recolección y canal de extracción uniforme de lodos.....	73
Figura 31.	Columna de Sedimentación, Esquema de las Regiones de Sedimentación.....	75
Figura 32.	Análisis de Sedimentación Retardada.....	79
Figura 33.	Representación esquemática de un tanque de sedimentación operando en estado estacionario.....	85
Figura 34.	Esquema del Análisis flujo de sólidos.....	87
Figura 35.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 4 \text{ g/l}$; $v = 0,099 \text{ m/h}$	98
Figura 36.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 6 \text{ g/l}$; $v = 0,078 \text{ m/h}$	99
Figura 37.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 8 \text{ g/l}$; $v = 0,30 \text{ m/h}$..	99
Figura 38.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 10 \text{ g/l}$; $v = 0,28 \text{ m/h}$	100
Figura 39.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 15 \text{ g/l}$; $v = 0,246 \text{ m/h}$	100
Figura 40.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 20 \text{ g/l}$; $v = 0,21 \text{ m/h}$	101
Figura 41.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 40 \text{ g/l}$; $v = 0,08 \text{ m/h}$	101
Figura 42.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo A).....	102
Figura 43.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,4 \text{ g/l}$	103
Figura 44.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,6 \text{ g/l}$	104
Figura 45.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,80 \text{ g/l}$	104
Figura 46.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo B).....	105
Figura 47.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,60 \text{ g/l}$	106
Figura 48.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,6 \text{ g/l}$	106
Figura 49.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,8 \text{ g/l}$	107
Figura 50.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $1,0 \text{ g/l}$	107
Figura 51.	Comportamiento de las Curvas de Sedimentación en función de las diferentes concentraciones.....	112
Figura 52.	Comportamiento de la Curva de Sedimentación en función del floculante añadido ($C_0 \text{ suelo} = 8,85 \text{ g/l}$).....	119
Figura 53.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con <u>Agua río Daule</u>)	119
Figura 54.	Análisis gráfico de la curva de sedimentación de la interfase.....	122
Figura 55.	Relación A/Q vs. C para agua residual preparada sin floculante.....	127

Figura 56.	Relación A/Q vs. C para agua del lavado de camiones mezcladores.....	128
Figura 57.	Relación A/Q vs. C para agua artificial con floculante para Suelo A.....	129
Figura 58.	Grafico A/Q vs C para agua artificial con floculante para Suelo B.....	130
Figura 59.	Relación A/Q vs. C para agua río Daule con floculante.....	130
Figura 60.	Variación de la velocidad para las diferentes concentraciones de suelo sin la utilización de floculante (Suelo B).....	132
Figura 61.	Gráfica V vs C para agua de lavado de camiones mixer.....	133
Figura 62.	Grafico V vs C para agua residual "preparada" con Floculante optimo.....	135
Figura 63.	Graficó V vs C_0 para agua del río Daule con floculante optimo.....	135
Figura 64.	Representación esquemática de un tanque de sedimentación funcionando en condiciones estacionarias..	139
Figura 65.	Procedimiento para obtener curva de flujo de sólidos debido a la gravedad.....	141
Figura 66.	Esquema de definición para el análisis de los datos de sedimentación utilizando el método de análisis de flujo de sólidos.....	142
Figura 67.	Esquema análisis de flujo limitante por el método flujo de sólidos.....	143
Figura 68.	Esquema para determinar la velocidad de sedimentación a partir de datos de sedimentación tipo batch.....	144
Figura 69.	Esquema de análisis para determinar diferentes valores de concentración de lodos SFL con su respectiva concentración máxima C	145
Figura 70.	Esquema de análisis para determinar SFL con su respectiva concentración máxima para cada valor de SFL o CL	146
Figura 71.	Esquema para determinar el área de un sedimentador en función de la concentración de lodos y la concentración final que queremos en el sedimentador.....	147
Figura 72.	Análisis de Flujo de Sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra del suelo B sin uso de floculante.....	148
Figura 73.	Variación del área de un sedimentador para el agua residual Artificial sin Floculante.....	149
Figura 74.	Análisis de flujo de sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra de <u>Suelo A</u> con uso de floculante.....	150

Figura 75.	Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo A.....	151
Figura 76.	Análisis de flujo de sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra de <u>Suelo B</u> con uso de floculante.....	152
Figura 77.	Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo B.....	153
Figura 78.	Análisis de flujo de sólidos para el agua muestra del lavado de camiones mezcladores de concreto.....	154
Figura 79.	Variación del área de un sedimentador para el agua del lavado de camiones mezcladores de concreto.....	155
Figura 80.	Análisis de flujo de sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra del río Daule.....	156
Figura 81.	Variación del área de un sedimentador para el agua del río Daule con utilización de floculante.....	157

ÍNDICE DE TABLAS

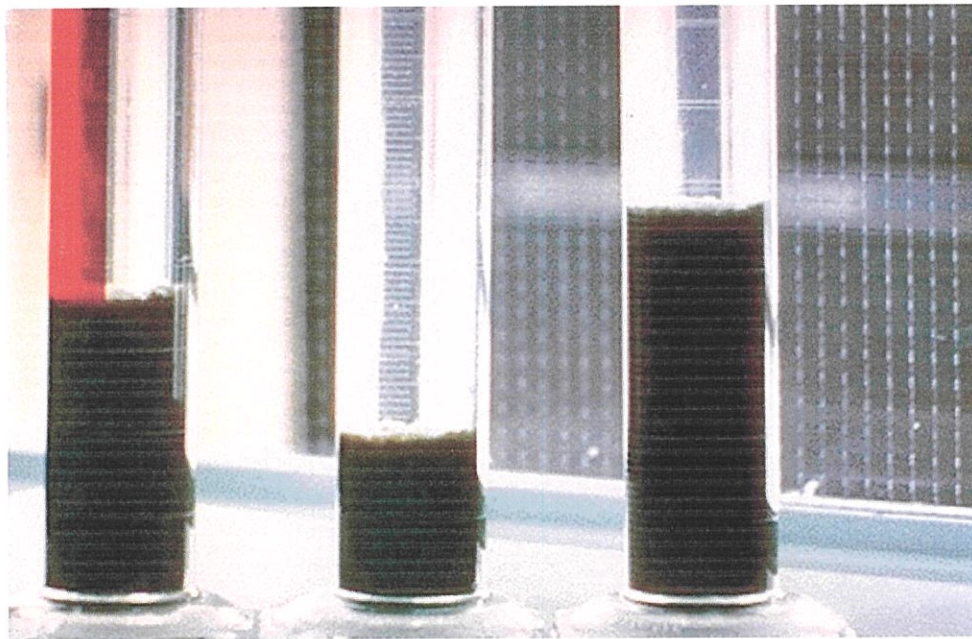
		Pág.
Tabla 1.	Valores de Coeficiente de Arrastre Newton.....	29
Tabla 2.	Características de Decantadores de Manto de Lodos.....	57
Tabla 3.	Dimensiones de cilindros utilizados en los ensayos de sedimentación.....	90
Tabla 4.	Concentraciones utilizadas en los ensayos de sedimentación.....	93
Tabla 5.	Floculante Optimo obtenido en las diferentes concentraciones de suelo del caso 1.....	136
Tabla 6.	Esquema para la fabulación de datos para graficas Co/SFL vs Co.....	147
Tabla 7.	Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente sin floculante.....	148
Tabla 8.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada sin floculante.....	149
Tabla 9.	Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente con floculante Suelo A.....	150
Tabla 10.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo A.....	152
Tabla 11.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo B.....	153
Tabla 12.	Valores de flujo limitante para agua del lavado de camiones mixer.....	155
Tabla 13.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos para agua del lavado de camiones mezcladores mixer.....	155
Tabla 14.	Valores de flujo limitante o concentración de lodos.....	156
Tabla 15.	Valores de Co/SFL para agua de río Daule con floculante..	157
Tabla 16.	Variación de la Interfase para una C= 4 g/l.....	166
Tabla 17.	Variación de la Interfase para una C= 6 g/l.....	166
Tabla 18.	Variación de la Interfase para una C= 8 g/l.....	166
Tabla 19.	Variación de la Interfase para una C= 10 g/l.....	167
Tabla 20.	Variación de la Interfase para una C= 15 g/l.....	167
Tabla 21.	Variación de la Interfase para una C= 20 g/l.....	167
Tabla 22.	Variación de la Interfase para una C= 40 g/l.....	168
Tabla 23.	Variación de la Interfase para una C= 4 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	168
Tabla 24.	Variación de la Interfase para una C= 6 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	169
Tabla 25.	Variación de la Interfase para una C= 8 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	169

Tabla 26.	Variación de la Interfase para una C= 10 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	170
Tabla 27.	Variación de la Interfase para una C= 15 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	170
Tabla 28.	Variación de la Interfase para una C= 20 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	171
Tabla 29.	Variación de la Interfase para una C= 40 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	172
Tabla 30.	Variación de la Interfase para las concentraciones Co, C1 y C2.....	173
Tabla 31.	Variación de la Interfase para una Co= 8,85 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	175
Tabla 32.	Variación de la Interfase para una C1= 22,81 g/l, C2= 30,45 g/l, C3= 42,19 g/l, C4=48,80 g/l con concentración óptima de Sulfato de Aluminio = 0,5 g/l.....	175
Tabla 33.	Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.....	176
Tabla 34.	Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.....	176
Tabla 35.	Valores A/Q para agua artificial con floculante.....	176
Tabla 36.	Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.....	177
Tabla 37.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial sin floculante...	177
Tabla 38.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo A.....	177
Tabla 39.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo B.....	178
Tabla 40.	Valor de flujo de sólidos para agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón.....	178
Tabla 41.	Valores de flujo de sólidos para agua del río Daule con floculante.....	178
Tabla 42.	Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.....	179
Tabla 43.	Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.....	179
Tabla 44.	Valores A/Q para agua artificial con floculante.....	179
Tabla 45.	Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.....	179

ÍNDICE DE FOTOS

		Pág.
Foto 1.	Esquema de Zonas de sedimentación.....	75
Foto 2.	Columnas de sedimentación.....	81
Foto 3.	Balanza Digital.....	94
Foto 4.	Sedimentador típico planta mirador Holcim.....	109

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.



Columnas Típicas para Ensayos Sedimentación



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

1.1 Antecedentes.

El presente trabajo trata sobre los procesos de sedimentación en el Tratamiento del Agua, enfocándose en la obtención de una mejor calidad del agua. Este estudio contribuye al mejoramiento del agua de consumo diario de la población. Adicionalmente, se pueden usar los mismos principios en el tratamiento de aguas residuales.

La sedimentación es un proceso que también afecta el comportamiento hidráulico de los sistemas hídricos. Lamentablemente, en el Ecuador no se han realizado estudios detallados sobre este fenómeno.

En el estudio se analizará el diseño de sedimentadores de acuerdo a diversos tipos de agua estudiada.

1. Agua residual artificialmente preparada (añadiendo suelo fino a agua de la llave).
 2. Agua de lavado de camiones mezcladores de hormigón.
 3. Agua del río Daule cerca de la estación la Toma.
-

1.2 Justificación.

El Laboratorio de Ingeniería Civil de la FICT (ESPOL), no posee una metodología de laboratorio apropiada para el estudio de la sedimentación del agua. Se decidió tomar este tema de tesis, con el objetivo de establecer una metodología de ensayos en laboratorio y poder determinar la cantidad de floculante necesaria para una óptima sedimentación. De esta manera estamos contribuyendo con información que servirá para las siguientes generaciones de estudiantes, que se interesen por esta rama de la Ingeniería Civil en la ESPOL.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Generales.

El objetivo general de esta tesis es conocer el comportamiento del fenómeno de sedimentación. Para esto, es necesario tener una idea clara de los tipos de sedimentos que se encuentran en nuestro medio. La tesis evaluaría una metodología de ensayo de sedimentación apropiada que puede ser aplicada en laboratorio de la FICT.

1.3.2 Específicos.

- Determinar la concentración óptima de floculante, para acelerar el proceso de sedimentación.
-

- Realizar la curva de flujo de sólidos correspondiente a cada tipo de muestra estudiada.
- Determinar los parámetros necesarios, para poder diseñar los sedimentadores de acuerdo a cada tipo de sedimento analizado.
- Determinar la variación de la velocidad de sedimentación de los sólidos para cada tipo de muestra analizada y su incidencia en los parámetros de diseño.

1.4 Estructura de la Tesis.

La presente tesis, se encuentra estructurada en cinco capítulos, explicando tanto el fenómeno de sedimentación como sus proceso, y los diferentes casos que se estudio, de una manera didáctica para facilidad del lector.

