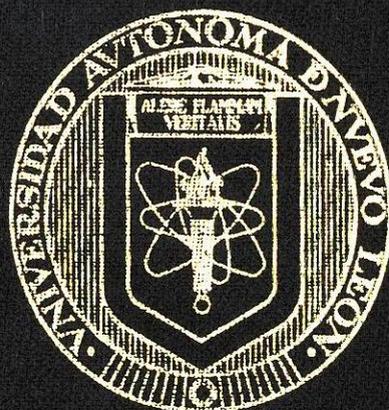


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL  
EN LA INDUSTRIA DE LA CERAMICA

Por

ALVARO MORENO RESTREPO

COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS con orientación en  
Ingeniería Ambiental

JUNIO DE 2005

2000  
C.2  
2005  
M6  
TD745  
T

TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL  
EN LA INDUSTRIA DE LA CERAMICA

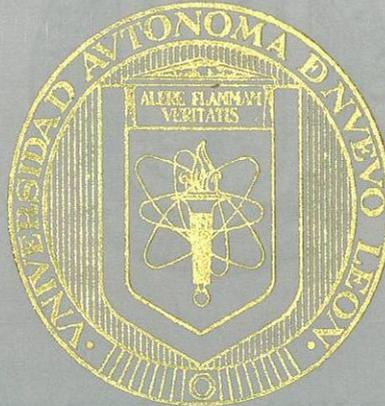
A. M. R.



1090015952

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



T  
TD745  
M6  
2005  
c.2

TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL  
EN LA INDUSTRIA DE LA CERAMICA

Por

ALVARO MORENO RESTREPO

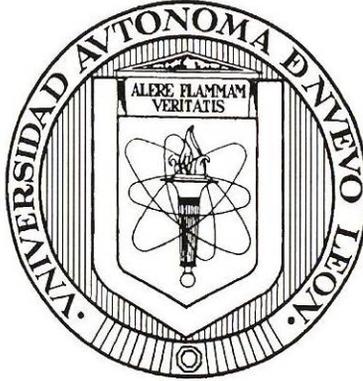
COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRIA EN CIENCIAS con orientación en  
Ingeniería Ambiental

JUNIO DE 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA  
INDUSTRIA DE LA CERÁMICA

Por

ÁLVARO MORENO RESTREPO

Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en  
Ingeniería Ambiental

Junio de 2005



**COMPROBANTE DE CORRECCIÓN**

Tesista: ÁLVARO MORENO RESTREPO

Tema de la tesis: TRATAMIENTO Y REÚSO DEL AGUA  
 RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA

\_\_\_\_\_

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA  
 del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos:  
 ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Nombre y firma de quien corrigió: *Ramón Longoria*  
 Arq. Ramón Longoria Ramírez

*Justino*

**M.I. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ALVAREZ  
 SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Ciudad Universitaria, a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.



10 DE MARZO DEL 2005

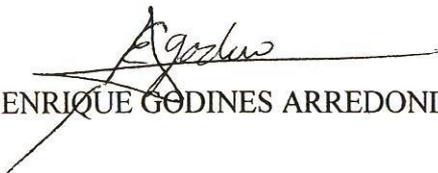
ING. JUSTINO CESAR GONZALEZ ALVAREZ, M. EN I.  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
Presente.-

Estimado Ing. González Álvarez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la tesis: "TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERAMICA", que presenta el Sr. Ing. Álvaro Moreno Restrepo, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, me permito Informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro particular por el momento, me encuentro a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere usted pertinente,

Atentamente:

  
DR. ENRIQUE GODINES ARREDONDO

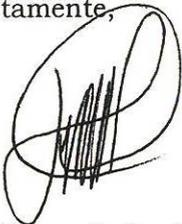
31 de Enero de 2005

Ing. Justino César González Álvarez, M en I  
Subdirector de Posgrado de la Facultad  
de Ingeniería Civil de la UANL  
Presente.-

En atención a su oficio en el que me informa haber sido designado como Evaluador de la tesis: "TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LE INDUSTRIA DE LA CERÁMICA", que presenta el Sr. Álvaro Moreno Restrepo, como requisito parcial en opción al Grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, informo a Usted que una vez satisfechas las observaciones vertidos en tiempo y forma a dicho trabajo, la dictamino como Aprobada.

Sin otro particular de momento, me encuentro a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere Usted pertinente.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'J' followed by several vertical strokes, all enclosed within a large, loopy oval shape.

MC Jimmy L. Loaiza Navía



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN □ FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS □ SUB-DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M. en I.  
SUB-DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**OF-FCQ-SPG/157**

Presente.-

**Asunto: Carta de Aprobación de Tesis  
y Solicitud de Evaluación por Expertos.**

Estimado Ing. González Álvarez:

Me dirijo a Usted por este medio para comunicarle que mi asesorado y yo hemos escrupulosamente analizado las recomendaciones hechas por el revisor gramatical; al respecto se han acatado las indicaciones siempre que fue procedente y que no contravinieran el Manual de Estilo que la UANL nos ha impuesto para la elaboración de tesis de posgrado.

Cumplido este requisito a cabalidad, porque me consta, doy mi dictamen de **aprobación** a la tesis de mi asesorado, el Ingeniero Civil **ÁLVARO MORENO RESTREPO**, dándome enteramente por satisfecho con su trabajo titulado:

**“TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA  
INDUSTRIA DE LA CERÁMICA”**

La tesis de mi asesorado es requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental, en el Programa que ofrece la División de Estudios de Posgrado de nuestra Facultad de Ingeniería Civil. Por lo anterior, le solicito comedidamente que gire las instrucciones pertinentes para la revisión académica de esta tesis por los expertos que Ud. tenga a bien nombrar.

Sin otro asunto en particular le hago llegar un saludo cordial.

**ATENTAMENTE**

19 de Noviembre de 2004

**ALERE FLAMMAM VERITATIS**

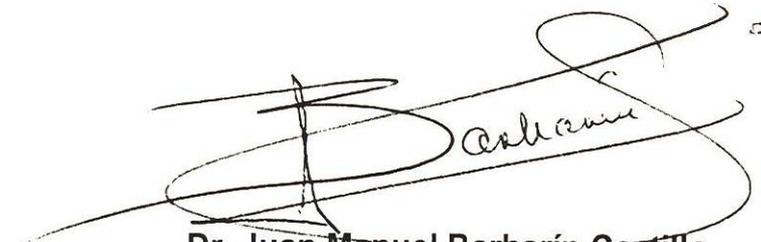
  
**DR. JUAN MANUEL BARBARÍN CASTILLO**  
**DIRECTOR DE TESIS**

  
SUB-DIRECCIÓN DE POSTGRADO

c.c.p. I.C. **ÁLVARO MORENO RESTREPO. CANDIDATO AL GRADO.**

**TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA  
INDUSTRIA DE LA CERAMICA**

**Aprobación de la Tesis:**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Barbarín', written over a horizontal line.

---

**Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo**  
Director de la Tesis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Godines', written over a horizontal line.

---

**Dr. Enrique Godines Arredondo**  
Evaluador

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Loaiza', written over a horizontal line.

---

**Mc. Jimmy L. Loaiza Navia**  
Evaluador

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. González', written over a horizontal line.

---

**M. en I. Ing. Justino Cesar González Álvarez**  
Subdirector de Estudios de Posgrado

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo por la dirección y asesoría en la realización de esta tesis.

A la Secretaría de Relaciones Exteriores de México, esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por el Gobierno de México, a través de dicha Secretaría.

A mis amigos el Ing. Adán Plascencia I. y al Dr. Campo Elías González Guerrero por permitirme el uso de su equipo de computo y de impresión respectivamente, para el desarrollo de este estudio.

A mi familia por el apoyo moral que siempre me ha brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 La ética y el medio ambiente	3
1.3 La ética y la educación en valores sobre el medio ambiente	5
1.4 Antecedentes	7
1.4.1 El azulejo a través del tiempo	7
1.4.2 Ventajas de los recubrimientos cerámicos	10
1.4.3 El proceso de fabricación de los recubrimientos cerámicos	13
1.5 La contaminación del agua	15
1.5.1 Tipos de contaminantes	17
1.5.2 La protección de los ecosistemas	18
1.5.3 La calidad del agua y la salud	21
1.5.4 Enfermedades relacionadas con la deficiente calidad del agua	23
1.6 Normas oficiales mexicanas en materia de calidad del agua residual	25
2. MARCO TEÓRICO	28
2.1 La crisis mundial del agua	28

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
2.1.1 El agua dulce disponible en el mundo	29
2.1.2 Los usos del agua	32
2.1.3 Desafíos mundiales en torno al agua	37
2.1.4 La administración del agua de modo responsable para asegurar el desarrollo sostenible	40
2.2 El proceso de fabricación de pisos y azulejos	41
2.3 El proceso de fabricación de ladrillos	49
2.4 El agua residual en la industria de la cerámica	53
2.4.1 Características del agua residual en la industria de la cerámica	54
2.4.2 Reuso del agua residual en la industria de la cerámica	55
2.4.3 Instalaciones para el tratamiento de agua residual en la industria de la cerámica	59
2.4.4 Control de olores del agua residual en la industria de la cerámica	61
3. ESTUDIO DEL AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA	63
3.1 Desarrollo del estudio	63
3.1.1 Metodología	65
3.2 Generalidades de la empresa donde se realizó el estudio	66
3.2.1 Aspectos geográficos de la zona	68
3.3 Uso del agua en la empresa donde se realizó el estudio	69
3.3.1 Fuentes de suministro de agua	69
3.3.2 La generación del agua residual y su problemática	72
3.3.3 Análisis físico-químico del agua residual	78
3.3.4 La prueba de jarras	79

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
3.3.5 Análisis de los lodos	83
3.4 Objetivos	84
3.5 Hipótesis	85
4. DISEÑO DE LAS UNIDADES DE HOMOGENEIZACIÓN, COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE LA PLANTA TRATADORA	86
4.1 Introducción	86
4.1.1 Determinación del caudal de diseño	87
4.2 El tanque de homogeneización	88
4.2.1 Cálculo de la tubería del influente	98
4.2.2 Cálculo de la tubería de salida del homogeneizador	98
4.3 Coagulación y floculación	99
4.3.1 Adición del coagulante	101
4.3.2 El mezclado rápido	104
4.3.3 Diseño del floculador mecánico	106
5. DISEÑO DE LAS UNIDADES DE SEDIMENTACIÓN, FILTRACIÓN Y TANQUE DE AGUAS CLARAS DE LA PLANTA TRATADORA	115
5.1 La sedimentación	115
5.1.1 Criterios de diseño	116
5.1.2 La estructura de entrada	118
5.1.3 La sedimentación de alta velocidad	120
5.1.4 Diseño del sedimentador de alta velocidad	122
5.1.5 El sistema de recolección de lodos	126
5.1.6 La estructura de salida	130
5.1.7 El flujo másico de los lodos	136

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
5.2 La filtración	142
5.2.1 Diseño del filtro rápido	145
5.2.2 El filtro alberca	161
5.2.3 El canal de alimentación al filtro	161
5.2.4 El tanque de agua clara	162
5.3 Las pérdidas de energía	163
6. CONCLUSIONES	169
BIBLIOGRAFÍA	171

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1.1 Abastecimiento de agua, distribución de poblaciones sin servicio	22
1.2 Saneamiento, distribución de poblaciones sin servicio	23
2.1 Recursos hídricos mundiales y consumo	33
2.2 Usos alternativos del agua	35
2.3 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de azulejos y pisos cerámicos	44
2.4 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de ladrillos	50
3.1 Producción de pisos y azulejos durante el año 2,000	67
3.2 Producción de ladrillos durante el año 2,000	68
3.3 Consumo de agua extraída de pozos No. 1 y No. 2 en el año 2,000	71
3.4 Balance de agua en el proceso cerámico, año 2,000	75
3.5 Diagrama de flujo de utilización del agua en la preparación de barbotina de cuerpo rojo	76
3.6 Diagrama de flujo de utilización del agua en la preparación de barbotina de cuerpo blanco	77
4.1 Mezclador de turbina en un tanque provisto de deflectores	94
4.2 Vista en planta del tanque de homogeneización	96
4.3 Sección transversal del tanque de homogeneización	97
4.4 Floculador mecánico de eje y paletas verticales	114
5.1 Relaciones geométricas de un sedimentador de placas inclinadas	121

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
5.2 Vista en planta del sedimentador de placas	133
5.3 Sección longitudinal del sedimentador de placas	134
5.4 Sección transversal del sedimentador de placas	135
5.5 Vista en planta del espesador de lodos	140
5.6 Sección transversal del espesador de lodos	141
5.7 Vista en planta del filtro rápido de lecho mixto	158
5.8 Sección longitudinal del filtro rápido de lecho mixto	159
5.9 Sección transversal del filtro rápido de lecho mixto	160
5.10 Vista en planta del sistema de tratamiento de agua residual	168

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1.1 Presiones que sufren los ecosistemas de agua dulce	19
1.2 Principales enfermedades en relación con el agua de baja calidad	24
1.3 Resumen de las normas oficiales mexicanas, actualmente en vigencia, en materia de calidad del agua residual	27
2.1 Disponibilidad mundial de agua dulce	31
2.2 Fórmula utilizada en la preparación del cuerpo rojo	41
2.3 Fórmula utilizada en la preparación del cuerpo blanco	42
2.4 Fórmula utilizada en la fabricación de ladrillos	51
2.5 Características de los efluentes de la industria cerámica	54
2.6 Intervalos de variación de componentes de lodos cerámicos	58
3.1 Análisis químico del agua del pozo No.1	70
3.2 Uso del agua en actividades de limpieza en la planta cerámica	74
3.3 Análisis físico-químico del agua residual	78
3.4 Resultado de la prueba de jarras del agua residual	80
3.5 Análisis físico-químico del agua sobrenadante de la jarra No. 5	81
3.6 Índice de floculación de Willcomb	82
3.7 Resultado de análisis CRETl de lodos con residuos de esmalte	83
4.1 Estimación del volumen de almacenamiento del tanque de homogeneización	89
4.2 Valores de k para las necesidades de energía de mezclado	92
4.3 Diseño de un mezclador de turbina	93
4.4 Coeficiente de arrastre de palas según Rouse	110

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
4.5 Cálculo de $\sum A r^3$	111
4.6 Cálculo de potencia y gradiente de velocidad en el tanque floculador	113
5.1 Criterios de diseño para tanques de sedimentación de flujo horizontal	118
5.2 Diámetros de orificios y velocidades de flujo para $G = 20 \text{ s}^{-1}$	120
5.3 Comparación entre diferentes tipos de filtros	144
5.4 Propiedades de la antracita y de la arena	145
5.5 Granulometría de la antracita	145
5.6 Granulometría de la arena	146
5.7 Cálculo de la pérdida de carga debida al lavado en la antracita	150
5.8 Cálculo de la pérdida de carga debida al lavado en la arena	150
5.9 Cálculo de niveles de operación del filtro	157
5.10 Cálculo de la pérdida de energía debido a fricción	165
5.11 Cálculo de pérdidas locales por codo de $90^\circ$	166
5.12 Cálculo de pérdidas locales por entradas y salidas	167

## LISTA DE ABREVIATURAS, NOMENCLATURA Y SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
etc.	Etcétera
LGEEPA	Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente
LFPA	Ley federal de procedimiento administrativo
OD	Oxígeno disuelto
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
H <sub>2</sub> O	Agua
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
SEMARNAT	Secretaria del medio ambiente y recursos naturales
PROFEPA	Procuraduría federal de protección al medio ambiente
CRETIB	Corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable, biológico e infeccioso
cm	Centímetro
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
mg	Miligramos
L	Litro
mL	Mililitro
FTU	Unidades de turbiedad
pH	Potencial hidrógeno

NMX	Norma mexicana
u.c.	Unidades de color
AWWA	American Waste Water Association
rpm	Revoluciones por minuto
rps	Revoluciones por segundo
FS	Factor de seguridad
Re	Número de Reynolds
N	Newton
kg <sub>f</sub>	Kilogramos fuerza
kg <sub>m</sub>	Kilogramos masa
HP	Caballos de Fuerza
pulg	Pulgadas
G	Gradiente de velocidad
BL	Bordo libre
psi	Libra(s) por pulgada cuadrada
s	Segundo
SI	Sistema internacional
SST	Sólidos suspendidos totales
mm	Milímetros
S <sub>s</sub>	Gravedad específica
NaOH	Hidróxido de sodio
HCL	Acido clorhídrico

## RESUMEN

**ALVARO MORENO RESTREPO**

Fecha de obtención del Grado: Diciembre del 2004

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio:      **TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA.**

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental.

Número de páginas: 173.

Área de Estudio: Ingeniería Ambiental.