El primer capítulo, trata de la introducción y justificación del porque de esta tesis, objetivos tantos generales como específicos. El capítulo dos abarca la teoría de sedimentación, desde que es la sedimentación y sus diferentes etapas en el proceso. También se habla de los tipos de sedimentadores y teoría sobre las columnas de sedimentación que es el principal estudio de esta tesis .

El capítulo tres, tiene que ver con los ensayos que se realizaron, y las diferentes metodologías que se utilizaron para cada tipo de muestra.

Adicionalmente, se muestra los gráficos de cada una de las concentraciones con sus respectivos flujos de sólidos y la dosis óptima de floculante necesario, con sus respectivas velocidades y otros parámetros que hemos considerado importantes de citar.

El cuarto capítulo establece una comparación, con los diferentes tipos de muestras, ya sea con o sin floculante. Se discute el aumento o disminución de la velocidad de sedimentación con la adición de floculante. También, se determina los parámetros de diseño para un sedimentador de acuerdo a los resultados de los ensayos. Finalmente el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones con el objetivo de mejorar el proceso de sedimentación en el agua.

CAPÍTULO 2.- REVISIÓN DE LA LITERATURA.



Foto de un Sedimentador típico de aguas residuales.



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

2.1 Teoría de la Sedimentación.

2.1.1 Conceptos Generales.

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido (Maldonado, 2002). La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios. La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye una de las operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación (Maldonado, 2002). Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan los términos de clarificación y espesamiento para designar, la sedimentación. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada de fondo.

Las partículas en suspensión se sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

2.1.2 Sedimentación de partículas discretas.

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída (Maldonado, 2002). Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

2.1.3 Sedimentación de partículas floculentas.

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas forma, tamaño, densidad sí cambian durante la caída.

2.1.4 Sedimentación por caída libre e interferida.

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno *caída libre* (Maldonado, 2002). En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina *depósito o caída interferida o sedimentación zonal*.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una *compresión o zona de compresión*. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

2.2 Expresiones de velocidad de sedimentación

2.2.1 Partículas discretas con caída libre.

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado en soluciones diluidas, puede describirse por medio de la mecánica clásica. En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación.

Imaginemos el caso de una partícula que se deja caer en el agua. Esta partícula estará sometida a dos fuerzas (figura 1): fuerza de flotación (F_F), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (F_G).

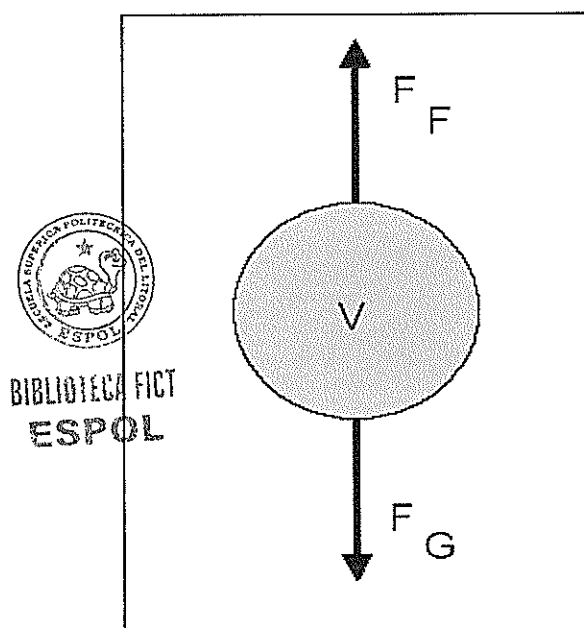


Figura 1. Fuerzas actuantes en una partícula.
FUENTE: Manual DTIAPA C-5, 1981.

$$\text{Si } F_F = \rho \cdot g \cdot V \quad (1)$$

$$\text{y } F_G = \rho_s \cdot g \cdot V \quad (2)$$

donde:

ρ = densidad del líquido.

ρ_s = densidad del sólido.

V = volumen de la partícula.

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g.V.(\rho_s - \rho) \quad (3)$$

donde:

F_i = Fuerza resultante o fuerza de impulsión.

Arrastrada por esta fuerza (F_i), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D.A.\rho.\frac{V_s^2}{2} \quad (4)$$

donde:

F_R = fuerza de rozamiento

$\frac{V_s^2}{2}$ = energía cinética

C_D = coeficiente de arrastre

A = área transversal al escurrimiento

V_s = velocidad de sedimentación

Después de un corto periodo, la aceleración pasa a ser nula y el valor de la fuerza de fricción (F_R) iguala a la de impulsión (F_i), momento en el cual la partícula adquiere una velocidad constante, conocida como *velocidad de asentamiento* o *sedimentación*. En ese momento se cumple que (3) y (4) son iguales; por lo tanto:



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

$$g.V(\rho_s - \rho) = C_D.A.\frac{V_s^2}{2} \quad (5)$$

Despejando el valor de V_s se obtiene

$$V_s = \sqrt{\frac{2.g}{C_D} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot \frac{V}{A}} \quad (6)$$

Para el caso de partículas esféricas:

$$A = \frac{\pi.d^2}{4} \quad \text{y} \quad V = \frac{\pi.d^3}{6}$$

Siendo d = diámetro de la partícula:

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi/6 \cdot d^3}{\pi/4 \cdot d^2} = \frac{2}{3} \cdot d$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot d} \quad (7)$$

En la cual:

V_s = velocidad de sedimentación.

d = diámetro de la partícula

g = aceleración de la gravedad

ρ_s = densidad de la partícula

ρ = densidad del fluido.

El coeficiente de arrastre de Newton es una función del Numero de Reynolds y de la forma de las partículas:

$$C_D = a.R_e^{-n} \quad (8)$$



$$\text{Siendo : } R_e = \frac{V_s \cdot d}{u} \quad (9)$$

a = constante específica

R_e = número de Reynolds

u = viscosidad cinemática (Stokes)

Si $d < 0,085$ mm, $Re < 1$, entonces prevalece flujo laminar, siendo:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad \text{y} \quad \frac{\rho_s}{\rho} = S_s$$

al reemplazar en la ecuación (7), se origina la ecuación de Stokes:

$$V_s = \frac{g}{18} \cdot (S_s - 1) \cdot \frac{d^2}{u} \quad (10)$$

Cuando $d > 1,0$ mm, $Re > 1.000$, presenta flujo turbulento, para lo cual:

$$C_D = 0.4$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (7), se obtiene una velocidad terminal de:

$$V_s = \sqrt{(3,3 \cdot g \cdot (S_s - 1) \cdot d)} \quad (11)$$

conocida como la ecuación de Newton, para la sedimentación de partículas discretas. Para los casos de diámetro de partículas comprendidas entre 0,85 y 1,0 mm y especialmente números de Reynolds de 1 a 1.000, se presenta flujo de transición para el cual los valores de C_D son variables y su determinación puede realizarse a través de cualquiera de las ecuaciones indicadas en la tabla 1.

TABLA 1.- Valores de coeficiente de arrastre

Autor	Expresión
Rich (1971)	$C_D = \frac{18,5}{Re^{0,60}}$
Hatch (1974)	$C_D = \frac{14}{Re^{0,50}}$
Allen (1976)	$C_D = \frac{12,65}{Re^{0,50}}$
Fair-Geyer-Okun (1979)	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$
Schiller Newman (1980)	$C_D = \frac{12}{Re} (1 + 0,14 Re^{0,687})$
Goldstein (1981)	$C_D = \frac{12}{Re} + \frac{3}{10} Re - \frac{19}{1.280} Re^2 + \frac{71}{20.480} Re^3$

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978).

Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos.

Fair, Geyer y Okun determinan la velocidad de sedimentación utilizando los ábacos de la figura 2 y figura 3, que tienen la ventaja de que permiten visualizar directamente y en forma simultánea distintas soluciones. Este método, que permite el cálculo directo, se aplica resolviendo las siguientes ecuaciones:

Término del diámetro (X_1):

$$\left[\frac{g.(S_s - 1)}{v^2} \right]^{1/3} .d = K_1 .d = X_1 \quad (12)$$



Término de velocidad (X_2):

$$\frac{V_s}{[g.(S_s - 1).v]^{1/3}} = \frac{V_s}{K_2} = X_2 \quad (13)$$

BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Se puede, entonces, representar K_1 y K_2 en función de la densidad relativa S_s y la temperatura, tal como se muestra en el gráfico de la figura 2.y figura 3. También se puede representar X_2 en función de X_1 , tal como se muestra en el gráfico de la figura 4.

El cálculo se realiza de la siguiente manera: Conociendo las características de las partículas y del agua, se obtiene K_1 y K_2 de la figura 2.y figura 3 Conociendo, por otra parte, $X_1 = K_1.d$, se entra al gráfico de la figura 4 y se obtiene X_2 , con lo cual se calcula $V_s = K_2.X_1$.

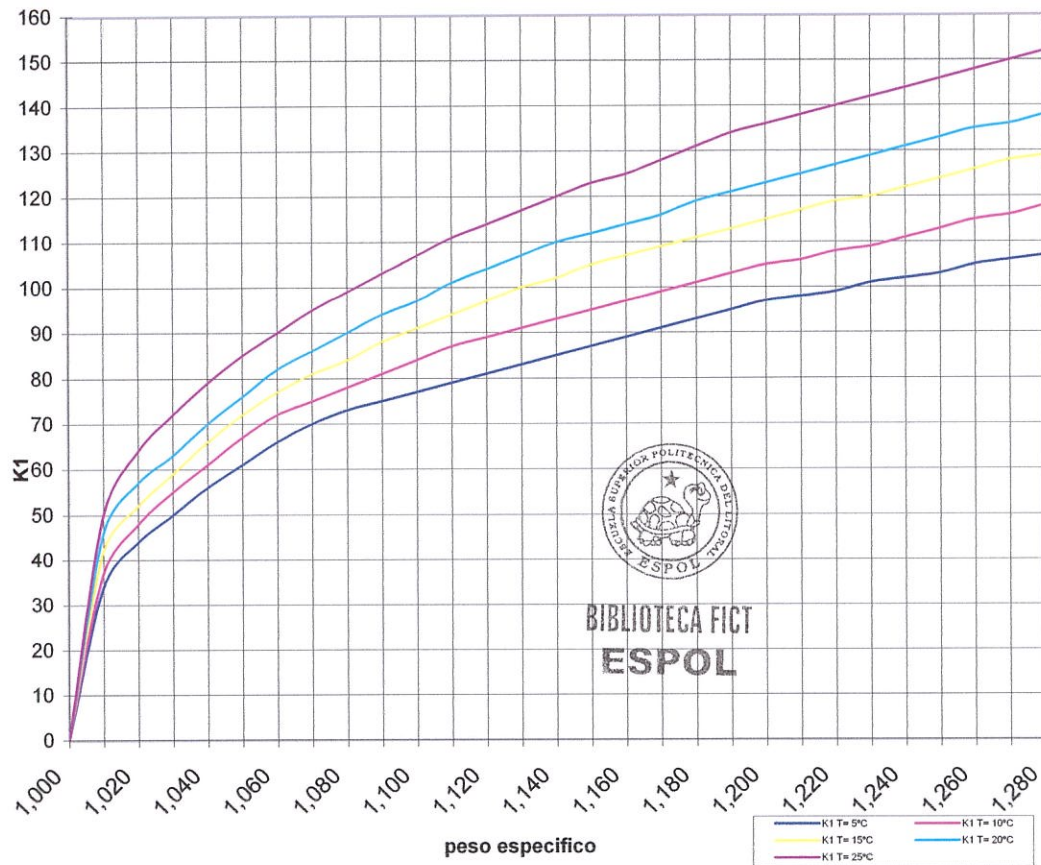


Figura 2 Velocidad de Asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático valores K_1 .

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

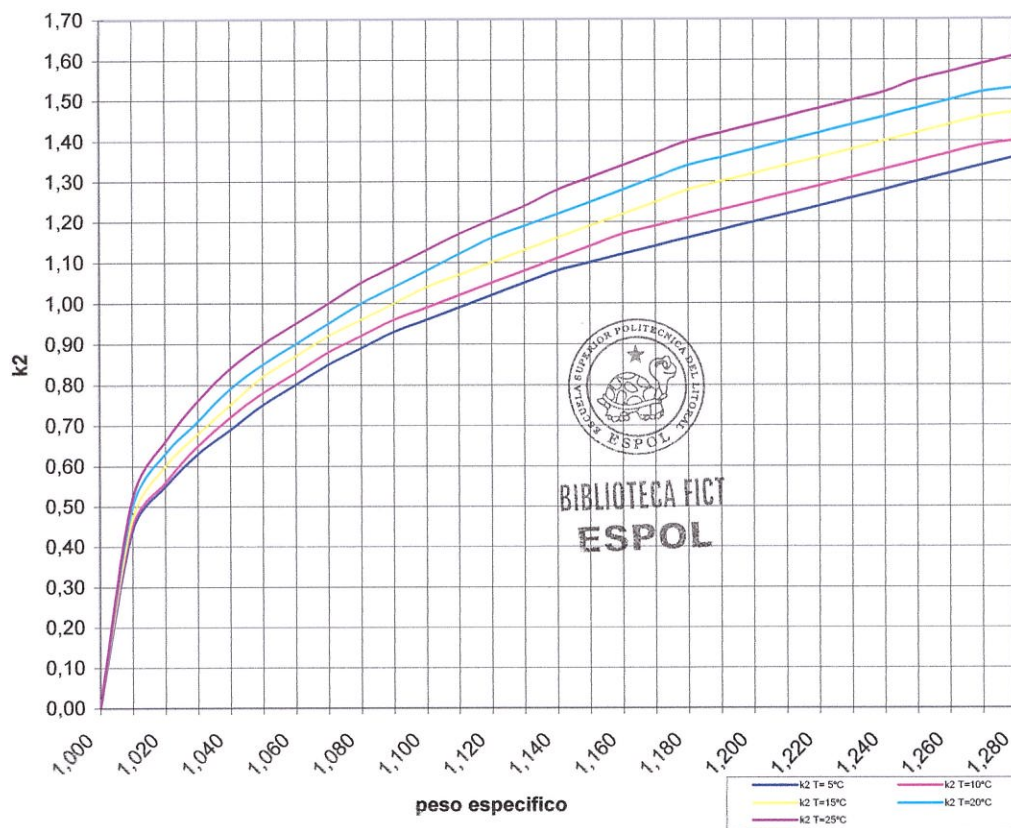


Figura 3 Velocidad de Asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático valores K_2 .

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

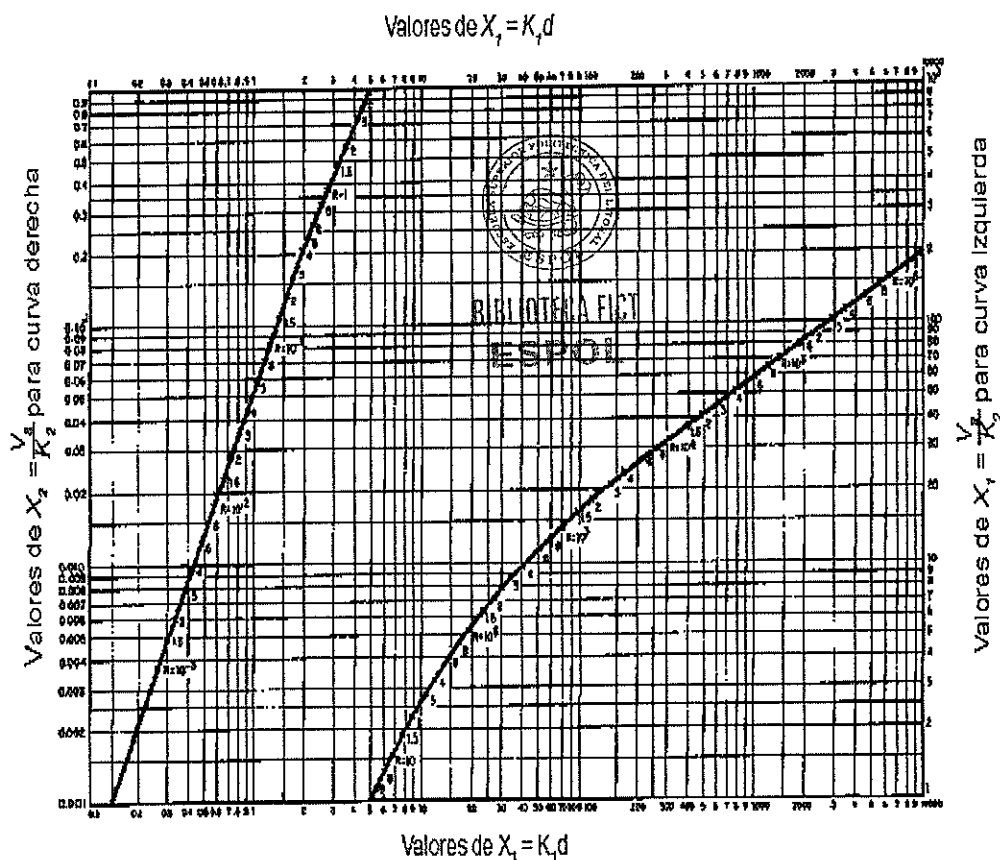


Figura 4 Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2$.

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

2.2.2 Sedimentación de partículas floculentas.

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos. Los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad.

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo (Maldonado, 2002). La densidad original de las partículas es cercana a 2,60. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de

origen vegetal con densidades variables de 1 a 1,5 dependiendo de su concentración (Maldonado, 2002). Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal y es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño o densidad antes del proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1,03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1,20. El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la figura 5.

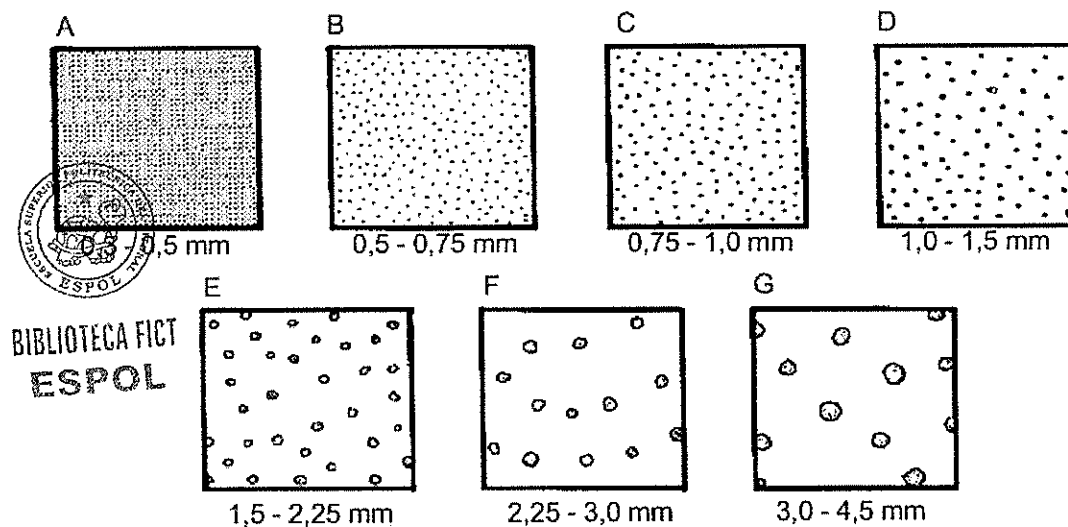


Figura 5 Índices de Willcomb para determinar el tamaño del floculo.
 FUENTE: Degremont. *Manual técnico del agua*. Degremont, (1973).

Sedimentación de partículas floculentas con caída interferida. En bajas concentraciones de partículas, estas sedimentan o decantan libremente; en cambio, con alta concentración de partículas floculentas (superiores a 500 mg/L), las partículas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre los floculos y el líquido que sobrenada y esto da origen al fenómeno de sedimentación conocido con los nombres de decantación interferida o zonal. Klinch establece las hipótesis fundamentales para la decantación interferida, en la cual la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de la concentración de las partículas.

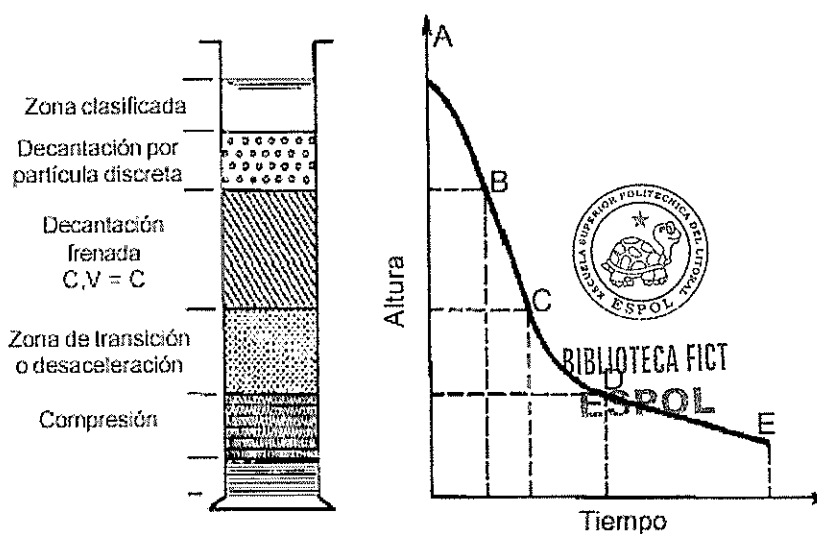


Figura 6. Decantación por caída interferida.

FUENTE: Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968..

Al llenar una columna de sedimentación de altura y diámetro adecuados con una suspensión floculenta de elevada concentración, se tiene inicialmente una concentración uniforme en toda la altura de la columna (ho). En diferentes tiempos se mide la altura de la capa superior de los lodos y se obtiene una curva tal como la que aparece en la figura 6, que tiene los siguientes rasgos:

- *Zona A-B.* La superficie de separación es muy definida. Esta es una fase de coalescencia de los flóculos seguida de una zona muy pequeña de decantación libre (en la mayoría de casos, esta primera zona no se produce). (Maldonado, 2002).

- *Zona B-C.* Tiene una pendiente rectilínea. Corresponde a una velocidad de caída constante definida únicamente por el tipo de floculación y la concentración de las partículas (Maldonado, 2002). Al incrementarse la concentración inicial de las partículas disminuye la velocidad. A esta zona se la denomina *decantación frenada* (Maldonado, 2002).
- *Zona C-D.* En esta zona se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída. Se denomina *zona de desaceleración o transición* (Maldonado, 2002).

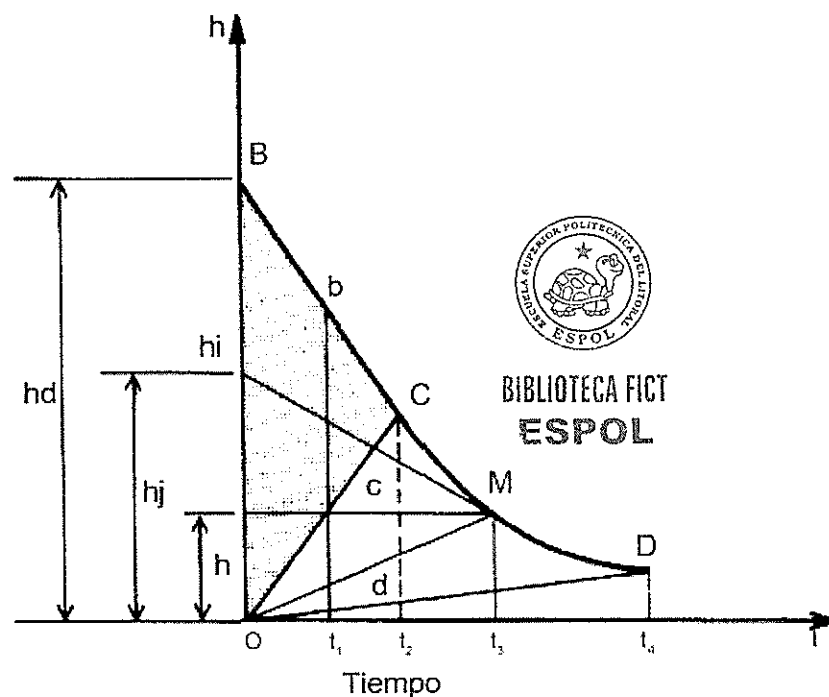


Figura 7.- Análisis de la curva de sedimentación interferida.
FUENTE: Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968..

- *Zona D-E.* En esta zona los flóculos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, puesto que están soportados por estas. Se le llama *zona de compresión* (Maldonado, 2002).

Si consideramos, por simplicidad, que al sedimentarse una suspensión concentrada no se produce la primera zona, se obtienen las alturas de separación de interfase como se indica en la figura 7.

En el triángulo BOC, la concentración y la velocidad de caída son constantes e iguales, respectivamente, a los valores iniciales en B.

En el triángulo COD, las curvas de equiconcentración son rectas que pasan por el origen, lo que significa que, desde los primeros momentos de la sedimentación, las capas más próximas al fondo se tocan y pasan por todas las concentraciones comprendidas entre la concentración inicial y la concentración al punto D, principio de la compresión.