Propósito y método de estudio:

En esta tesis se hace un estudio completo del uso de agua en una fábrica de productos cerámicos localizada en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Se identifican las fuentes de suministro de agua (dos pozos) y se realiza el análisis de calidad del agua de dichas fuentes. Se evalúan las actividades en que se usa el agua en diferentes áreas de la fábrica. Se revisan tuberías y medidores de flujo existentes en la fábrica, de los cuales se hace un inventario, y se instalan 16 medidores nuevos para completar la red de medidores en la planta. Se obtiene el balance hídrico. Se identifican los puntos de generación de aguas residuales y la problemática de su disposición sin previo tratamiento y de manera incontrolada en una laguna de residuos de esmalte o en el uso para riego de áreas verdes. Se realiza análisis físico-químico del agua residual. Se hace prueba de jarras para estimar la dosis de coagulante óptima. Se hace análisis CRETIB de lodos. El balance hídrico estima que la fábrica requiere en promedio diario  $677 \text{ m}^3 / \text{día}$  de agua extraída de los pozos, de los cuales  $219 \text{ m}^3 / \text{día}$  son agua residual que está contaminando. Se determina el consumo de agua por metro cuadrado de producto fabricado el cual es igual a  $30 \text{ litros/m}^2$ . Se plantea como solución el diseño de una planta tratadora de aguas residuales con unidades de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, cuyo efluente tratado sirva para reutilizarse en actividades de lavado, minimizando en un 32% la extracción de agua de los pozos.

Firma del Asesor:

---

Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo

## FE DE ERRATA

En la página 110 se utilizó la ecuación:

$$P = (12,600 C_D n^3 (1-k)^3 \Sigma Ar^3) / V$$

Para el cálculo de la potencia neta de un agitador vertical giratorio de paletas en un tanque de floculación. Dicha ecuación no considera el efecto debido a la presencia de deflectores fijos en los muros del tanque, sin embargo, en esta tesis si se incluyeron deflectores en el diseño del tanque floculación, con la finalidad de evitar el flujo rotacional de la masa líquida alrededor del eje, debido a la inercia, y así mejorar la eficiencia de la agitación.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Empezamos un nuevo siglo y como en todo comienzo de época, buscamos renovar nuestras ilusiones, despertar propósitos que permanecen ocultos, abrimos a nuevas fuentes de esperanza por un porvenir nuevo e incierto que parece que se descubriera por el paso de una fecha a otra. Este sentimiento de esperanza y de cambio, que existe en cada uno de nosotros y lo percibimos de manera individual, es en gran medida algo generalizado, porque generalizados son algunos problemas que afectan al conjunto de la sociedad. Uno de estos problemas tiene que ver con el tema de la conducta humana, aquello que pertenece al campo de la *ETICA*; y por consiguiente involucra el dominio de nuestras relaciones consigo mismo y con los demás seres humanos.

*“Pero esto es solo una parte del problema ético. Hemos cambiado el medioambiente de manera radical en los últimos cincuenta años, al punto de poner en peligro la existencia de la vida sobre la tierra; y esto también ha pasado a ser motivo de preocupación ética”.<sup>1</sup>*

Los problemas ambientales no son producto de la fatalidad, están relacionados con las intervenciones humanas. Y estas presentan muchos componentes, no solo el económico, también el científico y el tecnológico, el político y jurídico, el social en su conjunto. Desde este punto de vista, hay que preguntarse por la naturaleza de las intervenciones o acciones humanas, es decir, por la forma como se originan y presentan

dichas acciones con relación al medio ambiente. ¿Cuáles son las consecuencias previsibles a corto, mediano y largo plazo por estas intervenciones? ¿Y que podemos hacer al respecto? Son preguntas inevitables en un análisis ambiental, y que la ética incorpora como manera de preguntarse sobre la conducta de los hombres con el conjunto de la biosfera.

El tema ambiental está íntimamente relacionado con el tema del desarrollo científico – tecnológico y en particular con la concepción de este desarrollo. No se pretende decir con ello que el origen de los problemas ambientales esté asociado única y exclusivamente al tema de la ciencia y la tecnología. Gran responsabilidad han tenido las formas de explotación económica de la sociedad, tanto de los sistemas capitalistas como socialistas; o bien en los valores que las personas tienen frente a la naturaleza, en cuanto amos y poseedores que le permiten usufructuar de ella.

Históricamente se puede vincular esta articulación de ciencia – tecnología y medio ambiente como una relación problemática, desde mediados del siglo XX, con el final de la segunda guerra mundial en 1945, y especialmente con los años posteriores, teniendo como despliegue la década de los años 60. Albert Einstein, por ejemplo, fue un crítico por la utilización de la energía nuclear con fines armamentísticos; o físicos menos conocidos como Max Delbruck, terminó por abandonar la Física como rechazo al uso del conocimiento en la construcción de la bomba atómica, para dedicarse a la biología y trabajar desde allí por una ciencia que contribuyera a la vida y no a la destrucción de la vida. En los años 60 se presenta de manera creciente la movilización social por el tema ambiental en el mundo, por ejemplo con la protesta de los estudiantes norteamericanos sobre el uso del napalm en la guerra de Vietnam; con la protesta social por la carrera armamentista en la llamada guerra fría y la preocupación por el uso de la energía atómica para la producción de energía eléctrica, teniendo en cuenta los primeros accidentes de centrales nucleares que se empezaban a presentar.

De esta protesta social surgió el movimiento ambientalista y también el hipismo, movimientos que le renovaron la esperanza a la sociedad, más allá de la percepción optimista que tenían los gobiernos con el uso de la ciencia y la tecnología, como fuente de solución de los problemas habidos y por haber. Pero este optimismo proclamado va a ser cuestionado por la cadena de desastres relacionados con la ciencia y la tecnología, que

van a conllevar a la protesta social de la cual se habló anteriormente. Vertidos de residuos contaminantes, accidentes nucleares en reactores civiles y transportes militares, envenenamientos farmacéuticos, derramamientos de petróleo, etc.; todo ésto no hacía sino confirmar la necesidad de revisar la concepción política del desarrollo científico – tecnológico y su relación con la sociedad y la naturaleza.

Frente a esto, los gobiernos, inicialmente en los Estados Unidos de América, empezaron a crear una nueva política más intervencionista, donde los poderes públicos desarrollaron y aplicaron una serie de instrumentos técnicos, administrativos y legislativos para encauzar el desarrollo científico – tecnológico y así poder supervisar sus efectos sobre la naturaleza y la sociedad. El estímulo de la participación pública sería desde entonces una constante en las iniciativas institucionales relacionadas con la regulación de la ciencia y la tecnología. De la participación de la sociedad, con sus puntos de vista, sus valores y criterios éticos, dependería en adelante que algunas cosas al nivel de la concepción del desarrollo científico y tecnológico, y en general del desarrollo de la sociedad, pudiesen ser modificadas y con ello se cambiase la tendencia depredadora sobre el medio ambiente.

## **1.2 LA ÉTICA Y EL MEDIO AMBIENTE**

Tradicionalmente el tema de la ética no ha estado ligado a los aspectos referentes a la naturaleza y al medio ambiente. Las viejas cuestiones de la relación entre el ser y el deber, la causa y el fin, la naturaleza y el valor, que son del dominio de la ética, han estado circunscritas a una esfera en donde ha quedado excluido el tema del medioambiente. Y sólo hasta décadas muy recientes, éste tema ha pasado a tener una preocupación ética notable.

Pero la época que se inició desde mediados del siglo XX, con la capacidad del hombre de romper esa relación constante del hombre con la naturaleza, mediante el desarrollo científico – tecnológico, ha modificado sensiblemente el panorama. Antes de nuestra época, las intervenciones del hombre en la naturaleza, tal y como él mismo las veía, eran esencialmente superficiales e incapaces de dañar su permanente equilibrio. Pero ahora las cosas han cambiado.

El dominio tradicional de la ética estaba circunscrito a la relación entre los hombres en la ciudad. La vida humana transcurría entre lo permanente y lo cambiante: lo permanente era la naturaleza; lo cambiante, sus propias obras. La más grande de éstas fue la ciudad, a la que pudo otorgar cierta permanencia con las leyes que para ella ideó y que se propuso respetar. La naturaleza no era objeto de la responsabilidad humana; ella cuidaba de sí misma y cuidaba también del hombre. Frente a la naturaleza no se hacía uso de la ética, sino de la inteligencia y de la capacidad de invención. Toda la ética que nos ha sido transmitida habita, pues, este marco intra-humano, el de la ciudad.

Pero en el siglo XX la naturaleza ha sido vulnerable. El desarrollo científico – tecnológico moderno nos ha mostrado la tremenda vulnerabilidad de la naturaleza, una vulnerabilidad que no se sospechaba antes que se hiciese reconocible en los daños causados. Y es sobre esta capacidad de daño sobre la naturaleza, lo que nos hace reconsiderar la importancia del saber previo, como principio de cautela frente a nuestras acciones.

Ninguna ética anterior hubo de tener en cuenta las condiciones globales de la vida humana ni el futuro remoto, más aún, la existencia misma de la especie. El hecho de que precisamente hoy estén en juego esas cosas exige, en una palabra, una concepción nueva de los derechos y deberes, algo para lo que ninguna ética ni metafísica anterior proporciona los principios y menos aún una doctrina ya lista.

Ya no es un sinsentido preguntar si el estado de la naturaleza humana – la biosfera en su conjunto y en sus partes, que se encuentra ahora sometida al poder del hombre – se ha convertido precisamente por ello en un bien encomendado a nuestra tutela y puede plantearnos algo así como una experiencia moral, no solo en razón de nosotros, sino también en razón de ella y por su derecho propio.

*“Es en este punto que aparece el principio de RESPONSABILIDAD, como el elemento de base para considerar una nueva ética. Porque ya no se trata de que los hombres hagan las cosas con la diligencia del deber cumplido. De lo que se trata es de que las hagan con responsabilidad, es decir, teniendo en cuenta la existencia de la naturaleza, las acciones incluyen al presente y al futuro. Es el futuro indeterminado más que el espacio contemporáneo de la acción, el que nos proporciona el horizonte*

*significativo de la responsabilidad. Esto exige una nueva clase de imperativos éticos. En principio la moral tendrá entonces que invadir la esfera de la producción económica, de la que anteriormente se mantuvo alejada, y habrá de hacerlo en la forma de política pública. De hecho la esencia modificada de la acción humana modifica la esencia base de la política. En síntesis, la ética que tiene que ver con el medioambiente, es la ética de la responsabilidad. Tal como se ha dicho, es una responsabilidad con el futuro".<sup>2</sup>*

### **1.3 LA ÉTICA Y LA EDUCACIÓN EN VALORES SOBRE EL MEDIO AMBIENTE**

La escuela es uno de los mejores espacios para aprender a clarificar el sistema de valores que se oculta detrás de una intervención ambiental. De ahí que la educación ambiental en la escuela no deba ser un dispositivo de transmisión de unos valores predeterminados, no debe ser esa su función primordial; el objetivo de la educación ambiental, con relación al tema de los valores, es permitir a la comunidad educativa, avanzar en la construcción de conductas, criterios y comportamientos hacia la *SOSTENIBILIDAD* de una determinada sociedad, sin perder de vista el planeta en su conjunto.

La educación en valores desde una perspectiva ambiental se enfoca centralmente en el tema de la sostenibilidad, puesto que, ella misma busca no comprometer la capacidad medio ambiental de las futuras generaciones – *DESARROLLO SOSTENIBLE* – además que propende por valorar bajo otras condiciones, por ejemplo, evitar la desaparición de una especie, o bien el valorar ciertos hábitat, que en términos económicos pueden ser muy bajos, pero de gran beneficio ambiental. Al mencionar la visión del planeta en conjunto, hay que tener presente no solo la sostenibilidad de la sociedad en la que esta inmersa la institución, si no también la del planeta, puesto que cualquier decisión ambiental puede desencadenar consecuencias insospechadas en otros lugares. Pero tener en cuenta el planeta o, al menos un espacio mayor de análisis, significa, tener presente un conjunto más amplio de circunstancias y relaciones económicas y sociales, y por consiguiente, de relaciones de poder, desigualdad, riqueza, etc.

Se debe extender la educación en valores morales, involucrando en ella al tema del medio ambiente y por consiguiente al concepto de desarrollo sostenible, que constituye el eje fundamental de análisis de la problemática ambiental. Se trata del desarrollo que es capaz de no comprometer la capacidad de las futuras generaciones de atender sus necesidades, La palabra desarrollo expresa un compromiso de equidad con los pueblos y comunidades más pobres; y el adjetivo sostenible implica perdurar, lo cual es otra dimensión de la equidad; no se dice crecimiento sostenible, ya que el incremento se mide en función de la renta nacional, en cambio el desarrollo implica algo más amplio, una noción de bienestar que reconoce componentes no monetarios.<sup>3</sup>

Desde una perspectiva que involucra más a la ciencia y la tecnología y su relación con el medio ambiente, algunos autores han propuesto el llamado ciclo de responsabilidad, como una manera de aprender a trabajar en el aula el tema ético. En este caso, la dimensión ambiental es un compromiso con la acción, y por consiguiente las formas de reconocimiento de sí mismo, que también constituyen la primera fase del ciclo, es un criterio para identificar Las imágenes y deseos, que proyectados al futuro, exigen un compromiso con el medio ambiente. Aparece pues la necesidad de responsabilidad intergeneracional, que es el corazón de la sostenibilidad. Responsabilidad hacia el futuro, cual es la base de la ética moderna, la que nació a finales del siglo XX y tiene mucho por transitar en el siglo XXI.<sup>4</sup>

Es probable que generaciones futuras hereden un ambiente más degradado. En este sentido, la idea de equidad intergeneracional, como la base del concepto de sostenibilidad, se convierte así en un concepto básicamente ético, ya que busca no comprometer la capacidad medioambiental de las futuras generaciones. La ética del siglo XXI con relación al medio ambiente, debe continuar trabajando y extendiendo a todos los niveles de la sociedad y no solo al entorno escolar, el concepto de sostenibilidad, como un concepto básicamente moral. Y se trata de una ética del género humano, aquella que reconoce la tríada individuo – sociedad – especie, para asumir la misión antropológica del milenio:

- De trabajar para la humanización del planeta.
- De obedecer a la vida, guiar la vida.
- De lograr la unidad planetaria en la diversidad.

- De respetar al otro, tanto en la diferencia como en la identidad consigo mismo.
- De desarrollar la ética de la solidaridad.
- De desarrollar la ética de la comprensión.
- De enseñar la ética del género humano.<sup>5</sup>

## **1.4 ANTECEDENTES**

### **1.4.1 EL AZULEJO A TRAVES DEL TIEMPO**

La historia del azulejo es la saga del eterno deseo del hombre de combinar utilidad con hermosura, de su deseo de hacer su hogar no simplemente un lugar de refugio, sino un lugar de colorido y encanto. El azulejo cerámico es un material tan antiguo que precede historia escrita y alguna vez fue tanpreciado que solo reyes, reinas y los príncipes de la iglesia podían obtener. En este material se entretendió el romance, las búsquedas místicas, el deseo y el cumplimiento del hombre a lo largo de los tiempos. A causa de sus cualidades de durabilidad, el azulejo ha hecho posible conocer históricamente muchos diversos períodos en el desarrollo de la sociedad, al tiempo que ha dado color y vida a culturas que no conoceríamos si no fuera por el legado del azulejo.

Los historiadores han atribuido por mucho tiempo los comienzos de la cerámica artística a algunas localidades definidas. Egipto, China y Babilonia han sido mencionadas. Azulejos de cerámica fueron usados en Egipto durante muchos siglos antes de Cristo. Arqueólogos, excavando a través del valle del río Nilo, donde éste ha inundado sus orillas durante milenios, han encontrado trozos de piezas de cerámica y azulejo que se cree tengan una antigüedad de 12,000 a 18,000 años. La pirámide escalonada construida para el faraón Zoser en el año 5,000 a.C. es también protagonista de esta historia. Se pensaba que estas pirámides o tumbas eran el hogar del alma, en el cual el espíritu permanecería para siempre. Zoser quería un material que durara eternamente. El eligió azulejo de cerámica y cuando la pirámide escalonada fue abierta en 1803, los azulejos en color verde azul encontrados allí eran tan hermosos como el día en que se instalaron por primera vez. Azulejos con líneas resaltadas en verde, rojo, azul, o amarillo en un fondo bronceado presentaban su legado, sus habilidades en batalla y sus títulos enmarcados en una de las puertas de su tumba.

Más de los orígenes del azulejo de cerámica en la antigüedad han sido encontrados en el entonces fértil valle del Tigris – Éufrates, donde los Babilonios y Asirios dominaron del año 2,800 al 600 a.C. Con murales brillantemente coloreados y diseñados con maestría, una gran variedad de azulejos y ladrillos engalanaron el templo y fachadas del palacio, los portones de la ciudad y las antiguas paredes de las ciudades de Khorsabad, Babilonia y Nínive.

Los Persas, que como imperio antiguo fueron posteriores a los Asirios desde aproximadamente 600 a.C., desarrollaron la forma del arte del azulejo de cerámica bajo el reinado de Darío El Grande. Sin embargo, la caída de Persia a manos de Alejandro El Grande de Macedonia y sus hordas guerreras en el año 330 a.C. resultó en la pérdida de la cerámica artística por 1,000 años aproximadamente.