2.3 Factores que influyen en el proceso de sedimentación.

2.3.1 Calidad del Agua.

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para

partículas floculentas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades de tratamiento.

Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 8 (a).. En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso, que aparece indicado en la figura 8 (b).

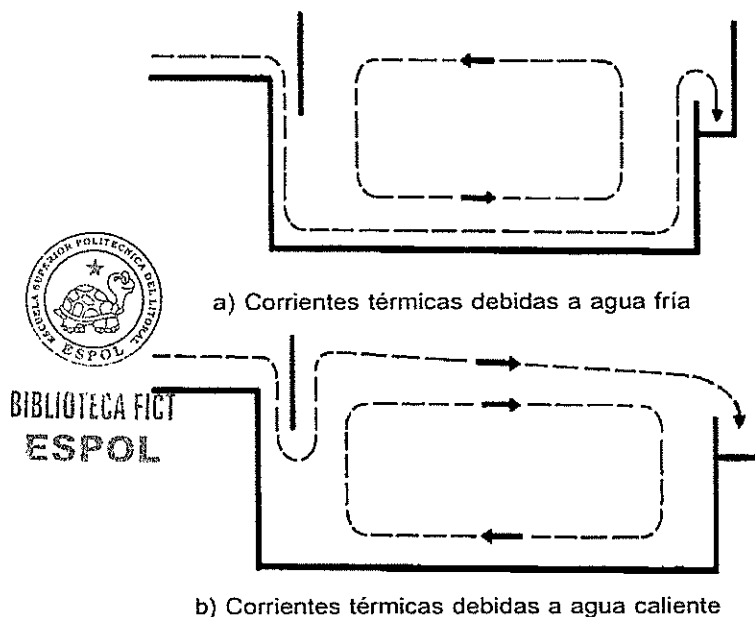


Figura 8. Influencia de las corrientes térmicas en los procesos de sedimentación.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados (Maldonado, 2002).

2.3.2 Condiciones hidráulicas.

Los criterios y parámetros hidráulicos de diseño tienen gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores o decantadores. A continuación se detallan los principales:

a) En la zona de sedimentación

En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Fraude (ver anexos, Pág. 180) más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria. Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece (Maldonado, 2002).

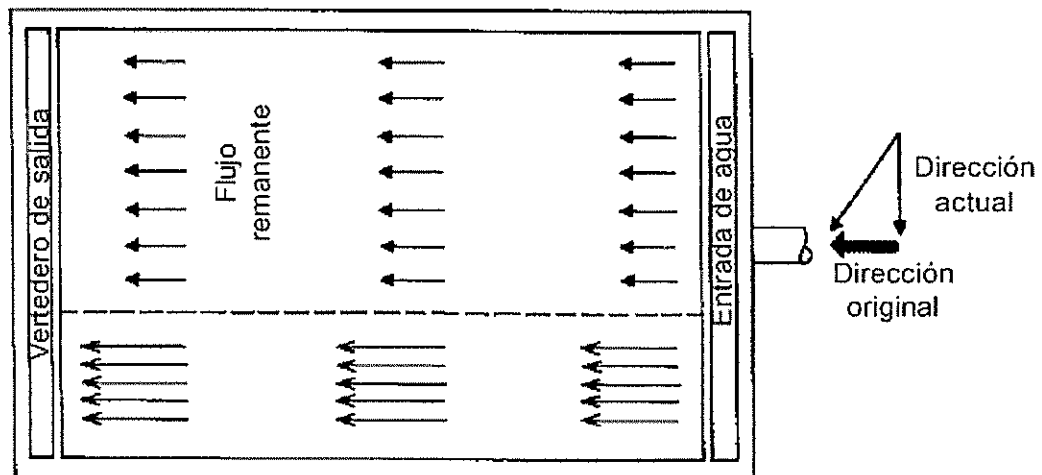
b) En la zona de entrada

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo

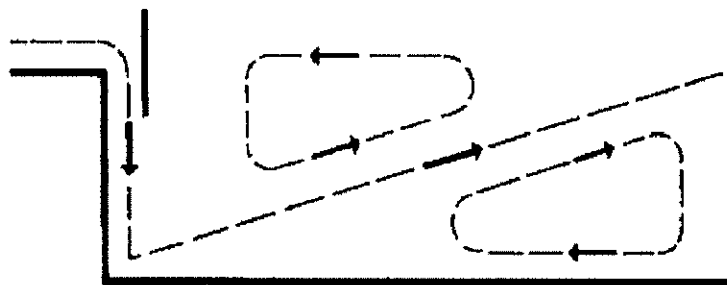
horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad (Maldonado, 2002).

Las alteraciones del flujo en la zona de entrada deben evitarse y su presencia puede deberse a una velocidad excesiva del flujo en la entrada del sedimentador, o a que los orificios de ingreso sean muy grandes y el movimiento de las paletas del floculador sea tal que comunica demasiada energía al flujo. Al no haber disipación de esta energía en el tabique divisorio (caso de unidades convencionales de flujo horizontal), las masas de agua entran con diferente gradiente de velocidad, creando turbulencias que pueden extenderse dentro de la zona de sedimentación (Maldonado, 2002).

Similarmente, puede mencionarse como causa de corrientes cinéticas la distribución desigual del flujo en la entrada del sedimentador (orificios de distintos diámetros o algunos parcialmente obstruidos), la existencia de tabiques que dejan pasar el agua solamente por el fondo, vertederos, etcétera, lo que produce corrientes como las indicadas en la figura 9 y que adicionalmente modifican el tiempo de retención (Maldonado, 2002).



a) Planta - Cortocircuito



b) Corte longitudinal - Cortocircuito y espacios muertos

Figura 9. Corrientes Cinéticas.

FUENTE: Water and wastewater engineering.(1968).

c) En la zona de salida

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente.

Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriadamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

En la figura 10 se esquematizan las modificaciones normales de las líneas de flujo debido a las estructuras de la zona de salida.

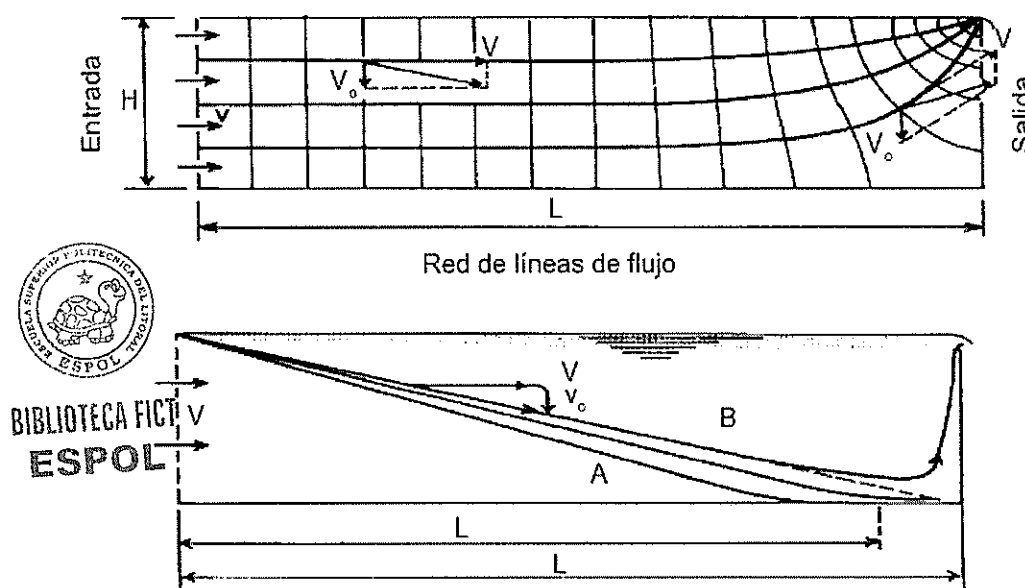


Figura 10. Efecto de la zona de salida en las líneas de flujo.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.3.3 Factores externos.

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación, acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales, son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador. Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores (Maldonado, 2002). Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al

soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua.

2.4 Clasificación de Sedimentadores.

La sedimentación o la decantación se realizan en reactores denominados *sedimentadores* o *decantadores*, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva en cada unidad. La clasificación más recomendable es la siguiente:

- Sedimentadores o decantadores estáticos
- Decantadores dinámicos
- Decantadores laminares.

2.4.1 Sedimentadores y decantadores estáticos.

Criterios generales.

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición.

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad V_H constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido (V_H) y su propia velocidad de sedimentación (V_S). Véase la figura 11.

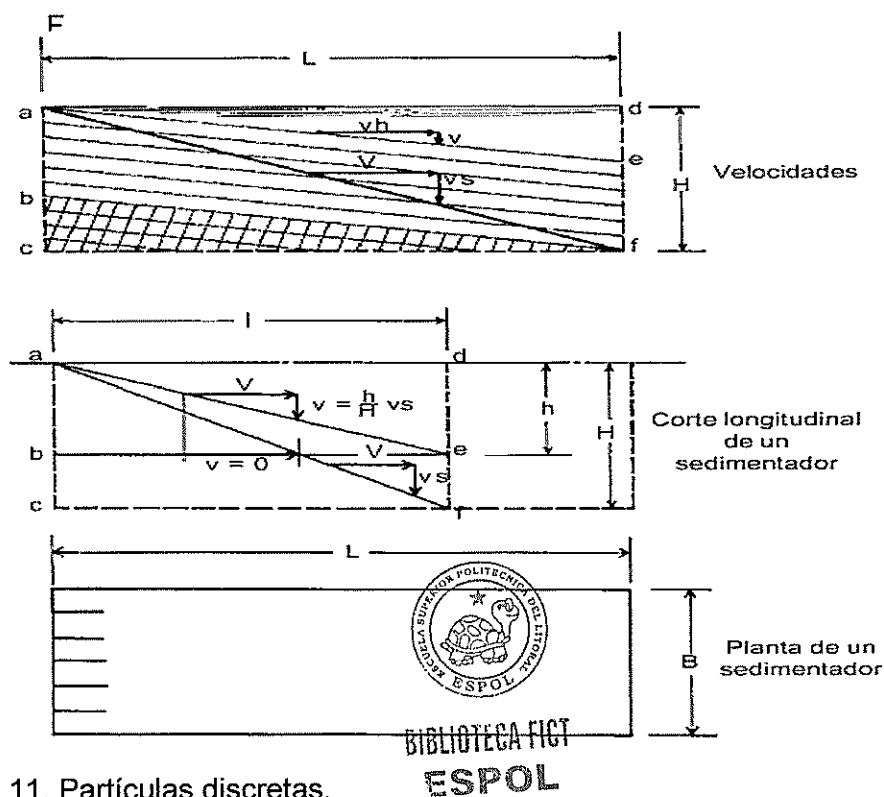


Figura 11. Partículas discretas.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

En un sedimentador ideal de forma rectangular y con flujo horizontal, la resultante será una línea recta. Asimismo, otras partículas discretas se moverán en lugares geométricos paralelos. Estableciendo semejanzas entre los triángulos formados por las velocidades y las dimensiones del decantador, donde (L) es la longitud y (H) la altura, se obtiene:

$$\frac{V_H}{V_S} = \frac{L}{H} \quad (14)$$

Como la partícula tiene movimiento uniforme:

$$V_S = \frac{H}{T_o} \quad (15)$$

Si T_0 es el tiempo de retención:

$$T_0 = \frac{V}{Q} \quad (16)$$

Donde V = volumen de la unidad

Se obtendrá:

$$V_s = \frac{H}{V/Q} = \frac{Q}{V/H} \quad (17)$$

Pero como $\frac{V}{H} = A_s$, por lo tanto:

$$V_s = \frac{Q}{A_s} \quad (18)$$

Este criterio sirve exclusivamente para explicar la teoría básica de la clarificación y es útil para diseñar ciertos tipos de sedimentadores y desarenadores.

Componentes de un sedimentador.

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas:

- Zona de entrada y distribución de agua
- Zona de sedimentación propiamente dicha
- Zona de salida o recolección de agua
- Zona de depósito de lodos.

En la figura 12 se esquematizan las diferentes zonas de un sedimentador o decantador.