Los Sarracenos, conocidos hoy en día como Árabes, se movilizaron de Arabia con espada y fuego para conquistar la mayoría del mundo conocido en ese entonces. Los Sarracenos, siendo una raza nómada, viviendo en tiendas o refugios, se quedaron impresionados y turbados por el azulejo tan bello que había en las construcciones persas. Los Sarracenos se convirtieron en grandes decoradores tomando como inspiración el azulejo persa. Ellos desarrollaron el azulejo geométrico. Después de conquistar India, Egipto, Túnez y todo el norte de África, los Sarracenos establecieron fábricas de azulejo de los Persas en esos países, extendiendo así el uso del azulejo cerámico.

Más adelante y ya conocidos como Moros, estos feroces y agresivos pueblos invadieron y conquistaron España, trayendo el arte de hacer azulejo con ellos, del cual da cuenta el protagonismo de los artes Persa y Árabe en la temprana España decorativa. Una de las piezas más famosas de arquitectura del mundo es la Alhambra, en Granada, que fue recreada en el siglo XIII. La Alhambra fue convertida en una fortaleza cuando los reyes de la dinastía Zire, en el siglo XI, cercaron la ciudad e instalaron su residencia en la colina del El-Albacín. Dos siglos después, Mohammed ben Alahman unió el palacio y la fortaleza empezando un majestuoso período para la Alhambra. Los azulejos de la Alhambra altamente decorativos, policromados, multicolores en docenas de diferentes formas, diseños y patrones, adornan cada sección de esta maravillosa construcción.

A través del comercio e intercambio cultural entre España e Italia, el arte del azulejo se introdujo en Italia. Los italianos aprendieron el arte, pronto surgieron grandes ceramistas tales como Luca della Robbia quien hizo trabajos de una naturaleza que están sin ser igualados hasta hoy. Acerca de los murales de mosaicos de cerámica y vidrio, los primeros de ellos fueron encontrados en las iglesias y palacios de los Papas, representando la vida de Cristo, de sus discípulos y varios santos. Posteriormente se incorporaron al arte de los azulejos las imágenes de emperadores, grandes hombres de estado, soldados, dictadores, tiranos, oradores e incluso amantes que quisieron su imagen maximizada en sus propios hogares o palacios.

En algún lugar del Mar Negro se ubicó una ciudad, construida por Byzas, hijo de Poseidón, a la cual se le llamó *Byzantium*. Situada en un estrecho uniendo el Mar Negro y el Mar Mediterráneo, fue un importante centro de intercambio de esos días. El emperador Constantino renombró la ciudad llamándola *Deutere Roma* o *La Nueva Roma*, que por alguna razón no conservó el nombre y con el tiempo se le llamó Constantinopla. Los Persas nuevamente impusieron su arte en esta ciudad, la cual tuvo por algún tiempo que rechazar el nombre de Constantinopla y aceptar el de *Byzantium*, tomando todas las características de una ciudad Turca. *Byzantium* se convirtió en un lugar donde el arte de la cerámica desarrolló una nueva faceta. El esmalte bizantino y el mosaico de vidrio fueron usados en templos y monumentos de la fe islámica. El gran arquitecto Sinan dio un estilo especial de arquitectura a la ciudad de los nombres que siempre cambian. Aquellos que siguieron a Sinan continuaron adornando la ciudad y ahora se pueden encontrar en Estambul, su nombre actual, algunos de los más hermosos mosaicos de vidrio y cerámica existentes en el mundo.<sup>6</sup>

En Europa del Norte se desarrolló un método para la elaboración de cerámica conocida como encáustica. Fue un mosaico hecho usando arcilla de diferentes colores, mucho menos sofisticado que los mosaicos de Italia y España; este tipo práctico de mosaico fue usado en Alemania, Francia e Inglaterra. La fabricación del mosaico encáustico gótico en Inglaterra fue hecho por los monjes de ciertas órdenes religiosas. Fue durante el reinado de Enrique VIII que el arte fue perdido en Inglaterra cuando el rey rompió con la iglesia Católica Romana y destruyó o secularizó los monasterios. Por los siguientes 300 años todos los azulejos de cerámica usados en Gran Bretaña fueron importados de Francia, Italia, Alemania o España. Después se incrementó el intercambio

comercial entre Inglaterra y Holanda, siendo el azulejo holandés de Delft el más usado en Inglaterra, principalmente para chimeneas, vistas de hornos y revestimiento de paredes. Su popularidad creció a tal grado que los ingleses comenzaron la producción del azulejo y pronto se convirtieron en los líderes de los azulejos a mitad del siglo XVIII. Hubo tres centros ingleses de la producción del azulejo en el siglo XVIII; Londres, Bristol y Liverpool. En 1756 John Sadler de Liverpool produjo el primer azulejo decorado mecánicamente utilizando un proceso de impresión transferida que revolucionó a la industria de la cerámica. La calidad del azulejo decorado manualmente degeneró considerablemente en un intento de producir muchos a la vez y muy rápido. Con el nuevo proceso se tomaba unos cuantos segundos en decorar el azulejo. A partir de ello, en Inglaterra ya no se usaron los azulejos holandeses de Delft. Por cierto, los azulejos de Delft producidos en Holanda desde principios del siglo XVI, fueron tan populares que el 90% de todo el azulejo usado en el mundo provenía de Holanda. Delft es el nombre de un distrito de Holanda que tuvo en ese tiempo hasta 28 fábricas de azulejo en operación. Sin embargo, en 1850 la industria del azulejo en Holanda estuvo prácticamente muerta y ha sido revivida recientemente por admiradores de este arte ancestral.

#### 1.4.2 VENTAJAS DE LOS RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

Los *azulejos o baldosas cerámicas* son piezas planas de poco espesor, fabricadas con arcillas, sílice, fundentes, colorantes y otras materias primas. Generalmente se utilizan como pavimentos para pisos y revestimientos de paredes y fachadas. Las arcillas utilizadas en la composición del soporte pueden ser de *cocción roja* o bien de *cocción blanca*. Los azulejos, tanto de pavimento como de revestimiento de paredes, son piezas cerámicas impermeables que están constituidas normalmente por un soporte arcilloso y un recubrimiento vítreo: el *esmalte cerámico*. La extensa gama de productos cerámicos existente en el mercado actual está condicionada por las variadas utilidades de este material de construcción. En función de su aplicación, existe diferente tipología de producto y características. En la actualidad, se utilizan en *pavimentos y revestimientos*.<sup>7</sup>

Algunos usos de los pavimentos son los siguientes:

- Pavimento interior de viviendas
- Pavimento exterior o de terrazas
- Pavimentos de locales públicos, como los hospitales, escuelas, etc.
- Pavimentos diversos, como piscinas, pisos industriales, etc.

Algunos usos de los revestimientos son los siguientes:

- Revestimiento interior de viviendas, en cocinas, baños, etc.
- Revestimiento exterior como terrazas
- Revestimientos diversos

La utilización del azulejo como elemento de la construcción se está generalizando en todo el mundo. Hoy día ya no sólo se usan en países donde por razones históricas se aplican de una forma generalizada, sino también otras culturas comienzan a descubrir sus ventajas. Estas son algunas de ellas:

## 1. PRODUCTO NATURAL

Los pavimentos y revestimientos cerámicos son piezas impermeables constituidas por un soporte de naturaleza arcillosa, con un recubrimiento esencialmente vítreo (el esmalte cerámico) o sin él. Las materias primas que lo forman provienen de la tierra que, junto con el agua y el fuego de cocción, componen un producto natural y de alta calidad. Gracias a la utilización de estos materiales y al alto desarrollo tecnológico, hoy día existe una amplia oferta de productos cerámicos que ofrecen muchas ventajas y, todo ello, sólo con la utilización de tres elementos básicos del medio ambiente: la tierra o la arcilla, el agua y el fuego.

## **2. FÁCIL DE LIMPIAR**

La cerámica se caracteriza por su alta facilidad de limpieza, su capacidad de preservación de la suciedad y de cualquier tipo de contaminación. La naturaleza de la superficie cerámica evita cualquier fenómeno de adherencia y las grasas se pueden eliminar con gran facilidad. Gracias a ello hoy en día se ha generalizado su uso en los baños, cocinas, hospitales, laboratorios, piscinas e instalaciones industriales, donde su uso evita la generación de suciedad y olores. Por otro lado, su capacidad de aislante eléctrico, repercute en que los recubrimientos cerámicos eviten la captación del polvo ambiental eléctricamente activo y, con ello contribuyen al bienestar.

## **3. HIGIÉNICO Y ANTIALÉRGICO**

La capacidad del recubrimiento cerámico de prevenir la humedad, evita el desarrollo de colonias de gérmenes y hongos, que se generan con facilidad en construcciones donde la impermeabilización es deficiente. La acción de estos organismos sobre algunos recubrimientos no cerámicos es progresiva y puede ocasionar manchas en su superficie y deterioro de su interior. Por ello también se ha extendido su utilización en donde el uso del agua es continuado, como en baños, cocinas, instalaciones industriales, laboratorios, piscinas y fachadas.

## **4. INSTALACIÓN DEFINITIVA**

Los recubrimientos cerámicos no necesitan ningún mantenimiento después de su puesta en obra, excepto las normales operaciones de limpieza. Su resistencia a los cambios bruscos de temperatura, a los agentes químicos y biológicos, su dureza y resistencia al rozamiento repercute en su gran durabilidad en las edificaciones. Una nueva instalación de azulejos puede permanecer intocable en cualquier lugar. Por ello se ha proliferado su utilización en todos los lugares, destacando en las fachadas, en los espacios públicos,

centros comerciales, paseos y avenidas. También su incombustibilidad evita la propagación de incendios.

## 5. INERTE

Su carácter inerte, es decir, que repele cualquier posibilidad de vida biológica, evita la degradación del medio ambiente, pues el barro o la arcilla, una vez pasada la fase de cocción, adquiere la misma propiedad que la piedra o elementos de la naturaleza similares.<sup>7</sup>

### 1.4.3 EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

La fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos ha experimentado cambios considerables y continuos en los últimos años. Los revestimientos cerámicos son normalmente porosos, superior al 10% frente a la absorción del agua, lo que favorece la adherencia a la pared. En cambio, los pavimentos poseen una porosidad baja, inferior al 6% frente a la absorción de agua, con lo que se consiguen mejores características técnicas. Tradicionalmente el azulejo ha sido fabricado siguiendo diferentes métodos y mediante un proceso prácticamente manual. A partir de los años sesenta se incrementó la automatización y los métodos se han unificado en gran medida, siendo el más común el de *prensado en seco*, pudiendo continuar la fabricación por medio de un proceso de *bicocción* o de *monococción*.

#### ➤ PROCESO DE BICOCCIÓN

Esta tecnología que era prácticamente la única hasta los años sesentas, consiste en la molienda en seco de las materias primas, la cual después es prensada y sometida a una primera cocción en hornos túnel a temperaturas de 1,000 °C, con ciclos de 12 a 15

horas. El soporte cerámico que se obtiene es llamado *bizcocho* y está dotado de una elevada porosidad. Esta pasta quemada en primera instancia se somete después a la aplicación del esmalte cerámico, para finalmente pasar al segundo quemado con temperaturas de cocción del orden de 950°C con ciclos de 8 a 12 horas.

## ➤ PROCESO DE MONOCOCCIÓN

En el proceso de monococción el esmalte se aplica directamente sobre la pasta prensada y cruda, para posteriormente quemarse con temperaturas de cocción de 1,120 a 1,170 °C, en ciclos que varían de 35 a 45 minutos. Durante muchos años ha existido la controversia acerca de cuál de los dos métodos es mejor. En realidad, teniendo la formulación adecuada tanto del cuerpo como del esmalte, y observando un rígido control de todas las etapas de fabricación, es posible producir un buen azulejo con cualquiera de los dos métodos. Actualmente es más usado el proceso de monococción, el cual ofrece ciclos de menores tiempos que los utilizados en el proceso de bicocción. Además, junto a la economía del proceso de monococción va unida una gran facilidad para la automatización de los diferentes procesos de fabricación, con el consiguiente resultado en la reducción de costos.

Los pavimentos y revestimientos cerámicos se obtienen preparando una composición de materias primas depuradas, formada por silicatos aluminicos, siendo las composiciones diferentes para el caso de los pavimentos y revestimientos cerámicos en pasta roja o en pasta blanca. Estas composiciones se someten a un tratamiento de molienda vía seca o vía húmeda, hasta una granulometría muy fina, seguida por una granulación o un secado por atomización posterior para conseguir un granulado de características definidas (tamaño, forma, densidad aparente, fluidez, etc.). El polvo granulado es la base para la consecución del producto cerámico y su homogeneidad garantiza la constancia en las propiedades físicas de estos materiales. El granulado se alimenta a una prensa oleodinámica que ejerce una presión de compactación del material de 60 a 280 bares; en esta prensa la pieza toma la forma y espesor elegidos, para lo cual se dispone de moldes metálicos de gran exactitud dimensional. Posteriormente se realiza

el secado de las piezas conformadas y se esmaltan con varias capas de esmaltes de composición diversa y con decoraciones opcionales según el modelo a elegir. Una vez realizada la etapa de esmaltado y decoración de las piezas, éstas se introducen en un horno para su cocción en ciclos más o menos rápidos y temperaturas altas según el tipo de productos a fabricar. Las temperaturas máximas dependen del tipo de producto que se desee conseguir.

El esmalte cerámico y la decoración dan a los azulejos su belleza y las características técnicas superficiales deseadas: en el caso de los revestimientos cerámicos son la impermeabilidad, resistencia a los detergentes, etc., mientras en el caso de los pavimentos cerámicos son su resistencia a la abrasión, resistencia a los ácidos, resistencia al rayado, etc. La tecnificación, la exigencia del control de proceso, el cuidadoso diseño adecuado para las necesidades de cada ambiente y el esmero en la clasificación, dan como resultado un producto de características homogéneas y de conformidad a las exigencias de uso.<sup>7</sup>

## **1.5 LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA**

Durante siglos los arroyos y los ríos han sido un lugar cómodo para verter desechos. Esa práctica no planteaba problemas cuando había pocos habitantes en el mundo y la industria y la agricultura eran primitivas, pero las condiciones cambiaron cuando las ciudades empezaron a crecer y se sucedieron las revoluciones en la industria y la agricultura. Hoy la contaminación del agua proviene de muchas fuentes diferentes, a menudo en grandes volúmenes. Algunas de las formas que reviste esa contaminación son las aguas residuales no tratadas, los desechos industriales, los escapes de tanques de almacenamiento de petróleo, el drenaje de minas y la lixiviación de minería y el drenaje de los residuos de fertilizantes y plaguicidas agrícolas. La gravedad de la contaminación del agua varía de una región a otra en función de la densidad de la urbanización, de las prácticas agrícolas e industriales y de la presencia o la ausencia de sistemas de colecta y tratamiento de aguas residuales.

En la mayoría de los países en desarrollo (pobres, mal administrados) las aguas residuales no tratadas desembocan en el cuerpo de agua más próximo, lo que antes también solía ocurrir en los países desarrollados. Pero en los últimos 50 años, mayormente debido a la presión pública, los gobiernos han impuesto reglamentos para proteger sus recursos hídricos nacionales. En ellos se estipula que las aguas residuales deben ser adecuadamente procesadas, de modo que el agua residual obtenida después del tratamiento corresponda a normas que aseguren una repercusión mínima sobre las aguas receptoras. Dichos sistemas hasta permiten la reutilización del agua en varias cuencas fluviales sucesivas, como existen casos en Europa y en América del Norte. Sin embargo, los sedimentos de los ríos y los vertederos de desechos mineros encierran un legado de contaminación pasada que seguirá acechando al mundo desarrollado durante muchos años más.

En México, el gobierno implementó la *LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE (L.G.E.E.P.A)* para la realización de los actos de vigilancia y comprobación de las obligaciones que los preceptos jurídicos aplicables les imponen a los gobernados, los que en alguna forma participan en la afectación del medio ambiente. Dicha ley existió hasta el 31 de mayo de 1995, pero a partir del día 1° de junio del mismo año, entró en vigor una nueva ley denominada específicamente: *LEY FEDERAL DE PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO (L.F.P.A)*, la cual expresa que a partir de la fecha de su vigencia, quedan DEROGADAS todas las disposiciones de las leyes federales que se opongan a los preceptos de la nueva ley. El propósito del legislador fue amalgamar en una sola ley TODO EL PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO que se utiliza en el ámbito federal, para manejar bajo un solo criterio y sistema, todos los actos y procedimientos de relación jurídica entre la Administración Pública Federal y las empresas

Los escapes de metales pesados como el plomo, mercurio, plata y cromo – que son sumamente tóxicos para la vida acuática – son uno de los problemas heredados. Algunos de esos metales son ingeridos por los peces y luego consumidos por las personas.

La historia de la contaminación en el mundo desarrollado es un modelo del panorama probable en otras zonas. Por ejemplo, la eutroficación, causada por la

abundancia de fósforo y nitrógeno en los caudales, que afectó primero a los lagos de Europa y América del Norte en el decenio de 1950, se ha extendido a todos los continentes. Los elevados niveles de nitrato en las aguas superficiales y subterráneas, asociados a la agricultura de explotación intensiva y a los altos índices de aplicación de fertilizantes, también se ha generalizado.