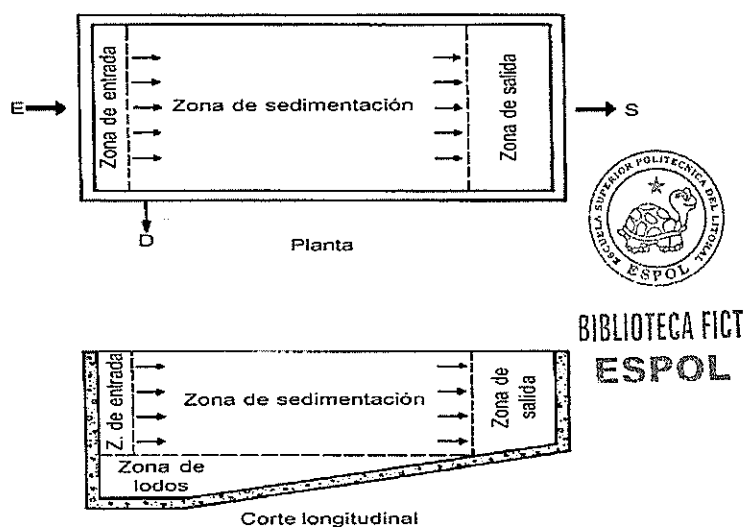


Figura 12. Zonificación de un sedimentador.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Tipo de Unidades.

Desarenadores. Los desarenadores tienen por objeto remover del agua cruda la arena y las partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente y la interferencia en los procesos de coagulación floculación. El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 milímetros. Una granulometría inferior corresponde a los procesos de presedimentación o sedimentación. El estudio teórico del desarenado está relacionado con el de los fenómenos de sedimentación en caída libre. Al estudiar la ubicación de una captación, debe evitarse al máximo el arrastre de arena, diseñando

este tipo de unidades cuando la calidad de agua así lo exige. En el caso particular de que se incluya en la instalación un presedimentador, se podrán eliminar en el desarenador solamente partículas de dimensiones superiores a 0,3 milímetros de diámetro. Si la instalación incluye tamizado o microcernido (con mallas de 1 a 2 milímetros, por ejemplo), deberá efectuarse un desarenado previo para evitar problemas en los tamices. Generalmente, los desarenadores tienen forma rectangular, como se muestra en la figura 13 (Maldonado, 2002).

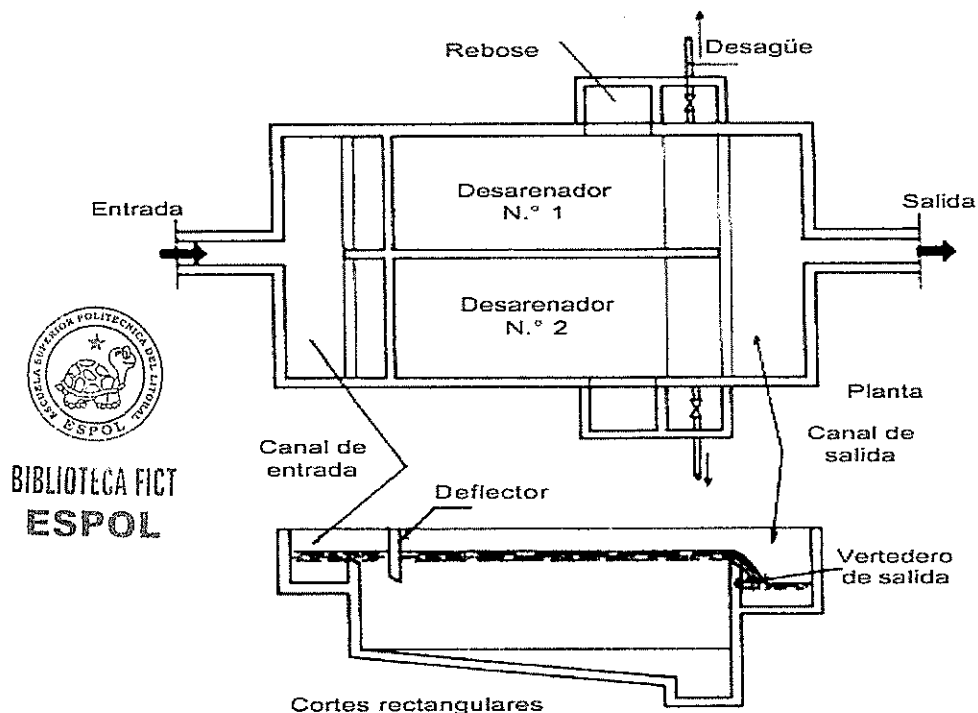


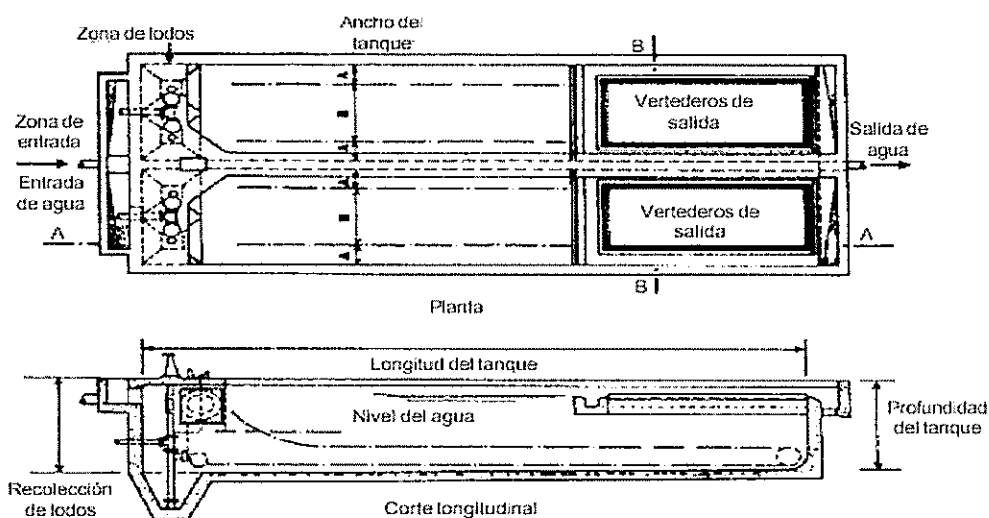
Figura 13. Desarenador Rectangular.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

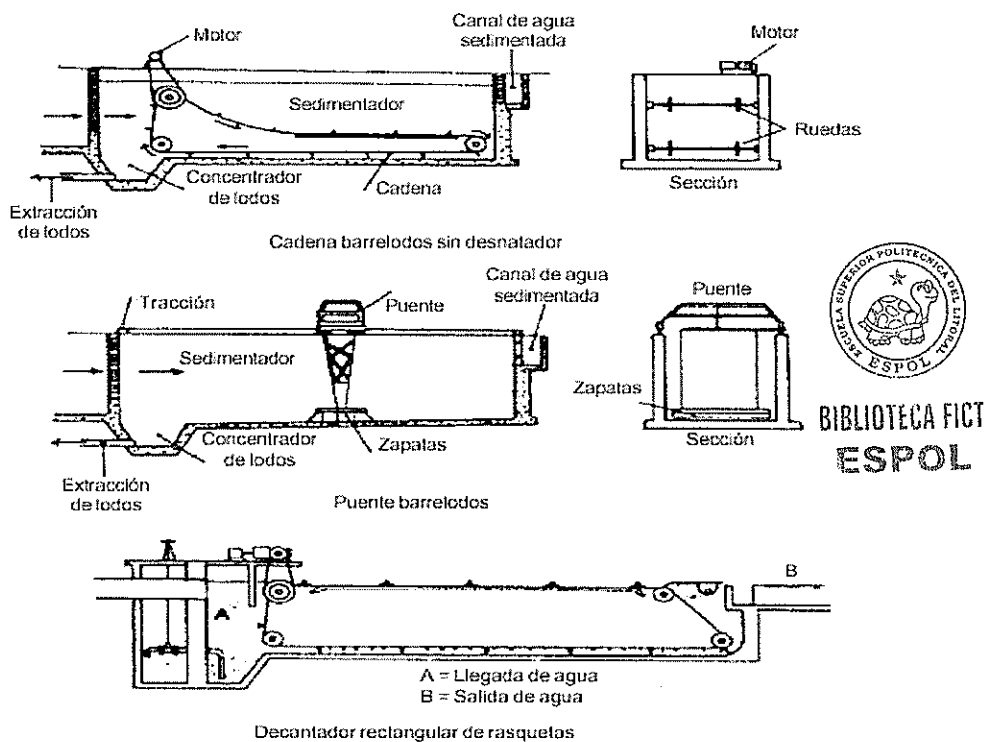
Unidades de flujo horizontal. Estos sedimentadores se clasifican, de acuerdo con la forma de su planta, en rectangulares, circulares y

cuadrados. Los decantadores o sedimentadores rectangulares tienen la forma y características detalladas en la figura 14, con la ventaja de que permiten una implantación más compacta, aunque su costo es más elevado. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros.

Los sedimentadores o decantadores de forma circular o cuadrada (figura 15) disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro de la unidad. Están provistos generalmente de una pantalla deflectora que desvía el agua hacia el fondo de la unidad. El flujo en la zona de sedimentación es horizontal.



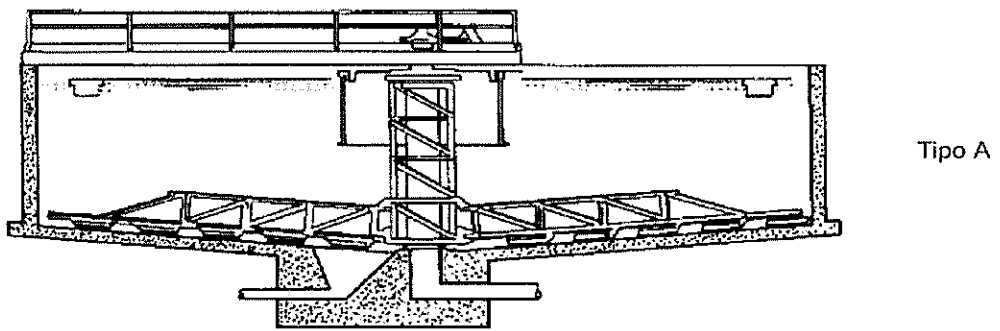
a) Sedimentadores horizontales de forma rectangular



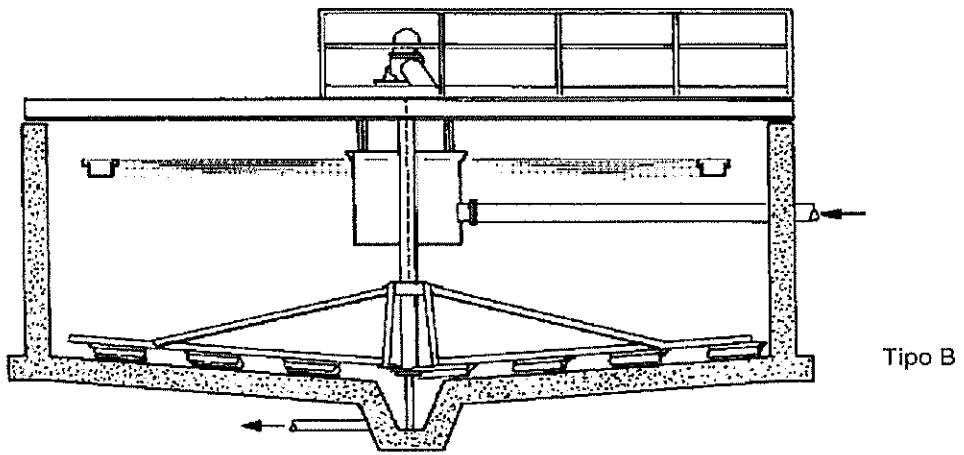
b) Sistemas de remoción de lodos en sedimentadores rectangulares

Figura 14. Sedimentadores o decantadores estáticos rectangulares

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

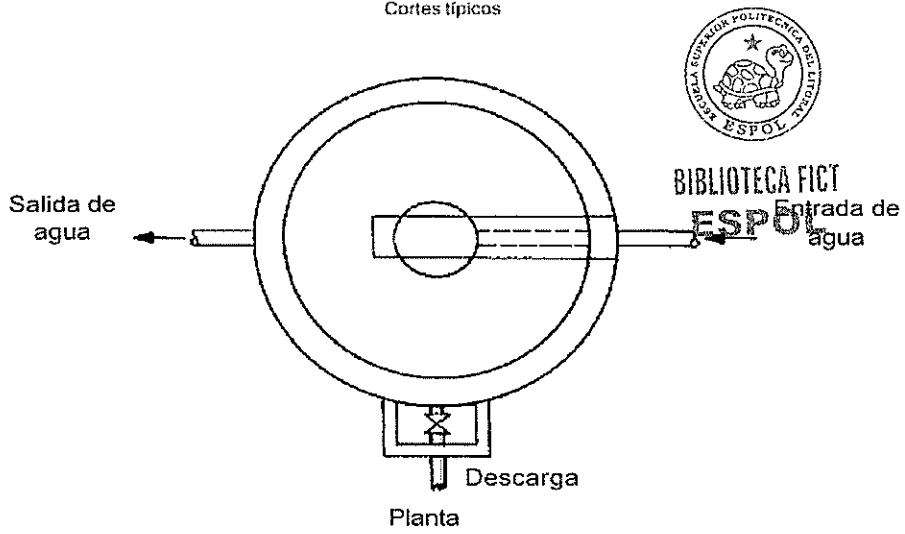


Tipo A



Tipo B

Cortes típicos



Planta

Figura 15. Sedimentadores o decantadores estáticos circulares.
 FUENTE: Water and wastewater engineering, (1968).