Muchos de los cerca de 100 mil productos químicos comerciales empleados hoy en el mundo crean dificultades si pasan a los ecosistemas acuáticos, como sucede con los derrames accidentales. Otra serie de problemas se genera debido a los materiales transportados por la atmósfera; éstos tienen su origen en las emisiones procedentes de zonas industriales y de automóviles. Los efectos de la lluvia ácida en el medio ambiente acuático son obvios en Europa y en América del Norte desde hace algún tiempo y se están volviendo evidentes en otras partes del mundo. A mediano y largo plazo la contaminación del agua dulce se convertirá en contaminación del mar. Un 80% de la contaminación marina proviene de la tierra, de modo que la salud del medio ambiente marino depende del estado de nuestros ríos.<sup>8</sup>

### **1.5.1 TIPOS DE CONTAMINANTES**

Los contaminantes se comportan de diferentes maneras cuando se agregan al agua. Los materiales menos estables (entre los que se incluyen a la mayoría de las sustancias orgánicas, algunas sustancias inorgánicas y muchos microorganismos) se degradan mediante los procesos naturales de autopurificación, de modo que sus concentraciones se reducen con el tiempo. La rapidez de descomposición de estos materiales depende de cada contaminante en particular, de la calidad del agua receptora, de la temperatura y de otros factores ambientales. Los procesos naturales no afectan a muchas sustancias inorgánicas, por lo que las concentraciones de estos contaminantes más estables sólo se puede reducir por dilución o ser retenidos en plantas de tratamiento de aguas. La presencia de estos contaminantes más persistentes limita severamente el uso de un cuerpo de agua como fuente de abastecimiento.

Además de tener presente su clasificación de acuerdo a sus características de estabilidad, es importante conocer las siguientes propiedades de los contaminantes:

1 Compuestos tóxicos que causan la inhibición o hasta destrucción de la actividad biológica en el agua. La mayoría de estos materiales provienen de las descargas industriales e incluyen: metales pesados como residuo de las operaciones de acabado y cromado de metales, repelentes de polilla utilizados en la manufactura de textiles, plaguicidas en general, etc. Algunas especies de algas pueden liberar toxinas potentes y se han dado casos en los que el ganado muere después de beber agua con ese tipo de toxinas.<sup>9</sup>

2 Materiales que afectan el balance de oxígeno en el agua.

- Sustancias que consumen oxígeno; éstas pueden ser materiales orgánicos que se oxidan bioquímicamente o agentes reductores inorgánicos.
- Sustancias que entorpecen la transferencia de oxígeno a través de la interfase aire – agua. Los aceites y los detergentes pueden formar películas obstructoras en la interfase, las que reducen la transferencia de oxígeno desde la superficie en contacto con el aire y amplifican los efectos de sustancias que consumen oxígeno.
- La contaminación térmica puede alterar el balance de oxígeno debido a que la concentración de saturación de OD se reduce con el aumento en la temperatura.<sup>9</sup>

3 Los sólidos inertes en suspensión o disueltos causan problemas a altas concentraciones, por ejemplo en los lavados de kaolín china pueden llegar a recubrir el lecho de una corriente, lo que impide el crecimiento del alimento para los peces y los ahuyenta de las inmediaciones en forma tan efectiva como lo haría un veneno. La descarga de agua salobre por el drenaje de las minas puede hacer que un río sea inadecuado para propósitos de abastecimiento de agua.<sup>9</sup>

## **1.5.2 LA PROTECCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS**

El agua constituye una parte esencial de todo ecosistema, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Una reducción del agua disponible ya sea en la cantidad, en la calidad, o en ambas, provoca efectos negativos graves sobre los ecosistemas. El medio ambiente tiene una capacidad natural de absorción y de autolimpieza, sin embargo,

si se la sobrepasa, la biodiversidad se pierde, los medios de subsistencia disminuyen, las fuentes naturales de alimentos se deterioran y se generan costos de limpieza extremadamente elevados. Los daños ambientales originan un incremento de los desastres naturales, pues las inundaciones aumentan allí donde la deforestación y la erosión del suelo impiden la neutralización de los efectos del agua. El drenaje de humedales para la agricultura, de los que se perdió el 50% durante el siglo veinte, y la disminución de la evapotranspiración, por desmonte de tierras, causan otras perturbaciones en los sistemas naturales con graves repercusiones sobre la futura disponibilidad del agua. Son las poblaciones más pobres las que resultan más perjudicadas, no sólo porque viven en zonas marginales propensas a inundación, contaminadas y con escaso suministro de agua, sino además porque pierden valiosas fuentes naturales de alimentos. En la Tabla 1.1 se resumen las presiones a las que los ecosistemas de agua dulce están sujetos y los efectos probables sobre los sistemas en peligro.<sup>10</sup>

**Tabla 1.1** *Presiones que sufren los ecosistemas de agua dulce.*

ACTIVIDAD HUMANA	EFFECTO POTENCIAL	FUNCIÓN EN PELIGRO
Crecimiento demográfico y del consumo	Aumenta la extracción de agua y la adquisición de tierras cultivadas mediante el drenaje de humedales; aumenta la necesidad de todas las demás actividades, con los riesgos consiguientes.	Prácticamente, todas las funciones del ecosistema, incluyendo funciones de hábitat, producción y regulación.
Desarrollo de infraestructura (presas, canales, diques, desvíos, etc.)	La pérdida de integridad altera el ritmo y la cantidad de las corrientes fluviales, la temperatura del agua y el transporte de nutrientes y sedimentos, y como resultado el rellenado del delta bloquea las migraciones de peces.	Cantidad y calidad del agua, hábitats, fertilidad de la llanura de inundación, pesquerías, economías del delta.

**Tabla 1.1** *Continuación*

ACTIVIDAD HUMANA	EFECTO POTENCIAL	FUNCIÓN EN PELIGRO
Conversión de tierras	Elimina componentes clave del entorno acuático; pérdida de funciones; integridad; hábitat y biodiversidad; altera pautas de escurrimiento; inhibe la recarga natural, rellena de limo los cuerpos de agua.	Control natural de inundaciones, hábitats para pesquerías y aves acuáticas, recreo, suministro de agua, cantidad y calidad del agua.
Exceso de cosecha y explotación	Reduce recursos vivos, las funciones del ecosistema y la biodiversidad, agotamiento de aguas subterráneas, colapso de pesquerías.	Producción de alimentos, suministro de agua, calidad y cantidad del agua.
Introducción de especies exóticas	Competencia de especies introducidas; altera producción y ciclos de nutrientes; y causa pérdida de biodiversidad entre especies nativas.	Producción de alimentos, hábitat de fauna y flora, actividades de recreo.
Descarga de contaminantes en tierra, aire o agua	La contaminación de cuerpos de agua altera la química y ecología de los ríos, lagos y humedales; las emisiones de gas invernadero producen notables cambios en los patrones de escurrimiento y precipitación.	Suministro de agua, hábitat, calidad del agua; producción de alimentos; cambio climático puede también repercutir en la energía hidráulica, capacidad de dilución, transporte, control de inundaciones.

En los últimos diez años se ha aceptado la importancia de dos conceptos clave, a saber: que los ecosistemas no sólo poseen su propio valor intrínseco, sino que además proporcionan servicios esenciales al género humano y, en segundo lugar, que la

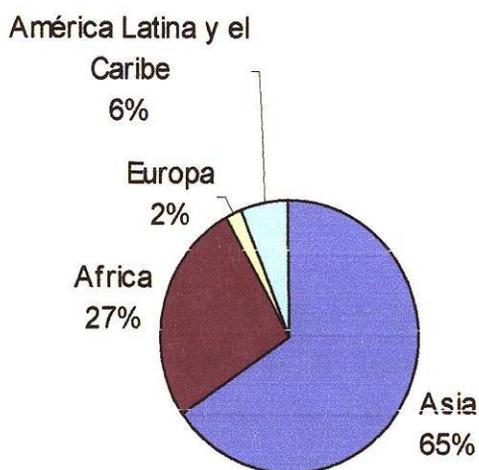
durabilidad de los recursos hídricos requiere una gestión participativa, basada en el ecosistema.

### **1.5.3 LA CALIDAD DEL AGUA Y LA SALUD**

Los padecimientos relacionados con el agua son una de las causas más comunes de enfermedad y de muerte y afectan principalmente a los pobres en los países en desarrollo. Las enfermedades transmitidas por el agua generan padecimientos gastrointestinales, incluyendo la diarrea, los que son causadas por beber agua contaminada; las enfermedades transmitidas mediante algún vector, por ejemplo la malaria o la esquistosomiasis, provienen de insectos y caracoles que se reproducen en ecosistemas acuáticos; las enfermedades que desaparecen con el agua, por ejemplo la sarna o el tracoma, están causadas por bacterias o parásitos adquiridos cuando no se dispone de suficiente agua para la higiene básica (lavado de ropa, ducha, etc.). En el año 2000, la tasa de mortalidad estimada por diarreas relacionadas con la falta de sistemas de saneamiento o de higiene y por otras enfermedades relacionadas con el saneamiento del agua (esquistosomiasis, tracoma, infecciones intestinales por helmintos) fue de 2,213,000 personas. Según una estimación, la malaria fue responsable del deceso de un millón de individuos. Más de 2,000 millones de personas quedaron infectadas en el mundo por esquistosomas y helmintos transmitidos por el suelo, de las cuales 300 millones sufrieron una enfermedad grave. La mayoría de los afectados por mortalidad y morbilidad relacionadas con el agua son niños menores de cinco años. La tragedia es que el peso de estas enfermedades es en gran parte evitable.

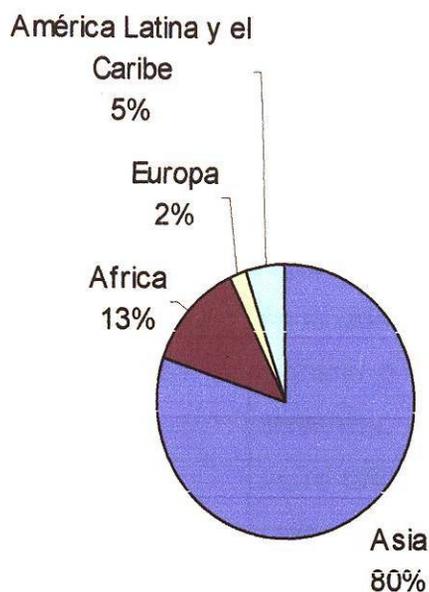
Las vacunas contra la mayor parte de las enfermedades relacionadas con el agua, incluyendo la malaria, el dengue y las infecciones gastrointestinales, son inexistentes. La resistencia a los insecticidas ha socavado la efectividad de los programas de control de los vectores de enfermedades y la resistencia de las bacterias ante los antibióticos y de los parásitos ante otros fármacos es creciente. Sin embargo, a nivel doméstico, el acceso a agua potable salubre, el saneamiento que impida que los contaminantes alcancen las fuentes del agua potable, además de lavarse las manos y de una cuidadosa manipulación de los alimentos, constituyen instrumentos clave en la lucha contra las enfermedades gastrointestinales. Por otro lado, la mejora de las prácticas de

gestión del agua podría reducir considerablemente las enfermedades transmitidas por vector. Actualmente 1,100 millones de personas carecen de instalaciones necesarias para abastecerse de agua y 2,400 millones no tienen acceso a sistemas de saneamiento. En el círculo vicioso de la pobreza y la enfermedad, el agua y el saneamiento insuficientes constituyen a la vez la causa y el efecto: aquellos que no disponen de un suministro de agua suficiente y alcanzable son, invariablemente, los más pobres. Si el abastecimiento de agua y el saneamiento básico fueran ampliados a aquellos que hasta el día de hoy no conocen esos servicios, se estima que la incidencia de diarreas infecciosas se reduciría en 17% anual. Si se llevase a cabo un suministro de agua bien regulado junto con un saneamiento completo, se reduciría la carga en alrededor de 70% por año.<sup>10</sup>



**Figura 1.1** *Abastecimiento de agua, distribución de poblaciones sin servicio*

En las Figuras 1.1 y 1.2 se muestra la proporción de la población, en porcentaje y por regiones del mundo, que carece de abastecimiento de agua y de servicio de saneamiento.



**Figura 1.2** *Saneamiento, distribución de poblaciones sin servicio*

Considerados en su conjunto, los valores mostrados en las Figuras 1.1 y 1.2, estos resultados muestran la necesidad de un cambio de política en los países de ingresos más bajos hacia una mejor gestión de calidad del agua doméstica, una mejora de la higiene individual y familiar, una expansión continuada del abastecimiento de agua y del saneamiento, unido a niveles de servicio que aseguren un suministro confiable y una calidad del agua aceptable.

#### **1.5.4 ENFERMEDADES RELACIONADAS CON LA DEFICIENTE CALIDAD DEL AGUA**

Hay alrededor de dos decenas de enfermedades infecciosas, que se muestran en la Tabla 1.2, en cuya incidencia puede influir el agua. La causa de estas enfermedades puede tener su origen en bacterias, protozoarios o gusanos. Su control y detención tiene

como fundamento la naturaleza del agente causante, aunque es más útil tomar en consideración los aspectos relacionado con el agua en la diseminación de la infección.<sup>9</sup>

**Tabla 1.2** Principales enfermedades en relación con el agua de baja calidad.

ENFERMEDAD	TIPO DE RELACIÓN CON EL AGUA
Cólera, Hepatitis infecciosa, Leptospirosis, Paratifoidea, Tularemia, Tifoidea.	Agua contaminada con heces u orina humana. Agua contaminada que se utiliza en consumo humano o que se utiliza en la preparación de alimentos.
Disentería amibiana, Disentería bacilar, Gastroenteritis.	Agua utilizada para higiene personal, de baja calidad, suministrada en poca cantidad. Contacto directo entre las heces y la boca debido a la falta de higiene por deficiente servicio de agua para aseo.
Ascariasis, Conjuntivitis, Enfermedades diarreicas, Lepra, Sarna, Sepsis y úlcera de la piel, Tiña, Tracoma.	Agua utilizada para aseo personal, de baja calidad y con deficiencias en suministro, es la principal causa de transmisión de estas enfermedades.
Gusano de Guinea, Esquistosomiasis.	Enfermedades que tienen su origen en un patógeno que pasa parte de su ciclo de vida en el agua o en un huésped intermedio que vive en ella.
Paludismo, Oncocercosis, Enfermedad del sueño, Fiebre amarilla.	Propagadas por insectos que se multiplican o se alimentan en agua estancadas.

## **1.6 NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL**

Una de las medidas universales para la protección del medio ambiente incluye que los gobiernos establezcan leyes, reglamentos y normas en materia ambiental. En México se estableció la *LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE* publicada en el diario oficial de la federación el 28 de enero de 1988 y la cual es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I.-** Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar;
- II.-** Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III.-** La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV.-** La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.
- V.-** El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI.-** La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII.-** Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;

**VIII.-** El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;

**IX.-** El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y

**X.-** El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.<sup>11</sup>

También el gobierno mexicano estableció la *LEY DE AGUAS NACIONALES* publicada en el diario oficial de la federación el 1 de diciembre de 1992, la cual define las siguientes disposiciones preliminares:

**ARTICULO 1o.-** La presente ley es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

**ARTICULO 2o.-** Las disposiciones de esta ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que la presente ley señala.<sup>12</sup>

Igualmente el gobierno Mexicano ha establecido *Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Calidad del Agua Residual*, en la Tabla 1.3 se muestran las normas en materia de aguas residuales que actualmente están en vigencia, así como un resumen de la aplicabilidad de cada una de ellas.

**Tabla 1.3** Resumen de las normas oficiales mexicanas, actualmente en vigencia, en materia de calidad del agua residual

NORMA	REGULACION
NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Protección ambiental – lodos y biosólidos – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 LA CRISIS MUNDIAL DEL AGUA**

La Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen a más de 6,000 millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del siglo veintiuno con una grave crisis del agua. Todas las señales parecen indicar que la crisis se está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados. La verdadera tragedia de esta crisis, sin embargo, es su efecto sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres, que sufren el peso de las enfermedades relacionadas con el agua, viviendo en entornos degradados y a menudo peligrosos, luchando por conseguir una educación para sus hijos, por ganarse la vida y por solventar sus necesidades básicas de alimentación.

La crisis pesa así mismo sobre el entorno natural, que cruje bajo la montaña de desechos que se vierten a diario y por el exceso de uso, o uso indebido, que de él se hace, con aparente desinterés por las consecuencias y por las generaciones venideras. En realidad se trata fundamentalmente de un problema de actitud y de comportamiento, problemas en su mayoría identificables y localizables. Actualmente se poseen los conocimientos y la pericia necesarios para abordarlos y se han elaborado excelentes herramienta conceptuales, tales como la equidad y la noción de sustentabilidad. Sin embargo, la inercia de los líderes y la ausencia de una conciencia clara sobre la magnitud del problema por parte de la población mundial, en muchos casos no suficientemente autónoma para reaccionar, resultan en un vacío de medidas correctivas, oportunas y

necesarias y en una incapacidad para infundir a los conceptos de trabajo una resonancia más concreta.