Están provistos de canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada. El fondo es inclinado hacia el centro de la unidad, donde se ubica un sumidero para la recolección de lodos. La profundidad normal de estas unidades está comprendida entre 2,00 y 3,50 metros.

En los diferentes tipos de unidades de flujo horizontal, la remoción de los lodos o sedimentos puede hacerse en forma intermitente o continua. Se usa el sistema de remoción intermitente de lodos en pequeñas instalaciones o cuando se trata un agua relativamente clara. Es necesario vaciar el tanque cada cierto tiempo y extraer los lodos manualmente, con la ayuda de mangueras de agua a presión. Usualmente, los sedimentos se compactan y transforman en una masa pastosa que resbala muy difícilmente; se requieren pendientes de 45° a 60° en el fondo de los tanques. El tamaño de la zona de lodos dependerá del periodo de funcionamiento del sedimentador y de la cantidad de lodos producidos. Para la remoción continua de lodos, se utilizan sistemas mecánicos denominados *barrelodos*. En la figura 14 se detallan los tipos más usuales de sistemas de barrido de lodos de sedimentadores rectangulares: cadenas con paletas (con y sin desnatador) y puente con sistema de palas o de succión. En la figura 15 se indican los sistemas de barrido de lodos utilizados en sedimentadores o decantadores circulares o cuadrados (Maldonado, 2002).

Unidades de flujo vertical. Estas unidades tienen forma cilíndrica (figura 16). La entrada del agua cruda se realiza por el centro de la unidad en forma descendente. En la parte inferior está ubicada la zona de lodos, que tiene forma cónica con pendiente de 45° a 60° , según la naturaleza del agua y el tratamiento aplicado. La recolección del agua sedimentada se realiza en la parte periférica superior de la unidad.

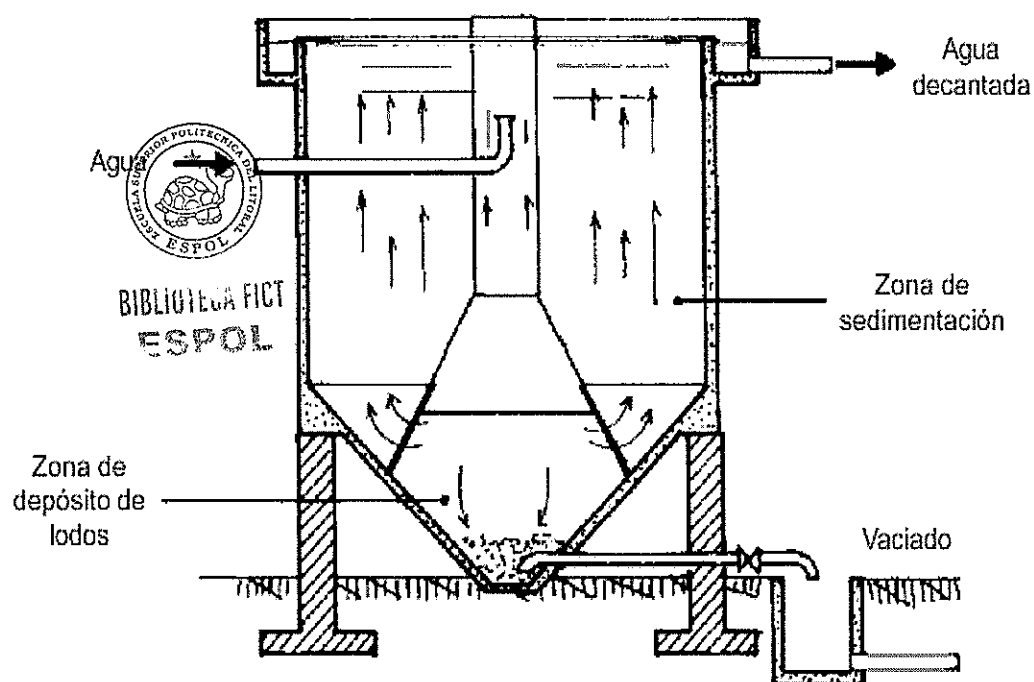


Figura 16. Sedimentador estático de flujo vertical.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Unidades de flujo helicoidal. Para tratar aguas con alto contenido de materiales en suspensión o flóculos con alta velocidad de sedimentación,

se recurre al uso de sedimentadores de flujo helicoidal. Estas unidades tienen forma circular (figura 17). El flujo tangencial se logra mediante la combinación de una tubería y canales periféricos con orificios de entrada de agua. Los orificios son dimensionales y se disponen espaciados para permitir una distribución uniforme del agua en el sedimentador. El canal recolector de agua sedimentada está ubicado en el centro del sedimentador o en la periferia. Generalmente, una pantalla vertical contribuye a lograr una mejor distribución y a evitar cortocircuitos. Es muy importante tener en cuenta que se trata de unidades poco conocidas y, por ende, existe una carencia de datos operacionales fidedignos.

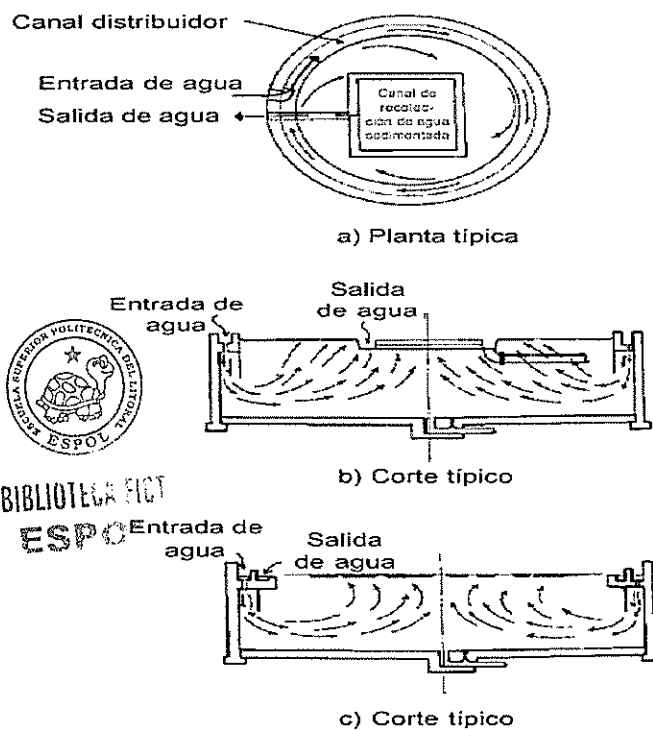


Figura 17. Sedimentador Estático de Flujo Helicoidal.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.2 Decantadores dinámicos.

Criterios Generales.

La teoría de la decantación interferida se aplica a este tipo de unidades. Se requiere una alta concentración de partículas para incrementar las posibilidades de contacto en un manto de lodos que tiene una concentración de partículas de 10 a 20% en volumen. En el proceso, el flóculo no conserva su peso específico, su tamaño ni su forma constante. Las partículas pequeñas que entran por el fondo son arrastradas por el flujo. Al chocar estas con otras, incrementan su tamaño de acuerdo con la ecuación de Von Smoluchowski. Se entiende que en la zona del manto de lodos se promueve la floculación y en la parte superior a ella ocurre la decantación (Maldonado, 2002).

La eficiencia de los decantadores de manto de lodos depende del tipo y la dosis de coagulante, del uso de polímeros, de la calidad del agua cruda, del tamaño de las unidades (la eficiencia es inversamente proporcional al tamaño), de la profundidad y concentración del manto de lodos y, principalmente, de la carga superficial.

2.4.3 Componentes de una unidad.

Una unidad de manto de lodos consta básicamente de los siguientes componentes (figura 18):

- 1) Sistema de entrada de agua
- 2) Zona de formación del manto de lodos
- 3) Zona de clarificación
- 4) Sistema de recolección de agua clarificada.
- 5) Zona de concentración de lodos.

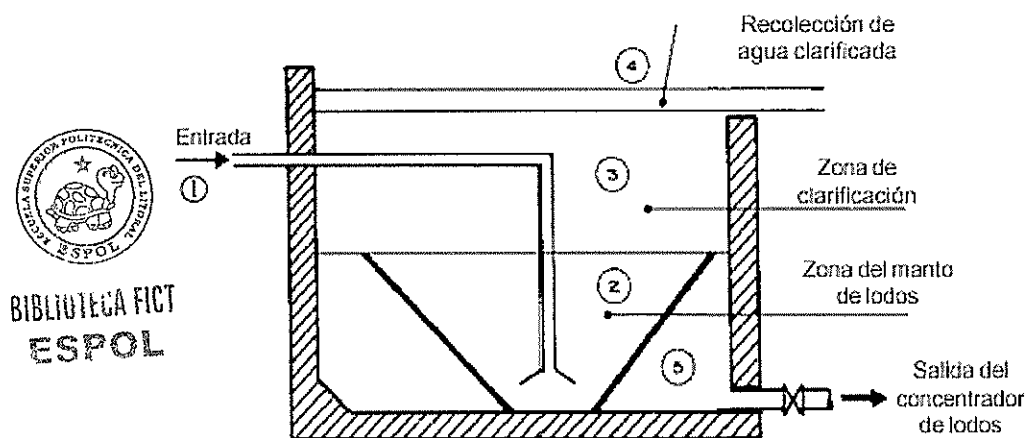


Figura 18. Componentes de un Clarificadores de Manto de Lodos.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.4 Tipos de Unidades Dinámicas.

Los decantadores de manto de lodos se pueden clasificar de acuerdo con las condiciones y características de la zona de formación de lodos, que se resumen en la siguiente tabla.

TABLA 2. Características de decantadores de manto de lodos

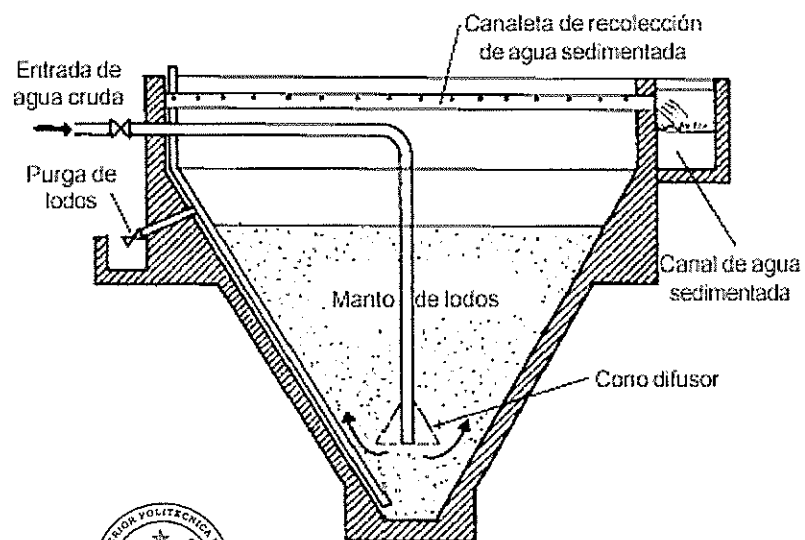


Tipo de suspensión	Mezcla de lodos	Control de la altura del manto de lodos	Tipo de flujo
Hidráulica	Sin recirculación	Con vertedero	Constante Pulsante
	Sin recirculación	Sin vertedero	
Mecánicos	Con recirculación	Con vertedero	Constante con Separación dinámica Constante con agitación
	Con recirculación	Sin vertedero	

FUENTE: Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Manual III Teoría, tomo 11, *Sedimentación*. Serie Filtración Rápida, 1992.

A continuación se describen algunos de los tipos principales de unidades.

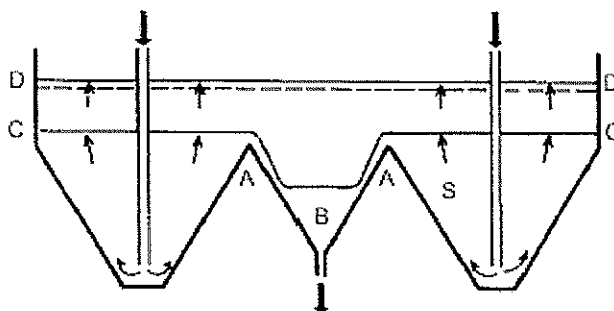
Unidades de manto de lodos con suspensión hidráulica. Estas unidades fueron las primeras que se construyeron. Consisten esencialmente en un tanque de fondo cónico o tronco piramidal, en cuya parte inferior se inyecta el agua cruda que asciende disminuyendo la velocidad a medida que el área aumenta y manteniendo así un manto de lodos hidráulicamente suspendido .Figura 19..



Clarificador con fondo cónico



BIBLIOTECA FICT
ESPOL



Sedimentador de Bacchus Marsh

Figura 19. Decantadores de manto de lodos.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Los lodos se extraen periódicamente por un tubo que baja hasta el fondo. Esta extracción puede ser hecha en forma manual o automática. La entrada del agua puede hacerse inyectando el flujo directamente en el fondo para que se produzca turbulencia al chocar contra las paredes del fondo. Para obtener un buen rendimiento, debe prestarse especial atención a la forma de entrada del agua. Excesiva turbulencia puede producir perturbaciones que afectan todo el manto de lodos. La ventaja de estas unidades es que no son patentadas; no tienen, por lo general, ninguna pieza móvil dentro del tanque ni requieren energía eléctrica para su funcionamiento (Maldonado, 2002).

Algunos proyectistas prefieren utilizar vertederos en la parte superior para el control de la altura del manto de lodos, de modo que se viertan en un concentrador lateral. Unidades de manto de lodos con suspensión mecánica. Las unidades que usan sistemas mecánicos para mantener el manto de lodos en suspensión pueden ser, en general, de tres clases:

a) Unidades de manto de lodos con agitación simple

Las unidades de agitación simple consisten en tanques por lo general circulares, en los cuales al agua es inyectada por abajo, de tal forma que se distribuya en el fondo. Un agitador mecánico que gira lentamente en el fondo, movido por un motor o por agua a presión, mantiene las partículas

en suspensión y recolecta los lodos en un concentrador, de donde son removidos periódicamente (figura 20) (Maldonado, 2002).

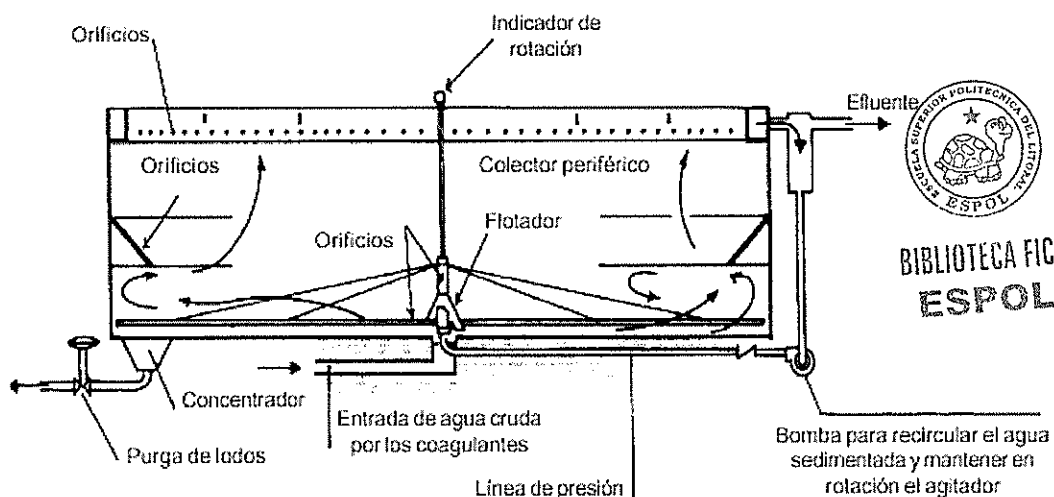


Figura 20. Unidad de Manto de Lodos con Agitación Simple.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

El agua tiene que ascender hasta las canaletas periféricas superiores y se filtra a través del manto de lodos. En estas unidades no existe recirculación de lodos.

b) Unidades de manto de lodos con separación dinámica

Las unidades que emplean separación dinámica utilizan una turbina que gira a alta velocidad, colocada en el centro del tanque, la cual impulsa el flujo hacia abajo a través del orificio periférico, de forma tal que las partículas que descienden empujadas por la energía mecánica de la turbina choquen con las que ascienden con el flujo del tanque (Maldonado, 2002).

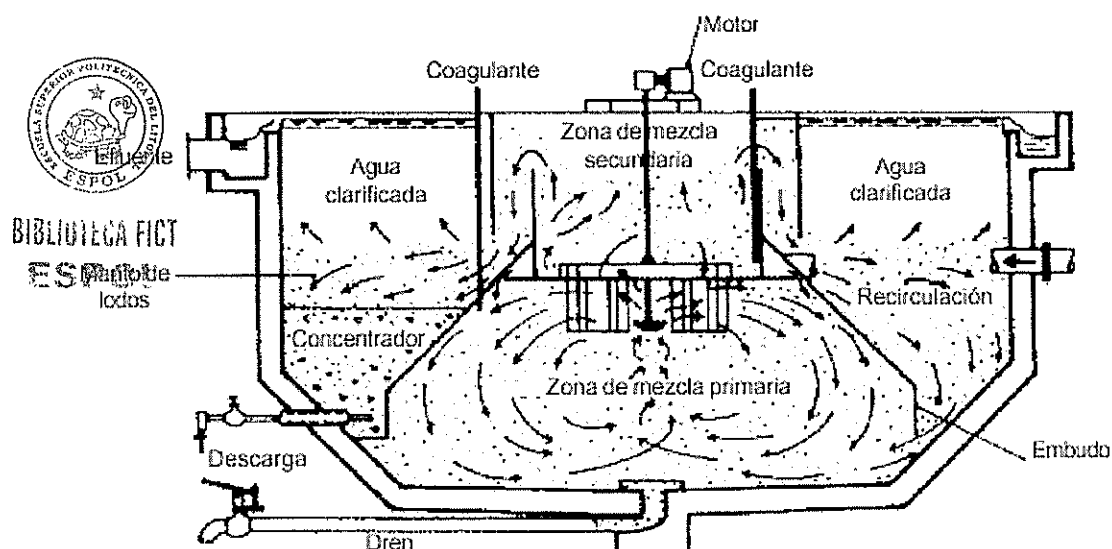


Figura 21. Unidades de separación dinámica Acclerator Infilco.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: una primera zona de mezcla y reacción en la parte interior, donde se inyectan los coagulantes; una segunda zona de mezcla lenta o floculación; una tercera zona donde se establece el manto de lodos y, por último, una cuarta zona en la que se produce la decantación y el agua clarificada sube hasta las canaletas de salida. Los lodos son recogidos en el concentrador en un sector del tanque y extraídos automáticamente cada cierto tiempo según la turbiedad del agua cruda (figuras 22 a 23) (Maldonado, 2002).

En el decantador de Brno (Checoslovaquia) el manto de lodos queda suspendido hidráulicamente en las secciones tronco-piramidales laterales, si bien dicho decantador tiene un sistema de floculación separado del de

sedimentación; además, tiene una serie de vertederos sumergidos para controlar la altura del manto. El lodo que cae es recogido en los concentradores inferiores y extraído periódicamente.

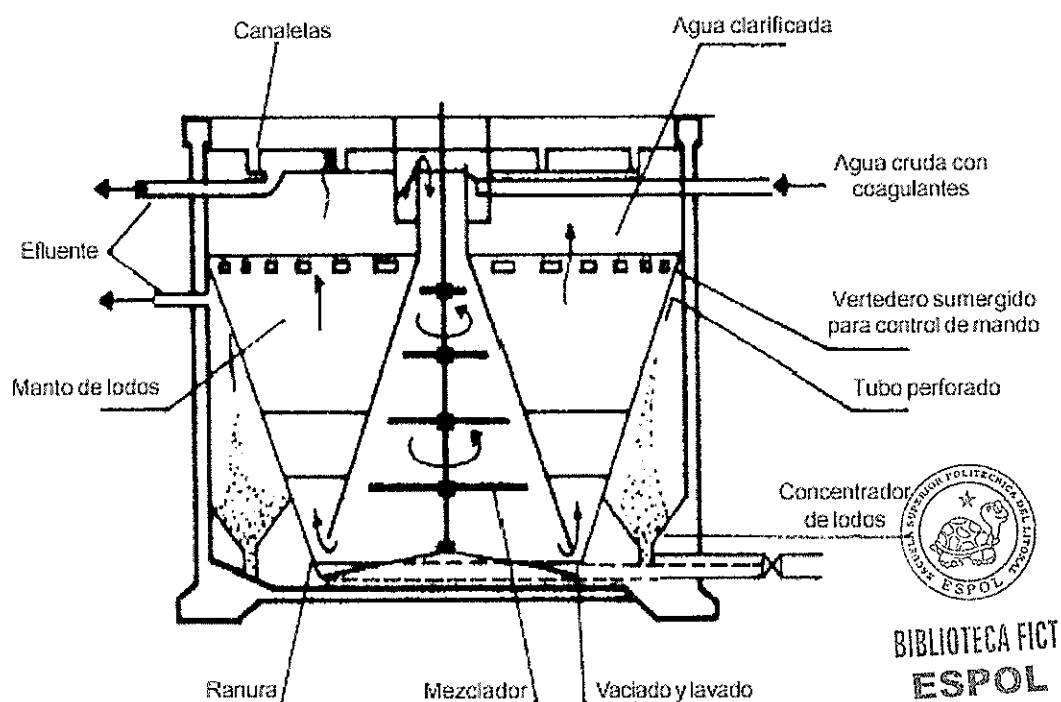
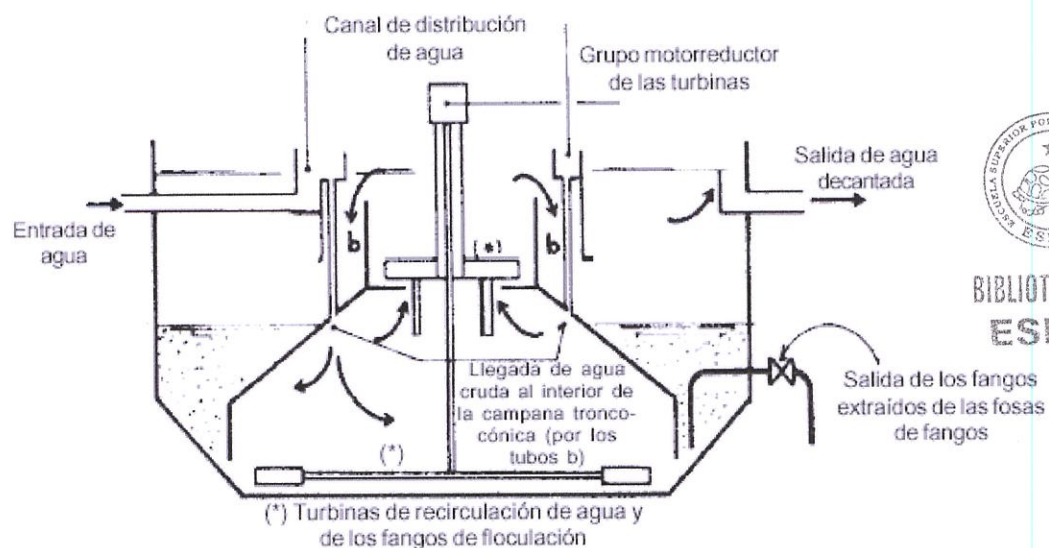


Figura 22. Unidades de separación dinámica Decantador de Brno (Checoslovaquia).

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Similar solución se utiliza en el decantador con circulación de lodos Aquazur B de Degremont, que dispone de una zona central de floculación rodeada por una zona de decantación. Ambas zonas se comunican por arriba y por abajo. El agua cruda llega por un canal circular situado alrededor de la columna central de mezcla. Una turbina situada en la parte

superior de la zona de floculación hace que el agua floculada pase a la zona de decantación.