El estado de pobreza de un amplio porcentaje de la población mundial es a la vez síntoma y una causa de la crisis del agua. El hecho de facilitar a los pobres un mejor acceso a un agua mejor gestionada puede contribuir a la erradicación de la pobreza. Al mismo tiempo, una mejor gestión permitirá hacer frente a la creciente escasez de agua per cápita en muchas partes del mundo en desarrollo.

Resolver la crisis del agua es, sin embargo, sólo uno de los diversos desafíos con los que la humanidad se enfrenta en este tercer milenio y ha de considerarse en este contexto. La crisis del agua debe situarse en una perspectiva más amplia de solución de problemas y de resolución de conflictos. Tal como lo ha indicado la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible en 2002: *“Erradicar la pobreza, cambiar los patrones de producción y consumo insostenibles y proteger y administrar los recursos naturales del desarrollo social y económico constituyen los objetivos primordiales y la exigencia esencial de un desarrollo sostenible.”*<sup>10</sup>

Aún así, de todas las crisis, ya sean de orden social o relativas a los recursos naturales con las que se enfrentan los seres humanos, la crisis del agua es la que se encuentra en el corazón mismo de la supervivencia del hombre y del planeta Tierra.

## **2.1.1 EL AGUA DULCE DISPONIBLE EN EL MUNDO**

El agua es uno de los elementos más familiares en el mundo en que vivimos:

- En estado líquido se halla en lagos, ríos y embalses de la superficie terrestre y ocupa los mares y océanos circundantes;
- En estado gaseoso se presenta como vapor en la atmósfera;
- En estado sólido cubre las regiones polares y las montañas más altas, y transforma el paisaje invernal;

- Hay también una enorme cantidad de agua almacenada en el suelo, tanto dentro como debajo de la tierra en las formaciones permeables subyacentes que se llaman acuíferos subterráneos; y
- El agua está presente en la vegetación y en el cuerpo humano, compuesto casi en un 80% de agua.

En el ciclo hidrológico, bajo el efecto del sol, hay agua que se evapora constantemente y pasa a la atmósfera. Parte de ella se transforma en lluvia y en nieve. Algo de esa precipitación se vuelve a evaporar rápidamente en la atmósfera. Una parte se descarga en lagos y ríos a fin de emprender el viaje de regreso al mar. Otra parte se infiltra en la tierra para convertirse en humedad o en agua subterránea. En condiciones naturales, el agua subterránea se abre gradualmente camino para regresar a las aguas superficiales y constituye la principal fuente del caudal fluvial seguro. Los vegetales absorben parte de la humedad del suelo y del agua subterránea en sus tejidos, y liberan una parte en la atmósfera por el proceso de transpiración.

El ciclo hidrológico moviliza enormes cantidades de agua alrededor del mundo. Parte de este movimiento es rápido; una gota de agua permanece un tiempo promedio de aproximadamente 16 días en un río y de unos ocho días en la atmósfera. Pero ese tiempo puede convertirse en siglos para un glaciar y en decenas de miles de años para el agua que atraviesa lentamente en un profundo acuífero. Las gotas de agua se reciclan continuamente, acarreando con ellas sedimentos, entre miles de toneladas por día en un río como el Ganges y cantidades apenas mensurables en un acuífero.

Gran parte del agua de la Tierra es poco apta para el consumo humano pues el 97.5% es agua salada, por lo que se dispone solo de 2.5% de agua dulce. En la Tabla 2.1 se muestra la disponibilidad mundial de agua dulce.

Estos son los principales componentes de los recursos hídricos de la Tierra, alimentados por la precipitación y por el agua de deshielo de los glaciares en algunas zonas, y completados por el rocío y el goteo de niebla en ciertos lugares. En todas partes se agotan por evaporación y transpiración. En muchas cuencas fluviales, las presas aumentan el volumen de agua almacenada, al igual que los acuíferos recargados

artificialmente, mientras que el agua de mar desalada en las inmediaciones del mar añade una minúscula fracción de agua dulce. Debido a las variaciones en el ciclo hidrológico de un lugar a otro y de un día otro, esos recursos hídricos no son constantes ni mucho menos se distribuyen equitativamente en las regiones de la Tierra. No obstante, ellos son los recursos potencialmente aprovechables y por eso son valiosísimos para la humanidad.

**Tabla 2.1** *Disponibilidad mundial de agua dulce.*

TIPO DE AGUA Y FUENTE	DISPONIBILIDAD EN %
Agua salada en los océanos, no disponible para consumo humano.	97.6 %
Agua dulce en casquetes polares y en glaciares, y en aguas subterráneas profundas, no es de fácil explotación para el consumo humano.	2.24 %
Agua dulce fácilmente accesible para el consumo humano, en ríos, lagos, acuíferos pocos profundos y embalses.	0.26 %

Empleando los datos existentes, los hidrólogos han realizado algunas estimaciones del caudal medio anual de todos los ríos del mundo, que son como guías sobre la suma de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Tierra, es decir el límite finito de los recursos de agua en el mundo. Esos caudales medios oscilan entre 35,000 y 50,000 kilómetros cúbicos por año. Sólo alrededor de un tercio del recurso potencial, probablemente unos 12,500 kilómetros cúbicos por año, se pueden aprovechar para las necesidades de las personas, proporción que va disminuyendo a medida que aumenta la contaminación.<sup>8</sup>

Los recursos de agua dulce se ven reducidos por la contaminación. Unos 2 millones de toneladas de desechos son arrojados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas, fertilizantes, pesticidas y residuos de pesticidas. Aunque los datos confiables sobre la extensión y gravedad de la contaminación son incompletos, se estima que la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1,500 kilómetros cúbicos.

Las actividades humanas modifican el ciclo hidrológico y pueden contaminar seriamente el agua disponible. La supresión de árboles y vegetación, la variación en la utilización de la tierra, la expansión de las zonas pavimentadas, la construcción de presas y canales, las transferencias entre cuencas, la irrigación y el drenaje, y muchas otras actividades modifican el balance hidrológico en el planeta Tierra. El cambio climático en el mundo también afecta a los recursos hídricos disponibles, se estima que éste será el responsable de alrededor del 20% del incremento de la escasez global del agua.

### **2.1.2 LOS USOS DEL AGUA**

En contraste con el recurso hídrico que va disminuyendo, la demanda mundial de agua está aumentando. Se estima que esta última ha aumentado seis o siete veces desde 1900 a 1995, más del doble del ritmo del crecimiento demográfico. Es un aumento que probablemente se acelere en el futuro, porque se prevé que la población mundial alcanzará 8,300 millones en el año 2025 y entre 10,000 y 12,000 millones de personas en 2050. De la demanda global de agua, que se estima actualmente en unos 4,000 kilómetros cúbicos por año, probablemente más del 80% corresponde a la agricultura, en su mayor parte para irrigación. Pero cantidades significativas de agua se emplean en la industria, para la producción de energía y para muchos otros fines, así como para uso doméstico. En la Figura 2.1 se muestra la demanda mundial de agua.

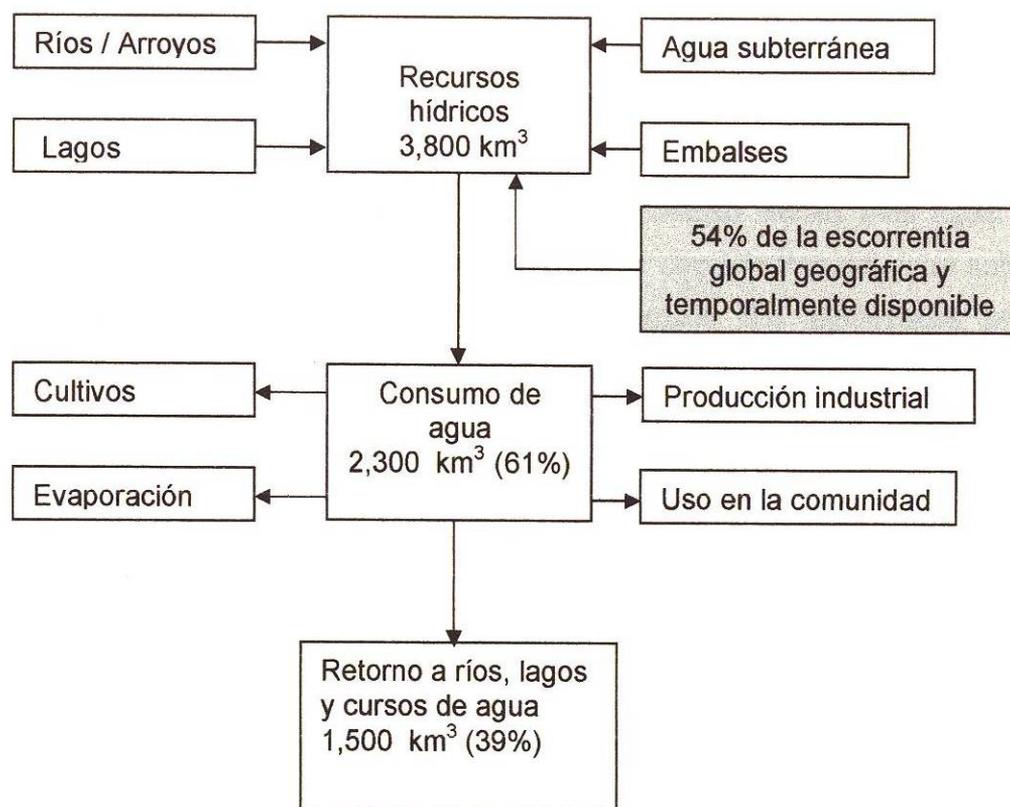


Figura 2.1 Recursos hídricos mundiales y consumo.

Para satisfacer la demanda de agua, la humanidad ha venido modificando el ciclo hidrológico desde los albores de la historia mediante la construcción de pozos, embalses, acueductos, sistemas de abastecimiento de agua, sistemas de drenaje, planes de irrigación e instalaciones similares. Los gobiernos y las entidades públicas gastan sumas importantes de dinero para diseñar y mantener esas instalaciones. Una manera de hacerlo es a través de iniciativas como la del Decenio Internacional del Agua Potable y del Saneamiento Ambiental, que tenía por finalidad mejorar los sistemas de abastecimiento de agua en el mundo en desarrollo. A pesar de esas iniciativas, en 1995 un 20% de los 6,000 millones de habitantes que componen la población mundial carecía todavía de un abastecimiento fiable de agua segura mientras que más del 50% no tenía servicios sanitarios adecuados.<sup>8</sup>

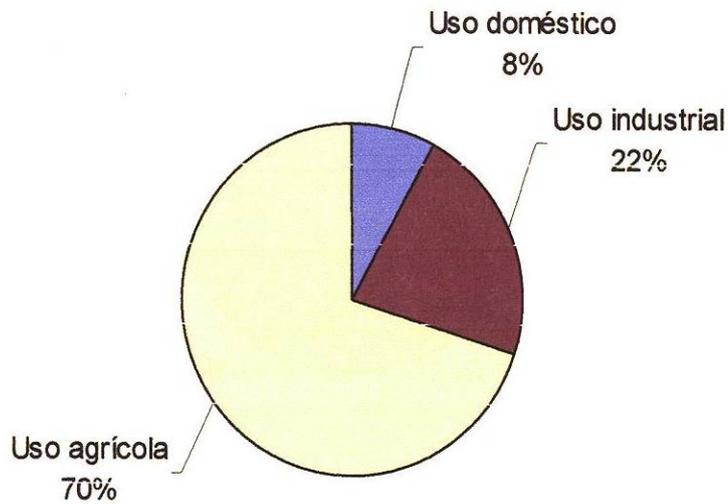
Las crecientes demandas de agua están ocasionando problemas de recursos hídricos en muchas partes del mundo, y como se extrae tanta agua de algunos ríos, su caudal disminuye aguas abajo y los lagos se encogen. Durante los períodos secos gran parte del caudal de muchos ríos está constituido por aguas residuales. Los niveles de agua subterránea en algunos acuíferos han bajado decenas de metros a causa de bombeo excesivo, con lo cual resulta más difícil y costoso extraer más agua. Esto ha traído consigo la subsidencia del terreno. Los niveles decrecientes del agua subterránea han reducido el caudal en tiempo seco de numerosos ríos alimentados por aguas subterráneas y han hecho que algunos desaparezcan completamente. Se está bombeando más agua de algunos acuíferos de la que se renueva mediante la recarga natural debida a la precolación del agua lluvia o de deshielo. Esto es grave para las islas pequeñas porque da lugar a la intrusión de agua salada. Es igualmente grave en zonas áridas donde los acuíferos contienen aguas “fósiles” y no existe ninguna posibilidad de recarga en las condiciones climáticas actuales.<sup>8</sup>

A mediados del presente siglo, 7,000 millones de personas en 60 países sufrirán escasez de agua, en el peor de los casos, y en el mejor se tratará de 2,000 millones de personas en 48 países.<sup>10</sup>

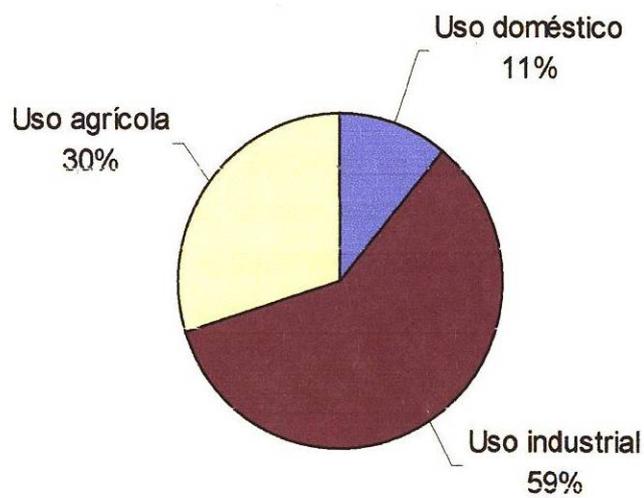
La industria, que es un motor esencial del crecimiento económico y elemento crítico para la consecución de metas de desarrollo, requiere recursos suficientes de agua de buena calidad como materia prima básica. Se estima que el uso anual global por parte de la industria aumente de una cantidad de 725 kilómetros cúbicos en 1995 a unos 1,170 kilómetros cúbicos en el 2025. El uso industrial representará entonces un 24% del consumo total de agua. Gran parte de este aumento se llevará a cabo en aquellos países en desarrollo que se encuentran actualmente en fase de crecimiento industrial acelerado.<sup>10</sup>

El aumento previsto de la demanda industrial de agua podrá ser atendido solamente si se articulan dos elementos: una oferta correctamente analizada y una gestión racional de la demanda, tanto en el sector público como en el privado. La demanda juega un importante papel en cuanto a la eficiencia del agua utilizada en los procesos industriales y en la disminución de la carga contaminante de efluentes vertidos

por la industria. En la Figura 2.2 se muestran los usos alternativos del agua según el nivel de ingreso de los países.

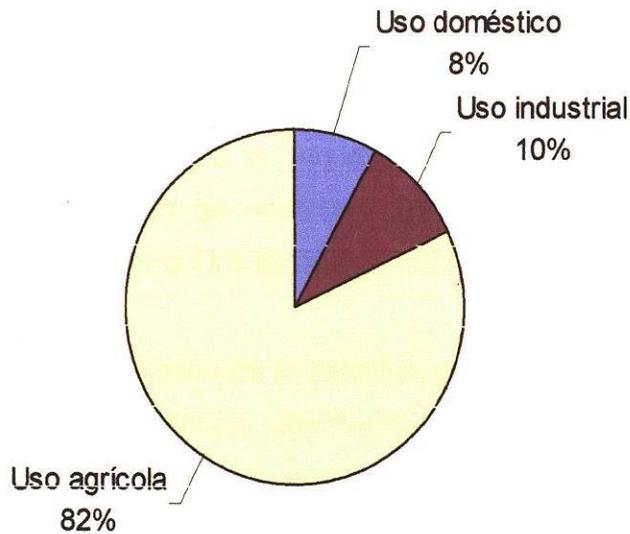


Usos alternativos del agua en el mundo



Usos alternativos del agua en países de ingresos elevados

Figura 2.2 Usos alternativos del agua



Usos alternativos del agua en países de ingresos medios y bajos

Figura 2.2 Continuación

El uso industrial del agua aumenta según el nivel de ingresos del país, variando desde el 10% en países de ingresos medios y bajos hasta el 59% en países de ingresos elevados.

La utilización del agua en los procesos de fabricación, a menudo en grandes cantidades, es muy común (para lavar, cocinar, enfriar, etc.); luego de su uso se devuelve a los sistemas locales. Ahora bien, el agua vertida por las industrias puede ser de muy mala calidad y, a no ser que se la trate de forma adecuada, es una amenaza para las aguas superficiales y subterráneas en las que se vierte. La industria puede constituir una amenaza crónica debido al vertido constante de efluentes, o bien una amenaza crítica si, por un fallo accidental, se genera una contaminación intensa en un período corto. Por otro lado, la emisión hacia la atmósfera de contaminantes orgánicos persistentes, por ejemplo, puede contaminar aguas muy alejadas de los centros industriales.

En vista de estos problemas y a fin de hacer frente a ellos, muchos países han adoptado el principio por el cual “el que contamina paga” o de precaución, pero por otro lado suelen ser renuentes a obstaculizar el rendimiento industrial o económico o bien simplemente carecen de recursos para controlar y hacer cumplir los reglamentos. Esto va unido, en muchos países de ingresos medios y bajos, a una falta de conocimiento por parte de los gerentes de cómo se utiliza el agua en sus empresas y al uso de tecnología obsoleta, ineficiente o poca apropiada. Estos factores constituyen serios obstáculos para una gestión eficiente del uso del agua en industria. La mayor parte de los efluentes vertidos de muchas industrias son de materias primas en exceso, que podrían ser captados y reutilizados, reduciendo así los insumos y los costos.

Se fomenta así la participación de la industria, por un lado, y se rompe por otra parte el paradigma imperante que vincula crecimiento industrial con daño ambiental. La formación en materia de gestión de la demanda, combinada con la transferencia de tecnología, beneficiaría al medio ambiente y mejora el rendimiento económico de las industrias.<sup>10</sup>

### **2.1.3 DESAFÍOS MUNDIALES EN TORNO AL AGUA**

En los últimos veinticinco años se han organizado varias grandes conferencias mundiales sobre el agua. En el año 2003 se celebró el tercer Foro Mundial del Agua (en Japón) y también éste fue declarado como el Año Internacional del Agua Dulce. Estas conferencias, las reuniones que las precedieron y los debates subsiguientes, han modificado la percepción mundial de la crisis del agua y ampliado la comprensión de las respuestas necesarias a la crisis. La conferencia de Mar del Plata de 1977 marcó el comienzo de una serie de actividades globales en torno al agua. Entre ellas, el Decenio Internacional de Agua Potable y Saneamiento (1,981-1,990) aportó una ampliación substancial del suministro de servicios básicos para las poblaciones pobres. Estas experiencias han mostrado, por comparación, la magnitud de la tarea a realizar, a saber, la necesidad de efectuar una enorme expansión en el suministro básico de agua y de servicios sanitarios para cubrir los requisitos actuales y los del futuro próximo.

La conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente de Dublín, en 1,992, estableció cuatro principios que siguen siendo válidos:

- Principio No. 1: “El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.”
- Principio No.2: “El aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles.”
- Principio No.3: “La mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, la gestión y la protección del agua.”
- Principio No.4: “El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico.”

La Declaración Ministerial de La Haya de Marzo del año 2000 aprobó desafíos como base de la acción futura, así como normó los criterios de seguimiento para controlar el progreso realizado:

1. Cubrir las necesidades humanas básicas, asegurar el acceso al agua y a servicios de saneamiento en calidad y cantidad suficientes.
2. Asegurar el suministro de alimentos, sobre todo para las poblaciones pobres y vulnerables, mediante un uso más eficaz del agua.
3. Proteger los ecosistemas asegurando su integridad a través de una gestión sostenible de los recursos hídricos.
4. Compartir los recursos hídricos, promoviendo la cooperación pacífica entre diferentes usos del agua y entre Estados, a través de enfoques tales como la gestión sostenible de la cuenca de un río.

5. Administrar los riesgos, ofrecer seguridad ante una serie de riesgos relacionados con el agua.
6. Valorar el agua, identificar y evaluar los diferentes valores del agua (económicos, sociales, ambientales y culturales) e intentar fijar su precio para recuperar los costos de suministro del servicio teniendo en cuenta la equidad y las necesidades de las poblaciones pobres y vulnerables.
7. Administrar el agua de manera responsable, involucrando a todos los sectores de la sociedad en el proceso de decisión y atendiendo a los intereses de todas las partes.
8. El agua y su relación con la industria; promover una industria más limpia y respetuosa de la calidad del agua y de las necesidades de otros usuarios.
9. El agua y la energía; evaluar el papel fundamental del agua en la producción de energía para atender las crecientes demandas energéticas.
10. Mejorar los conocimientos básicos de manera que la información y el conocimiento sobre el agua sean más accesibles para todos.
11. El agua y las ciudades; tener en cuenta las necesidades específicas de un mundo cada vez más urbanizado.<sup>10</sup>

En la Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible, en 2002, el Secretario General de las Naciones Unidas, Kofi Annan, identificó los cinco grandes temas: Agua y saneamiento, Energía, Salud, Agricultura y Biodiversidad, como parte integrante de un enfoque internacional coherente del desarrollo sostenible. El agua es esencial en cada una de estas áreas clave.

#### **2.1.4 LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA DE MODO RESPONSABLE PARA ASEGURAR EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

La crisis del agua es esencialmente una crisis de gestión de los asuntos públicos o, en otras palabras, de gobernabilidad. Los errores de gobernabilidad del agua han obstaculizado con frecuencia el avance hacia un desarrollo sostenible y hacia el necesario equilibrio entre necesidades socioeconómicas y la salud ecológica duradera.

Entre las diversas razones del lento avance se pueden incluir las siguientes: la preocupación por la reducción de la deuda y el déficit; la reducida inversión en servicios de infraestructura relacionados con el medio ambiente, es decir, concentración en un crecimiento económico que atribuye la responsabilidad sobre el agua a niveles inferiores de gobierno, carentes de recursos y de capacidad de obrar. Adopción por parte del gobierno de un enfoque de tipo sector privado, sin consultar a los usuarios y sin mecanismos apropiados de participación pública en la toma de decisiones. Aunque el avance es lento, se han hecho sin embargo esfuerzos para introducir las reformas necesarias, sobre todo en las tres esferas siguientes:

1. Reconocimiento de que es preciso contar con una gestión sólida y coherente de los recursos hídricos, que es necesario reformar la política del agua y las instituciones, que es importante aplicar las leyes y la reglamentación, lo cual es esencial para asegurar un desarrollo sostenible del agua;
2. La reforma de instituciones y políticas relacionadas con el agua se está llevando a cabo actualmente en muchos países, pero el avance es lento y limitado;
3. Aplicación de la gestión integrada de los recursos hídricos, enfoque que es aceptado en principio, pero que se pone en práctica parcialmente, tanto en los países en desarrollo como en los países desarrollados.<sup>10</sup>

No obstante, no es suficiente únicamente la reforma del sector del agua. La problemática del agua es compleja y trasciende este sólo sector. En el ámbito del desarrollo macroeconómico y la demografía, por ejemplo, se debería tener en cuenta el impacto y efectos de las decisiones en los recursos hídricos y en sus utilizaciones.

## 2.2 EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PISOS Y AZULEJOS

El proceso de fabricación de pisos y azulejos esta formado por varias etapas las cuales deben ser controladas bajo parámetros exigentes de calidad e ingeniería para poder obtener un producto de buena calidad. A continuación se describen, en orden de ejecución, los pasos del proceso para la fabricación de pisos y azulejos, el cual se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 2.3; las etapas del proceso resaltadas en casillas rojas indican los puntos de generación de polvos.

### ➤ PRIMERA ETAPA: ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA

La materia prima que se ha de llevar al proceso es almacenada a cielo abierto. Allí mismo se mezclan las cantidades adecuadas de materia prima con la finalidad de preparar las *fórmulas de cuerpo rojo y de cuerpo blanco*, cuyas proporciones se indican en la Tabla 2.2 y en la Tabla 2.3 respectivamente. La fórmula de cuerpo rojo se utiliza en la fabricación de pisos y la fórmula de cuerpo blanco en la fabricación de azulejos.

**Tabla 2.2** *Fórmula utilizada en la preparación del cuerpo rojo.*

COMPUESTO	% EN PESO
Barro amarillo	35-45
Caolín Rosalía	10
Barro Margarita	10
Arcilla PRE-300	10
Arcilla Feldespática	25-35
Desperdicio cocido	8
ADITIVOS	
Tripolifosfato	10
KD-30	30

**Tabla 2.3** *Fórmula utilizada en la preparación del cuerpo blanco.*

COMPUESTO	% EN PESO
Caolín Blanco	24-30
Caolín Rosalía	35-45
PRE-150	5
CaCO <sub>3</sub>	6
PRE-200	12
Desperdicio cocido	8
ADITIVOS	
Tripolifosfato	35
Reflex	7.5

➤ SEGUNDA ETAPA: *MOLIENDA O MOLTURACIÓN*

Cuando se habla de la molturación de sólidos se entiende toda una serie de operaciones tendientes a la reducción de las dimensiones de la materia prima, que van desde la premolturación hasta una pulverización. La molturación no tiene por objeto la simple obtención de pequeñas partículas de tamaño menos grueso que el de partida, sino producir un material con un determinado diámetro medio de partículas y una distribución granulométrica adecuada para el producto que se desea obtener. En general, los objetivos finales del proceso de reducción de las dimensiones de los sólidos son variados, pero se puede afirmar que el aumento de la superficie específica del material permite la obtención de una elevada homogeneidad de las masas y además la obtención de reacciones químicas más completas en tiempos breves.<sup>13</sup>

Las acciones desarrolladas durante la molturación son: compresión simple (aplastamiento), percusión (del instrumento de la máquina sobre el material), choque (del material sobre la parte apropiada de la máquina), abrasión y corte o cizallado. La molturación de las materias primas componentes de las pastas cerámicas se realiza normalmente por vía seca o con una tecnología en húmedo. En líneas generales se

puede afirmar que la molturación en húmedo viene caracterizada por una reducción muy rápida de los materiales componentes de la mezcla y por una mejor homogeneización, mientras la tecnología de molturación en seco puede ser utilizada cuando se dispone de materias primas extremadamente puras o cuando se desea producir materiales de calidad no excesivamente elevada o de bicocción en general. La molienda en seco se lleva a cabo en cuatro molinos Raymond, mientras que la molienda en húmedo se efectúa en cinco molinos de bolas Alsing, en los cuales se hace la molturación de las fórmulas ya preparadas.

### ➤ TERCERA ETAPA: *MEZCLADO CON AGUA*

Una vez que el material ha sido molido se mezcla con agua para convertirlo en una pasta llamada *BARBOTINA* cuyas características de color y fluidez son específicas para cada producto deseado. Se preparan dos tipos de barbotinas, las de cuerpo blanco para la producción de azulejos y la de cuerpo rojo para la producción de pisos. Las barbotinas son suspensiones que muestran ciertas características importantes para su manipulación y la calidad del producto final. Entre estas propiedades se encuentran la densidad y la viscosidad.

Algunos puntos básicos que deberán tenerse en cuenta en la preparación de la barbotina son: posibilidad de defloculación de la barbotina, búsqueda del fluidificante, o mezcla de ellos, más eficaces para deflocular la barbotina, estudio de la curva de defloculación para establecer el intervalo de viscosidad óptima para el atomizado, cálculo para determinar el punto económicamente más rentable comprendido en el intervalo de viscosidad óptima y el estudio de la curva de defloculación para establecer el intervalo de viscosidad óptima. La serie de datos suministrados por estas determinaciones permite la valoración de las mejores condiciones para atomizar del modo más correcto técnica y económicamente.<sup>13</sup>

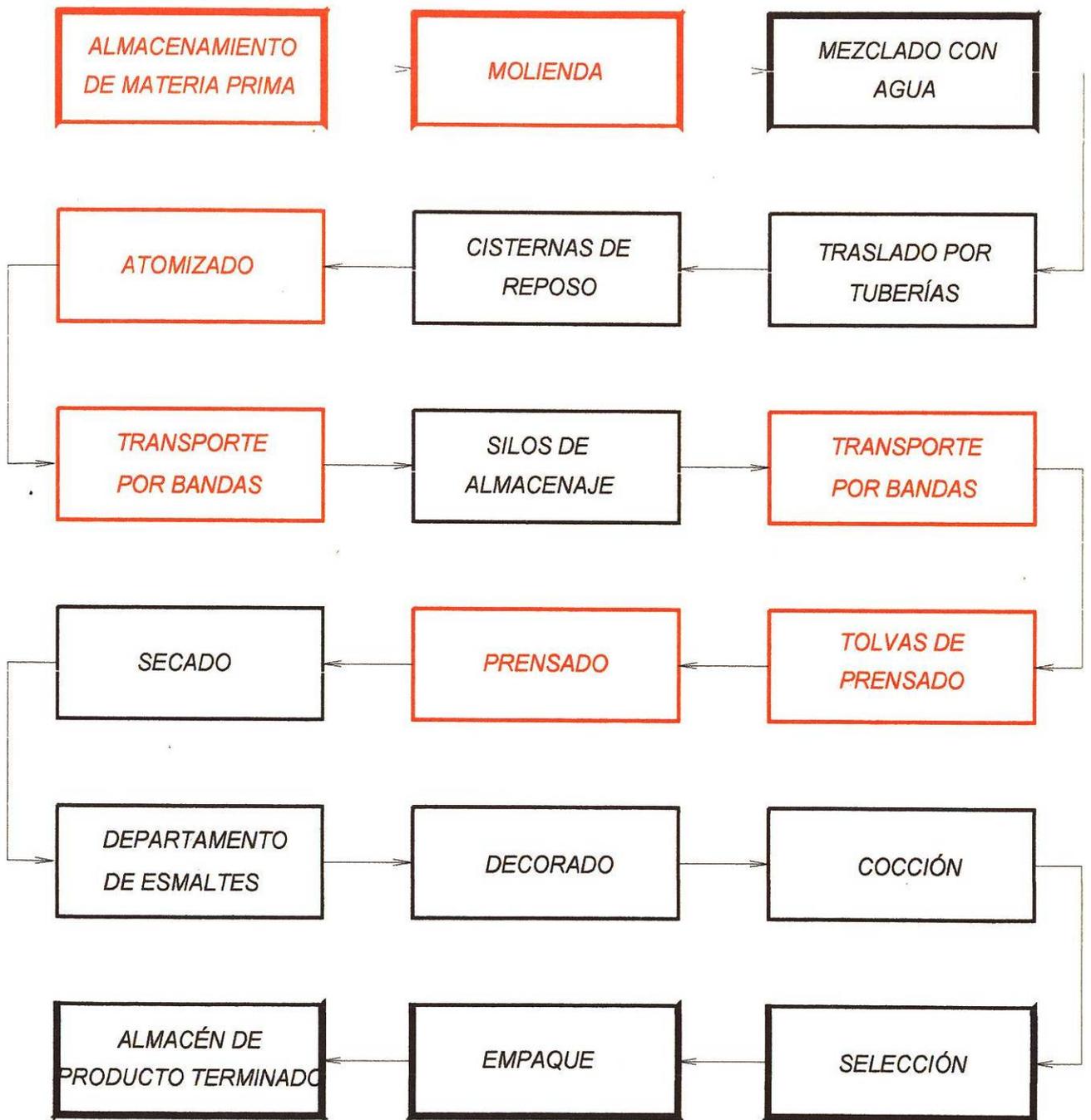


Figura 2.3 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de azulejos y pisos cerámicos.

#### ➤ CUARTA ETAPA: *ATOMIZADO*

El secado por pulverización o atomizado es un proceso por medio del cual se extrae agua, o cualquier otro líquido, desde una disolución o una suspensión. Este proceso se realiza en una máquina denominada atomizador. Por leyes físicas bien conocidas, se sabe que la evaporación de un líquido se facilita calentándolo adecuadamente. En la industria de la cerámica se utilizan atomizadores de calor directo, en los cuales el calor necesario para calentar el líquido a evaporar es aportado por el aire caliente mezclado con gases de combustión, que al entrar en contacto directo con la disolución o la suspensión, produce la evaporación.

Para barbotinas de pastas cerámicas tradicionales es ya universalmente reconocida la mayor validez técnica y económica del atomizador de toberas, pulverizando a presión con la introducción de aire caliente a contracorriente. Con este sistema se obtiene una distribución granulométrica más amplia (partículas entre 60 y 550 micras) ubicándose la mayor concentración de partículas (60 a 70%) entre 300 y 400 micras.

Al producirse la evaporación dentro del atomizador, en un intervalo de temperatura de 450°C a 650°C, los gases calientes y el vapor de agua son evacuados mediante un sistema de extracción, de tal manera que el material seco, en forma de polvo o granulado, cae en forma de pequeñas esferas de arcilla secas, las cuales son más fáciles de prensar que el material arcilloso original. El intervalo de valores de contenido de agua (humedad), en los granos provenientes del atomizador, está comprendido entre 4% y 7%, requerimiento que se exige para la materia prima en la etapa posterior de prensado.<sup>13</sup>

#### ➤ QUINTA ETAPA: *ALMACENAJE EN SILOS*

Las pequeñas esferas de arcilla son luego transportadas a los silos de almacenamiento por medio de bandas.

## ➤ SEXTA ETAPA: *PRENSADO*

En el prensado suceden tres operaciones:

1. Formación de la pasta, en el sentido de proporcionar a la materia prima, inicialmente sin forma propia, una geometría bien definida.
2. Compactación de la pasta, en el sentido de proporcionar consistencia a la materia para resistir en crudo y en cocción todas las exigencias mecánicas, químicas y físicas a que el material está expuesto.
3. Compactación, en el sentido de limitar los vacíos existentes entre las partículas de la pasta (mezcla).