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Figura 23. Unidades de separación dinámica Decantador Aquazur-B.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

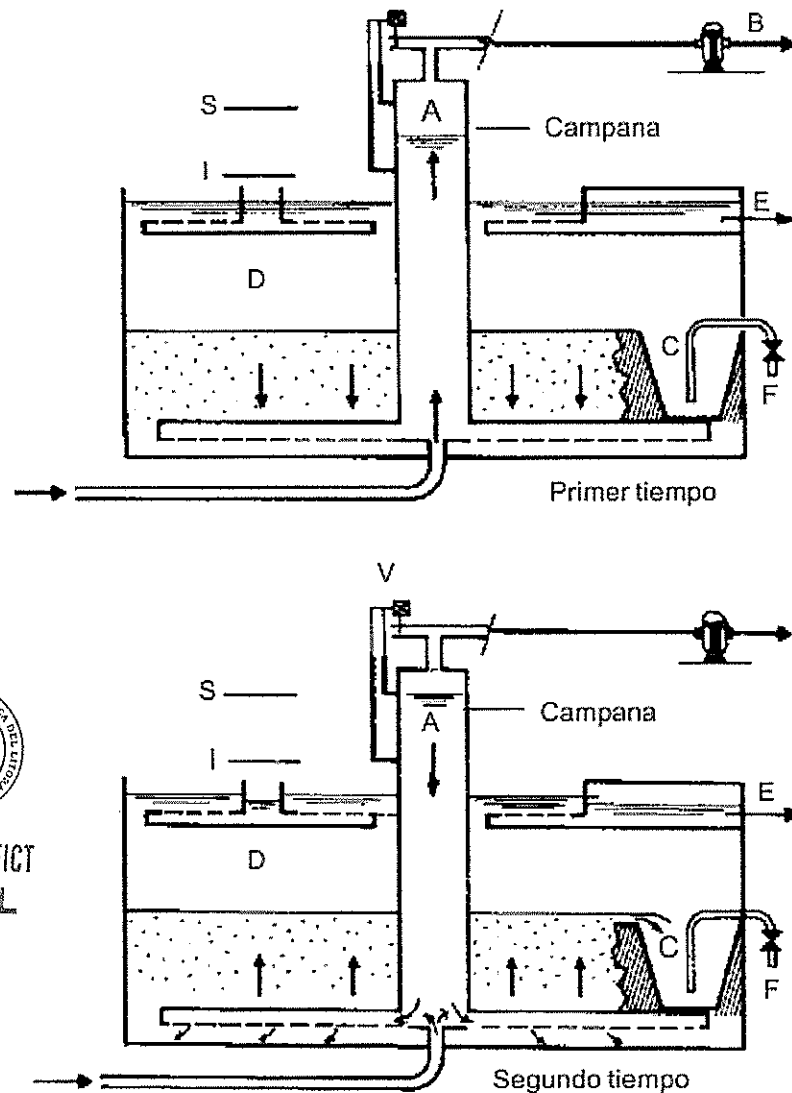
Los lodos que sedimentan en esta última vuelven, por gravedad, a la zona central. Se produce así un enriquecimiento del lodo, con el que se consigue una floculación rápida y la formación de un precipitado denso. Eventualmente, un agitador de fondo evita la acumulación de sedimentos pesados, que podrían atascar el aparato. Por medio de una o varias tolvas, puede extraerse el exceso de lodos en la forma más concentrada posible (Maldonado, 2002).

c) Unidad de manto de lodos pulsante o de vacío

Este tipo de unidades consiste esencialmente en un tanque cuadrado o circular, en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío, en la cual periódicamente se disminuye la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda por la campana hasta un cierto nivel y luego se descargue en el tanque y se produzca la expansión de los lodos y se bote el exceso de estos a los concentradores. Esta periódica expansión y contracción del manto se usa para homogeneizarlo. Se evitan las grietas o canales que permiten el paso directo de la turbiedad y la sedimentación de las partículas más pesadas en el fondo de la unidad.

El sistema requiere, por lo tanto, dos tiempos (figura 24). En el primero, la válvula de aire V se encuentra cerrada. El flujo asciende por la campana A, mientras que el agua en el decantador D permanece en reposo, de manera que puede decantar. En el segundo tiempo, al alcanzar el agua el nivel Sen la campana , la válvula de aire V se abre y el agua de la campana penetra en el decantador D. Entonces, los lodos se elevan con el flujo y el exceso penetra en el concentrador C (Maldonado, 2002).

El agua decantada se recoge en E. Cuando el flujo alcanza el nivel I en la campana A, se cierra la válvula V. Los fangos depositados en el concentrador se extraen automáticamente por medio de válvulas F.




 BIBLIOTECA FICT
 ESPOL

Figura 24. Decantador de Manto de lodos Tipo Pulsante.
 FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.5 Decantadores laminares.

Teoría de la Sedimentación Laminar.

Como se analizó anteriormente, la eficiencia de los decantadores clásicos de flujo horizontal depende, principalmente, del área. De este modo, si se introduce un piso intermedio a una altura (h) a partir de la superficie, las partículas con una velocidad de sedimentación $V_{sb} < V_{sc}$ serían removidas, como lo demuestra la figura 25, cosa que antes no ocurría.

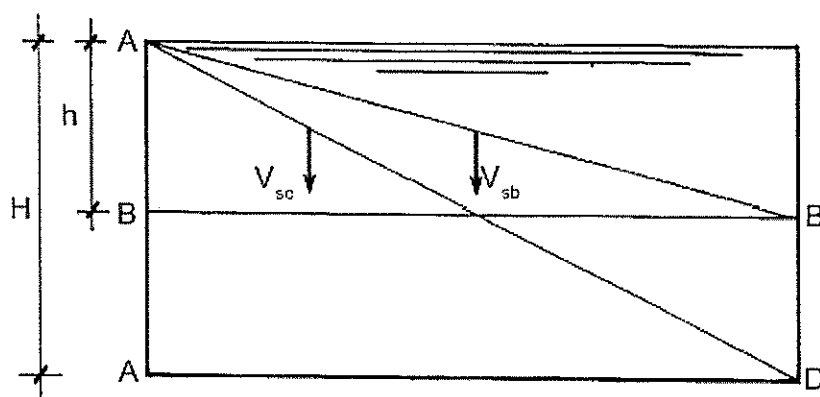


Figura 25. Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Se podría admitir que la capacidad de clarificación del decantador aumentaría con la duplicación del área horizontal (figura 26). Hace más de 45 años se propuso inclusive un decantador con varios pisos horizontales, con un espaciamiento de 15 cm entre ellos y con remoción mecanizada de lodo.

Se considera que tres son los efectos que favorecen la remoción de las partículas en este tipo de unidades: (i) aumento del área de sedimentación, (ii) disminución de la altura de caída de la partícula y (iii) régimen de flujo laminar.

Debido a las dificultades de mantenimiento, este tipo de unidades permaneció olvidado por mucho tiempo hasta que, a mediados de la década de 1960, se empezó a investigar la sedimentación en tubos inclinados, donde el lodo depositado escurre hacia la parte inferior, sin interferir con las características de la instalación.

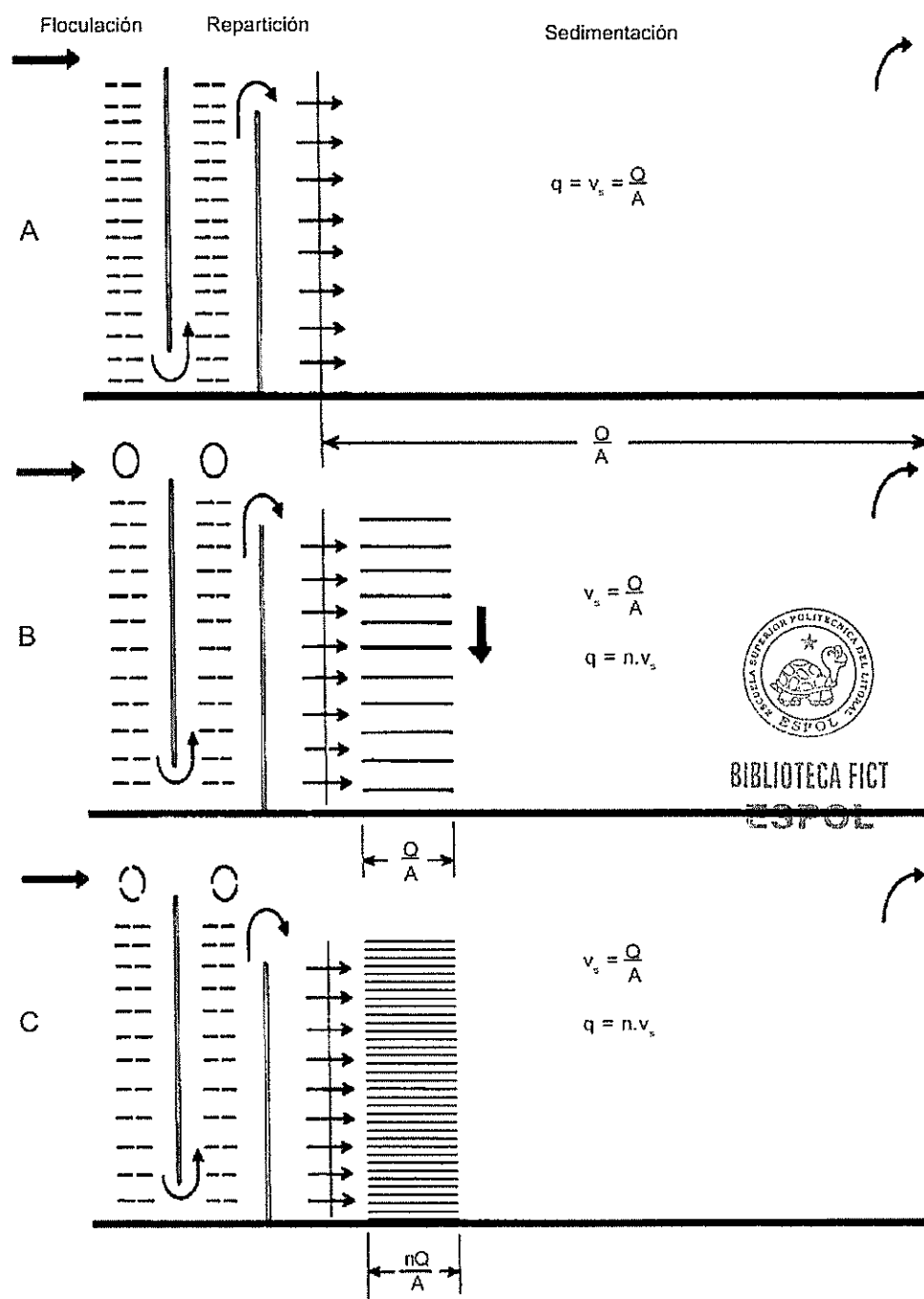


Figura 26. Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

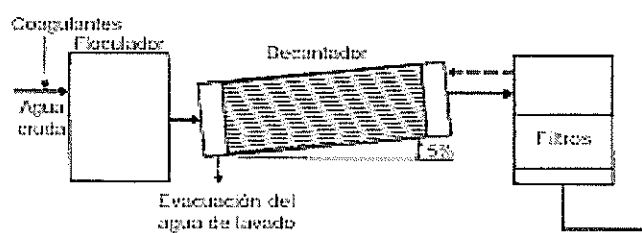
2.4.6 Tipos de Sedimentadores laminares.

De acuerdo con la dirección del flujo, los decantadores laminares pueden clasificarse así:

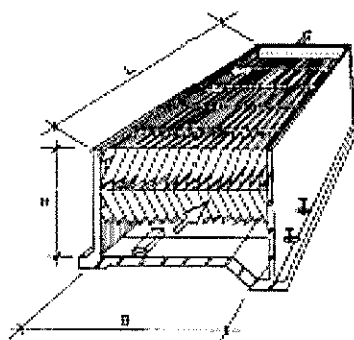
a) De flujo horizontal

En estos el flujo del agua es o tiende a ser horizontal. La figura 27(a) representa un sedimentador laminar con láminas ligeramente inclinadas con un ángulo de 5° (ángulo de máxima eficiencia remocional). En esta solución, se requiere invertir el flujo para realizar la limpieza del sedimentador. Esta solución es muy utilizada en plantas comerciales o plantas de pequeña capacidad (inferior a 50 L/s). Su uso se limita únicamente por razones económicas.

Para evitar el lavado y obtener al mismo tiempo máxima eficiencia y escurrimiento de lodos depositados en las láminas, se puede recurrir a las soluciones indicadas en la figura 27(b). Estos son Sedimentadores laminares de flujo horizontal (máxima eficiencia), pero con láminas planas paralelas inclinadas para obtener la pendiente necesaria de escurrimiento de flóculos (Maldonado, 2002).



a) De láminas horizontales



b) De láminas inclinadas



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Figura 27. Sedimentador laminar de flujo horizontal.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

b) De flujo inclinado.

Este tipo de decantadores es el más usado. Generalmente, en la parte inferior del decantador se presenta una zona de distribución de agua. En la parte media existen módulos inclinados con un ángulo de 60° . El agua decantada se recolecta lateralmente en la parte superior (figuras 28 y 29).