Luego de almacenar las pequeñas esferas de barbotina en los silos, se las transporta por medio de bandas a las tolvas de prensado. De ahí se derivan a las prensas por medio de un brazo móvil que las deposita en la parte superior de éstas. Se coloca la materia prima en unos moldes y se prensa en dos etapas; una de 60 bares llamada de *desaireación* y la otra de 280 bares llamada de *compactación*. De aquí salen las piezas formadas y compactadas.

## ➤ SÉPTIMA ETAPA: *SECADO*

El secado es una operación que consiste en eliminar el agua de un cuerpo, es decir, suministrarle una cierta cantidad de energía que le permita eliminar las moléculas de agua fijadas.

Una vez que las piezas salen de las prensas con densidad aparente entre 1.90 y 2.00 gramos por centímetro cúbico y con un espesor entre 8.0 y 8.20 milímetros, se las pasa por un secador rápido continuo horizontal o vertical durante un tiempo de 35 a 80 minutos. En este secador las piezas no son apiladas unas sobre otras, sino apoyadas sobre un plano simple. Esto permite a la pieza ser sometida a gran cantidad de aire

caliente por todas partes y, por otra parte, las piezas son absolutamente libres de realizar todos los movimientos (contracción o expansión) que sufren las piezas cerámicas en el proceso de secado. Finalmente las piezas salen del secador con una humedad que oscila entre 0.10% y 0.90%.

#### ➤ OCTAVA ETAPA: *ESMALTADO*

El revestimiento vítreo, o mejor llamado esmalte cerámico, está constituido por finísimas capas vidriosas que recubren la superficie de la pieza; su aplicación se obtiene esparciendo, sobre el soporte crudo y seco, la suspensión acuosa obtenida por molturación con agua de la frita y los componentes crudos que la acompañan.

En esta etapa, las piezas se pasan por la línea de esmaltado en donde se les aplica en orden consecutivo, el engobe y la base de esmalte para proporcionarles el acabado a las piezas. Posteriormente se pasa a la sección de decorado donde se aplica a las piezas en la superficie uno o varios diseños decorativos mediante serigrafía. La función del engobe es corregir, tapar, disminuir los desperfectos e imperfecciones pequeñas que tiene la pieza en su superficie superior, también proporciona un tono uniforme a la superficie y le sirve como capa impermeable al cuerpo para que no pase agua de éste hacia la base de esmalte. La función de la base de esmalte es brindarle a la pieza un acabado impermeable y proporcionarle estética, textura y resistencia a agentes químicos. La decoración serigráfica se hace mediante deposición de tinta a través de una malla de estampación. La tinta se transfiere mediante presión de una espátula desde la pantalla al soporte, a través de una malla que produce la imagen deseada.<sup>13</sup>

La temperatura superficial de la pieza, al llegar al área de esmaltado, debe ubicarse entre 60°C y 100°C. Si la temperatura superficial de la pieza es mayor, se le debe proporcionar agua por aspersion a razón de 1.0 a 3.0 gramos por pieza con el fin de alisar su superficie y disminuir su temperatura. Después de la etapa de esmaltado y de decoración, las piezas se transportan a un horno de secado con el fin de reducir la humedad que se le proporcionó en estas etapas, la humedad a la salida del horno de secado deberá quedar entre 0.50% y 2.00%.

## ➤ NOVENA ETAPA: COCCIÓN

La cocción es la fase central del proceso cerámico, caracterizada por un conjunto, bastante complejo, de transformaciones físicas y reacciones que es necesario conocer para poder gestionar y controlar este proceso. En general, se puede decir que en las diferentes fases de la cocción se producen los siguientes fenómenos:

1. Próximo a los 100°C se produce la eliminación del agua higroscópica de la humedad residual, después de un mal secado, o absorbida en el esmaltado o del ambiente.
2. Próximo a los 200°C se produce la eliminación del agua zeolítica, cuyas moléculas están atrapadas en la estructura cristalina.
3. Entre 350°C y 650°C se produce la combustión de la materia orgánica, que en diversa cantidad puede estar contenida en la arcilla, y la disociación de sulfatos y sulfuros con liberación de anhídridos sulfurosos.
4. Entre 450°C y 650°C, eliminación del agua de constitución y consiguiente destrucción del retículo cristalino.
5. A 573°C, transformación alotrópica del cuarzo, determinando un brusco aumento del volumen.
6. Entre 800°C y 950°C, descarbonatación de la cal y de la dolomita con liberación del  $\text{CO}_2$ .
7. A partir de 700°C, formación de nuevas fases cristalinas constituidas de silicatos y silico – aluminatos complejos.<sup>13</sup>

Explicándolo de manera más simple, en el horno se da la cocción de la pieza esmaltada y decorada, pasando por varias etapas. Primero una etapa de secado donde a la pieza se le quita toda su humedad. Después una etapa de desgasificación donde se alcanzan temperaturas altas, 900°C en promedio, en donde la materia orgánica y los carbonatos se descomponen en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ; la función de esta etapa es eliminar todos los gases de la

pieza. Posteriormente una etapa de cocción es donde se alcanza la mayor temperatura, 1050°C a 1110°C, y se efectúan las reacciones químicas de sinterización en el cuerpo mientras que el esmalte se funde. La cuarta etapa es de enfriamiento, en donde se enfrían las piezas ya cocidas hasta unos 100°C en promedio.

➤ DÉCIMA ETAPA: *ALMACÉN DE PRODUCTO TERMINADO*

Una vez cocidas las piezas, se cargan en carros para transportarlas al área de selección y embalaje. Se seleccionan manualmente las que tienen algún defecto y se las marca para ser descartadas. Las piezas que no tienen defectos son enviadas a una máquina empaquetadora, para finalmente almacenarlas en un almacén de producto terminado.

## 2.3 EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS

A continuación se describen, en orden de ejecución, los pasos del proceso para la fabricación de ladrillos mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 2.4, las etapas del proceso resaltadas en casillas rojas indican los puntos de generación de polvos.

➤ PRIMERA ETAPA: *ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA*

La materia prima que se ha de llevar al proceso es almacenada a cielo abierto al lado de la molienda de ladrillería. Allí mismo se mezclan las cantidades adecuadas de materia prima con el fin de preparar las *fórmulas del ladrillo*, cuyas proporciones se indican en la Tabla 2.4.

➤ SEGUNDA ETAPA: *MOLIENDA*

En esta etapa se vierte la materia prima en una quebradora encargada de triturar las piedras grandes a piedras de tamaño promedio a 2 pulgadas.

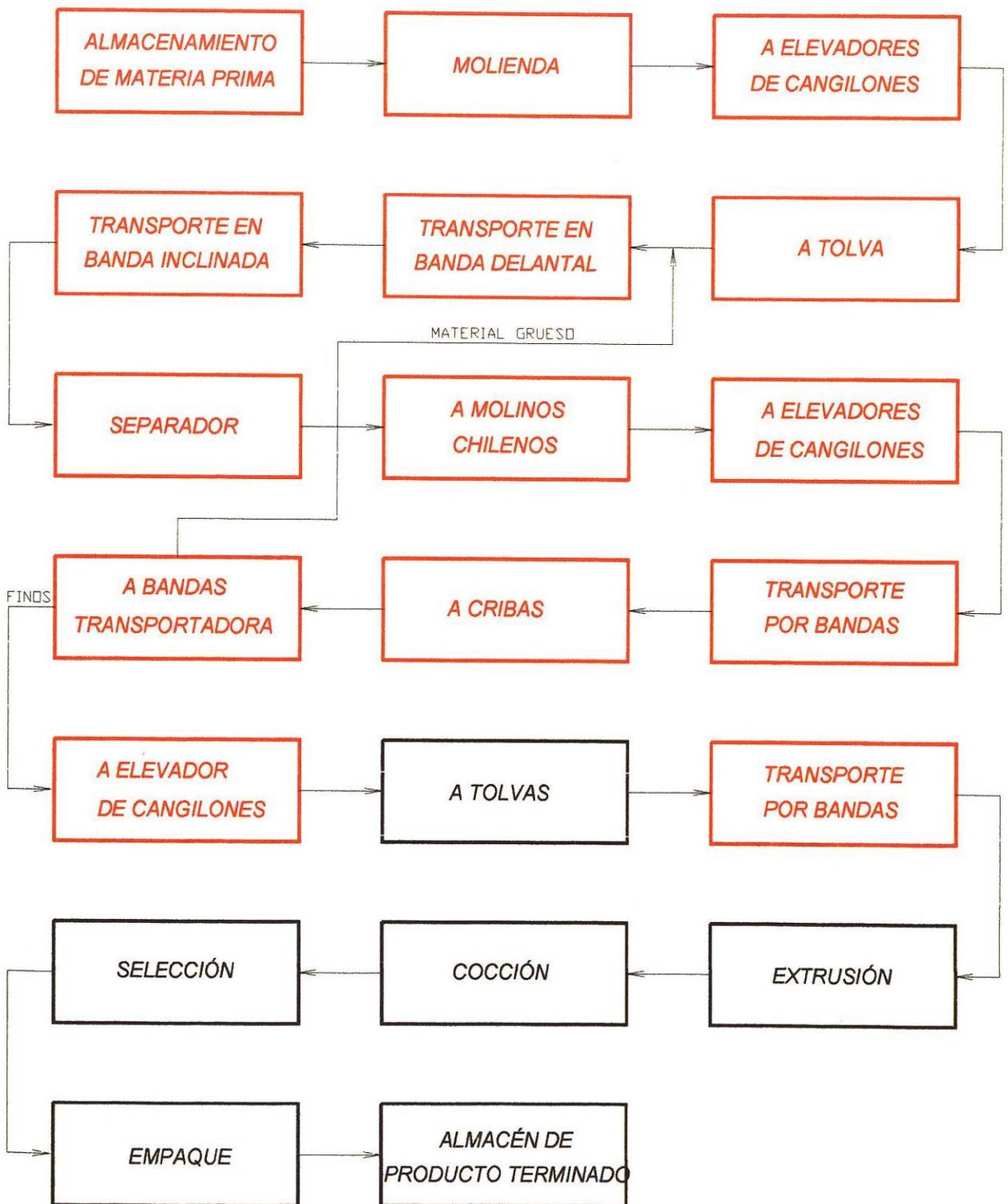


Figura 2.4 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de ladrillos

**Tabla 2.4** *Fórmula utilizada en la fabricación de ladrillos.*

COMPUESTO	% EN PESO
Pizarra de Allende	70
Barro de Allende	29.5
Desperdicio cocido	0.5
ADITIVOS	
Bióxido de manganeso	3

➤ TERCERA ETAPA: *A TOLVA*

Dado que la quebradora se encuentra a una profundidad de 5.80 metros del nivel del piso, el material triturado es elevado hasta una tolva de almacenamiento con capacidad de 100 toneladas, encargada de depositar el material en una banda horizontal llamada banda delantal.

➤ CUARTA ETAPA: *TRANSPORTE EN BANDAS*

Una vez que el material ha sido depositado en la banda delantal, se lo transfiere a una banda inclinada, la cual se encarga de elevarlo hasta colocarlo en un separador.

➤ QUINTA ETAPA: *MOLINOS CHILENOS*

La función del separador es repartir entre los dos molinos chilenos el material que llega a él. Cada molino con capacidad de 100 toneladas por día efectúa la molturación en seco. Los molinos se encargan de triturar más finamente el material, por medio de dos ruedas de fierro de aproximadamente 5 toneladas cada una, las cuales girando trituran el material que apisonan.

➤ SEXTA ETAPA: A CRIBAS

Luego que el material sale de los molinos chilenos es llevado por medio de elevadores de cangilones hasta unas bandas horizontales, las cuales se encargan de alimentar a las cribas. Cuando el material llega a las mismas es porque ya ha pasado por la quebradora y por los molinos chilenos, es decir, que ya debe estar finamente triturado. La función de las cribas es separar el material que tiene el tamaño adecuado para ser usado (malla 16), de aquel material que aún está grueso. El material grueso se lo envía a la banda delantal para que alimente nuevamente los molinos chilenos y el material fino se lo envía a dos elevadores de cangilones para que lo deposite en las tolvas de almacenamiento con capacidad de 200 toneladas cada una.

➤ SÉPTIMA ETAPA: TOLVAS DE ALMACENAMIENTO

El material fino que se ha de usar en la fabricación del ladrillo, mezclado en las proporciones adecuadas, se almacena en unas tolvas destinadas a ese fin. Luego es transportado por medio de bandas a la máquina extrusora.

➤ OCTAVA ETAPA: FORMACIÓN DEL LADRILLO

El material seco llega desde las tolvas de almacenamiento y se lo mezcla con agua. La extrusora proporciona a la mezcla húmeda la geometría, alto, ancho y sus huecos, al pasar por un molde, formando el ladrillo fresco o en "verde". Al salir de la extrusora el ladrillo fresco pasa por la máquina cortadora que le define la dimensión de largo. Si el ladrillo requiere decoración se pasa por una máquina esmaltadora. Si el ladrillo se quiere tomboleado (golpeado) entonces se pasa por la máquina tomboleadora. Finalmente los ladrillos se cargan en carros los cuales hacen espera para entrar en la etapa de presecado y secado antes de entrar al horno para cocción. El presecado tiene la función de quitar parcialmente la humedad al ladrillo en verde, a una temperatura de 45°C. El presecado es una zona de reposo del producto, donde se prepara para que ingrese al secador que lo recibe a una temperatura inicial de 45°C a la entrada, la cual asciende a lo largo de él hasta llegar al final hasta una temperatura de 180°C. El objetivo del secador es

secar el material antes de que entre al horno, el ladrillo a la salida del secador debe tener una humedad máxima del 2.0%.

➤ **NOVENA ETAPA: COCCIÓN DEL LADRILLO**

Una vez que el ladrillo sale del secador se le envía a un horno donde se quema el ladrillo crudo y seco para proporcionarle su acabado final. El horno tiene tres zonas, una zona de precalentamiento la cual escalonadamente eleva la temperatura desde 180 hasta 750°C, la segunda zona es la de cocción en donde se alcanzan temperaturas de 1000 a 1025°C, y finalmente la tercera zona que es de enfriamiento, donde baja la temperatura escalonadamente hasta 50°C a la salida del horno. De esta manera el ladrillo adquiere la consistencia física necesaria para su manejo.

➤ **DÉCIMA ETAPA: ALMACÉN DE PRODUCTO TERMINADO**

Una vez cocida la pieza se seleccionan manualmente las que tienen algún defecto y se las marca para ser descartadas. Las piezas que no tienen defectos son enviadas al almacén de producto terminado.

## **2.4 EL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA**

En la industria de la cerámica se producen aguas residuales originadas principalmente en las operaciones de limpieza en las líneas de producción de pisos y azulejos, y en el área de preparación del esmalte cerámico donde hay molinos de bolas. El caudal del agua utilizado varía mucho de una fábrica a otras ya que es una operación que se realiza manualmente y que depende de los turnos que se realicen en la fábrica, de la frecuencia con que se cambie la producción, de las costumbres adquiridas por los trabajadores y de otros factores que afectan directa o indirectamente al proceso. El caudal medio de agua residual se puede estimar entre 5 y 15 litros por cada metro cuadrado de producto fabricado.<sup>17</sup>

## 2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA

El análisis medio de las aguas residuales sin tratamiento de las industrias del sector cerámico se muestra en la Tabla 2.5 y suelen presentar las siguientes características:

- Una cantidad elevada de sólidos suspendidos debidos en su mayor parte a minerales arcillosos y restos de fritas.
- Metales procedentes de los restos de esmalte recogidos en el lavado de líneas y en los molinos de esmalte entre los que destacan plomo, zinc, boro, hierro y aluminio.
- Sales disueltas, principalmente cloruros, sulfatos y fluoruros.
- Demanda biológica de oxígeno (DBO) debida a la presencia de materia orgánica biodegradable, procedente en su mayoría de los restos de productos utilizados en serigrafía y demanda química de oxígeno (DQO) que incluye toda la materia oxidable presente en el agua, tanto si es o no biodegradable.<sup>14</sup>

**Tabla 2.5** Características de los efluentes de la industria cerámica

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MEDIO
pH	-	8.0
Sólidos suspendidos	mg/L	1,100
Sólidos sedimentables	mL/L	8.0
DBO <sub>5</sub>	mg/L	200
DQO	mg/L	280

**Tabla 2.5** Continuación

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MEDIO
Boro	mg/L	18.0
Plomo	mg/L	15.0
Zinc	mg/L	12.0
Cobre	mg/L	0.12
Aluminio	mg/L	3.0
Hierro	mg/L	3.5
Cromo III	mg/L	0.05
Cromo VI	mg/L	0.06
Manganeso	mg/L	0.2
Níquel	mg/L	0.2
Estaño	mg/L	0.4
Cobre	mg/L	0.12
Cloruros	mg/L	250
Sulfatos	mg/L	500
Fluoruros	mg/L	0.2

#### **2.4.2 REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA**

En los procesos de fabricación de productos cerámicos esmaltados se generan aguas residuales como consecuencia de las operaciones de limpieza de las secciones de preparación y aplicación de esmaltes.

En estos procesos, y para una correcta gestión de las aguas residuales, debe realizarse un planteamiento basado en reducir al máximo las necesidades de agua de limpieza y en agotar todas las posibilidades de reciclado interno de agua, con o sin

tratamiento previo, para efectuar finalmente sólo el vertido del agua que no pueda reutilizarse, minimizando de este modo el impacto ambiental sobre el entorno.

Las aguas residuales obtenidas en un proceso de fabricación de productos cerámicos esmaltados se pueden reciclar directamente o tras haber sufrido un proceso de depuración más o menos completo, que vendrá determinado por las características de las mismas y por el uso posterior o el destino final.

De un modo general, atendiendo al tipo de tratamiento al que se someta a las aguas residuales de un proceso cerámico, en principio se pueden dar las siguientes posibilidades de reutilización:

- Las aguas residuales, con todos los materiales en suspensión y en disolución, sin haber sufrido ningún tipo de tratamiento excepto una homogeneización, se puede reciclar en la fase de preparación de pastas.
- Las aguas tratadas únicamente por un proceso de separación físico (generalmente sedimentación), se pueden utilizar como agua en la preparación de pastas.
- Las aguas tratadas por un proceso físico – químico (sedimentación, coagulación y floculación), se pueden aprovechar para el lavado de las secciones de preparación y aplicación de esmaltes y para algunos servicios auxiliares.<sup>15</sup>

La solución óptima sería utilizar todas las aguas residuales para las aplicaciones consideradas en el primer caso, dado que así se evita la necesidad de instalar una planta de tratamiento de aguas, con la inversión y costos que ello supone.

Por otra parte, en los procesos de tratamiento de aguas residuales se obtienen lodos que es necesario tratar adecuadamente para completar el proceso de tratamiento y además, si el tratamiento del agua residual incluye una etapa química, los lodos generados normalmente contienen coagulantes y floculantes, por lo que en caso de adicionarse a las composiciones de esmaltes y pastas, pueden alterar negativamente el comportamiento de las mismas.

En principio la mejor solución para el uso de los lodos, provenientes únicamente de una separación física por sedimentación, es su posible reutilización en el propio proceso que los genera, bien adicionándolos a la composición del soporte o reutilizándolos para la fabricación de esmaltes.

La reutilización de lodos como materia prima constituyente del soporte en la fabricación de pisos o azulejos esmaltados es muy adecuada, presentando a priori la ventaja de una relativa facilidad de aplicación industrial. Por el contrario supone una depreciación de los residuos, puesto que adquieren el valor de las materias primas del soporte, generalmente bastante inferior al del esmalte, siendo además imprescindible una homogeneización previa del lodo para evitar desuniformidades que pueden repercutir negativamente en la calidad del producto acabado.<sup>15</sup>

Desde el punto de vista económico, el reciclado en la fabricación de esmaltes es el método de reutilización de lodos cerámicos quizás más interesante, dado que con ello se consigue elevar mucho el valor de estos residuos. La principal limitación es la notable variación con el tiempo de las composiciones de los lodos, debido a la diversidad de esmaltes que se desea tener en producción, lo que limita en gran medida el número de posibles esmaltes a fabricar.

La naturaleza y cantidad de estos lodos varía considerablemente ya que, además de que pueden ser originados en diversas etapas del proceso productivo. Incluso dentro de una misma fábrica se suele utilizar gran variedad de materias primas (diversos esmaltes, diversas fritas, etc.) que dan lugar a fluctuaciones importantes en las características de los lodos; por todo ello no es posible definir unas características concretas de todos los lodos, aunque se pueden establecer intervalos de variación.

La composición química de los lodos es bastante similar a la de las materias primas utilizadas en el proceso. Son materiales de base sílico – aluminosa que contienen cantidades muy variables de metales pesados y de elementos alcalinos y alcalinotérreos, según el origen de los residuos. En general el campo de variación en su composición, expresada como porcentaje en masa de óxido del elemento correspondiente obtenido a partir de estudios de muchos lodos cerámicos, se reporta mediante intervalos de variación

de estos componentes. La Tabla 2.6<sup>16</sup> muestra los valores típicos de composición de lodos.

En general, para adoptar cualquier opción de reciclado de aguas residuales, o de lodos, se deberá realizar una serie de ensayos de laboratorio para comprobar la viabilidad del proceso, debiéndose en una segunda etapa verificar si estos resultados se reproducen a nivel industrial.

**Tabla 2.6** Intervalos de variación de componentes de lodos cerámicos

COMPUESTO QUIMICO	INTERVALO EN PORCENTAJE %
SiO <sub>2</sub>	40 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1 - 5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 10
CaO	5 - 15
MgO	0.5 - 3
Na <sub>2</sub> O	0.5 - 3
K <sub>2</sub> O	0.5 - 3
TiO <sub>2</sub>	0 - 7
ZrO <sub>2</sub>	1 - 15
PbO	0.1 - 15
BaO	0.1 - 3
ZnO	1 - 8
p.p.c.	1 - 12

### 2.4.3 INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA

A la hora de realizar un correcto tratamiento de las aguas residuales es importante separar las aguas residuales domésticas (aguas procedentes de los servicios, comedores, regaderas, etc.) ya que necesitan un tratamiento aparte.

El tratamiento de las aguas residuales procedentes del proceso industrial de pisos y azulejos cerámicos se puede dividir en varias secciones:

#### a) Homogeneización

Un primer paso es conseguir un agua lo más homogénea posible, para lo cual las aguas se recogen en un tanque con una capacidad suficiente para poder absorber los caudales punta y poder garantizar una alimentación regular a la instalación de tratamiento. Es conveniente la instalación de un sistema de agitación para garantizar la homogeneidad del agua. Existen sistemas de aireación por difusores que además de agitar el agua, favorecen la aireación de la misma con lo que se consigue una mejor oxidación de la materia orgánica y de los compuestos oxidables disminuyendo los problemas originados por la putrefacción de las aguas.<sup>14</sup>

La utilización de este tanque de homogeneización no es suficiente para la depuración de las aguas ya que no se consigue la eliminación de metales pesados ni de otros parámetros que contaminan el agua.

#### b) Coagulación – floculación

La mayoría de los metales están presentes en el agua en forma coloidal, por lo que debido al pequeño tamaño de las partículas y a la existencia de cargas superficiales, estas presentan una gran estabilidad en el agua que impide su precipitación.

Esta suspensión se puede romper mediante la utilización de coagulantes, los cuales neutralizan las cargas eléctricas eliminando las fuerzas de repulsión entre partículas, lo que unido a una agitación adecuada provoca un agrupamiento de partículas favoreciendo

la sedimentación de las mismas. Los coagulantes más utilizados son sales de hierro o aluminio (cloruro férrico, policloruro de aluminio, sulfato de aluminio).

Para conseguir una máxima eficiencia del coagulante conviene trabajar a un pH adecuado a la zona correspondiente con la mínima solubilidad de los iones implicados, lo cual suele ocurrir a un pH ligeramente alcalino, para lo que es común utilizar cal o sosa.

Una vez rotas las cargas superficiales que impedían la atracción de las partículas se añaden productos floculantes, los cuales actúan de puente entre partículas suspendidas produciendo la formación de agregados mucho mayores, o flóculos, favoreciendo el proceso de sedimentación. Los floculantes suelen ser polímeros orgánicos de gran peso molecular que pueden tener una carga eléctrica, lo que ayuda a potenciar la acción del floculante.<sup>14</sup>

Las dosis empleadas de cada uno de estos productos, coagulantes, floculantes y álcalis, dependen de las características del agua residual a tratar, por lo que es conveniente la realización de ensayos de floculación realizados en el laboratorio con el fin de conocer la dosis óptima. Estos ensayos y sus resultados ayudan a conseguir beneficios importantes en el tratamiento de las aguas residuales, entre los que cabe destacar la consecución de una mejor calidad de agua tratada y un ahorro significativo en el consumo de los reactivos empleados en el tratamiento.

### c) Sedimentación

Existen varios tipos de sedimentadores, los más utilizados en la industria de la cerámica son los sedimentadores circulares y los de lamelas.

Los sedimentadores circulares están formados básicamente por un cilindro con una base cónica para la recolección de los lodos. La adición de reactivos puede realizarse en unos compartimientos contiguos al sedimentador o en la propia entrada del agua al mismo. El agua entra en el sedimentador por el centro y sale por un rebosadero situado en el borde superior externo del mismo.

Los sedimentadores de lamelas constan de un gran número de placas paralelas e inclinadas entre las que el agua circula en sentido ascendente, recolectándose los lodos en la parte inferior del sedimentador. La adición de reactivos se efectúa a la entrada del sedimentador, estando normalmente integrado en el mismo recinto.

La principal ventaja que presentan los sedimentadores de lamelas frente a los circulares es la capacidad de tratar un mayor caudal de agua en un menor espacio, siendo su desventaja el mayor grado de ensuciamiento y su dificultad de limpieza, lo que disminuye el rendimiento del equipo si no se tiene cuidado en su mantenimiento.

Los lodos resultantes pueden ser reciclados de forma controlada en instalaciones de atomización o ser tratados como residuos, siendo recogidos por un gestor autorizado para su tratamiento o para depósito en un confinamiento controlado. Para minimizar el volumen de los lodos se puede eliminar el agua mediante filtros prensa o filtros de banda.<sup>14</sup>

#### **2.4.4 CONTROL DE OLORES DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA**

En la actualidad, con la finalidad de disminuir el consumo de agua limpia y de reducir el vertido de agua residual, gran parte del agua residual proveniente de operaciones de limpieza de las instalaciones de preparación de pastas y esmaltes se está reutilizando, tras realizarse un tratamiento químico – físico de ésta en el propio proceso. Sin embargo, uno de los mayores problemas que surgen a la hora de realizar un tratamiento de las aguas residuales es el olor que pueden desprender.

En general, los olores en aguas residuales son de naturaleza orgánica y pueden eliminarse por aireación, cloración, tratamiento con carbón activado o mediante la aplicación de métodos combinados. Los factores que más influyen en la producción de olores son: contenido y naturaleza de sustancias orgánicas, pH y temperatura, entre otros.

La mayor parte de los compuestos inorgánicos son inodoros cuando se presentan en disolución acuosa, a excepción del sulfuro de hidrógeno y sus compuestos,

el cual se caracteriza por su olor a huevos podridos, siendo su olor a concentraciones muy bajas el característico de zonas pantanosas.

De los compuestos inorgánicos que se añaden al agua para su tratamiento, el cloro y sus compuestos pueden causar olores, bien por ellos mismos o por medio de los compuestos que se pueden formar durante los procesos de tratamiento. Estos pueden producir olores de tipo medicamentoso, a cloro, acre, etc.

Los agentes químicos y procesos físicos que se utilizan como oxidantes y desinfectantes son: aireación, cloro, dióxido de cloro, bromo, cloruro de bromo, yodo, ozono, permanganato de potasio, filtración, rayos ultravioletas, etc.

La aireación de agua que contiene materia orgánica produce una reducción de los olores por los siguientes motivos:

- Se transforma la materia orgánica en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  por acción de las bacterias aerobias.
- Destruye por oxidación las células bacterianas muertas evitando su putrefacción.
- Inhibe el crecimiento de las sulfobacterias y ferrobacterias.<sup>17</sup>

La cloración ejerce una acción oxidante y desinfectante. En ambos casos se obtienen otros beneficios tales como la corrección de olores, así como la corrección del color y la reducción de crecimientos biológicos indeseables. Cuando se realiza la cloración de un agua residual debe determinarse cuál es la cantidad de cloro a añadir. Si la adición de cloro es insuficiente pueden incrementarse los olores por no efectuarse completamente las reacciones de oxidación, formándose compuestos intermedios. Por otra parte, si se añade cloro en exceso se realizará una mala utilización de éste, incrementándose el costo de tratamiento.<sup>17</sup>

## **CAPÍTULO 3**

### **ESTUDIO DEL AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE LA CERÁMICA**

#### **3.1 DESARROLLO DEL ESTUDIO**

Actualmente es importante que las industrias consideren dentro de la política general de la empresa el factor ambiental como primordial, necesario, indispensable y uno de los más importantes para aplicar.

Las industrias que no implementen una política ambiental no podrán participar en el mercado global del comercio exterior, ni participar en los tratados de libre comercio, ni rivalizar con la competencia nacional e internacional; además se verán afectadas económicamente, su margen de utilidades será mas bajo y no serán bien vistas por el consumidor, por los clientes, por la sociedad ni por el gremio comercial e industrial. Igualmente dichas empresas se expondrán a demandas, sanciones y multas por parte de las entidades oficiales federales y estatales que velan por el cumplimiento de la legislación ambiental.

México, un país fuertemente industrial en Latinoamérica, no se ha quedado atrás y desde hace aproximadamente cuatro lustros comenzó a implementar su legislación ambiental. Todo este trabajo de velar por la correcta ejecución y cumplimiento de leyes ambientales le atañe a la SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales). La legislación ambiental en México está regida por dos Leyes que se derivan del artículo 27 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, las cuales son: La Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente y la Ley de Aguas

Nacionales; de estas dos leyes se derivan diversos reglamentos y normas oficiales mexicanas.

El estudio que compete a este proyecto de tesis está enmarcado en el país de México y específicamente en una industria de revestimientos cerámicos, localizada en la ciudad de Monterrey (Nuevo León). Dicha fábrica se dedica a la producción de pisos, muros, guarniciones y ladrillos.

La industria objeto de este estudio, al igual que muchas empresas e industrias mexicanas, está implementando actividades para alcanzar y demostrar sólidos resultados ambientales, controlando el impacto de sus procesos, productos y servicios sobre el medio ambiente. Dos de sus metas primordiales en el área ambiental se resumen así: la primera es la de lograr la certificación de INDUSTRIA LIMPIA que otorga la SEMARNAT por medio de la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) y la segunda es implementar un Sistema de Gestión Ambiental y certificarse en la Norma Internacional ISO 14000.

En la industria de la cerámica se generan contaminantes diversos y entre ellos los más importantes son: las emisiones de polvos o partículas suspendidas provenientes de la materia prima y la generación de aguas residuales provenientes de actividades de lavado en las diferentes áreas de producción. En lo que respecta a esta tesis, el estudio se concentrará específicamente en la generación de las aguas residuales, su tratamiento y reuso.

Uno de los aspectos ambientales que necesita atención especial en la planta de productos cerámicos es el concerniente al uso del agua en las diferentes actividades de producción: molienda, atomizado, preparación de esmaltes y líneas de producción de pisos, azulejos y ladrillos. En cada área se utiliza agua para la preparación del producto (pisos, muros, guarniciones y ladrillos) y también para las actividades de lavado de pisos, tanques, bombas, cabinas de esmalte, molinos, etc. Las actividades de lavado generan una cantidad considerable de aguas residuales que en una alta proporción son reutilizadas dentro del proceso de fabricación de la cerámica pues se reciclan y aprovechan para la elaboración de la barbotina; la porción restante se dispone en el suelo

en un área específica de la planta, con la consecuente contaminación, o se utiliza inadecuadamente como agua para riego de zonas verdes.

La problemática del uso del agua dentro de la planta conlleva a realizar un estudio detallado del aprovechamiento del agua en cada una de las áreas de producción. Las aguas residuales que no se están recirculando al proceso de fabricación de la cerámica pueden ser tratadas para reutilizarse dentro de la planta en actividades de limpieza, lavado y riego de áreas verdes y por ende traer un beneficio económico a la empresa. El planteamiento de una solución a la problemática del agua en la planta, en el tratamiento y reuso de sus aguas residuales, es un paso adelante dentro de sus metas ambientales que, junto a otras soluciones de tipo ambiental, acercarán al objetivo de lograr las certificaciones de INDUSTRIA LIMPIA e ISO 14000.

### 3.1.1 METODOLOGÍA

La metodología de investigación del estudio de esta tesis estuvo conformada por tres etapas, las cuales se describen a continuación:

- **Etapa inicial:** en esta etapa del proyecto se realizó el reconocimiento del área de estudio, la planta de productos cerámicos, con un recorrido por las instalaciones de la empresa con el fin de conocer todos los procesos que allí se realizan: fabricación de azulejos, pisos, guarniciones y ladrillos; también se recopiló la información existente, antecedentes, análisis físico-químicos de las aguas residuales y de las fuentes de suministro (agua de pozo), los análisis de lodos, planos, etc. Igualmente se hizo revisión de la bibliografía existente.
  
- **Etapa intermedia:** en esta fase del proyecto se realizó el trabajo de campo y de laboratorio. Se instalaron medidores volumétricos de agua, se hicieron los registros diarios de lecturas en los medidores, se obtuvo el balance hídrico en la planta determinándose la demanda de agua en cada área de producción, se hizo la identificación de las actividades en que se usa el agua y se obtuvo el conocimiento de las instalaciones y equipos para uso del agua. En esta etapa también se tomaron muestras del agua residual y se efectuaron los análisis físico-químicos de ellas, se

ejecutó la prueba de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante y se llevó a cabo el análisis CRETIB de lodos. Finalmente se obtuvieron los resultados de las mediciones y de los análisis de laboratorio, con los cuales se hizo una interpretación de resultados.

- **Etapa final:** en la etapa final del proyecto se hizo el planteamiento de la solución al problema, la determinación de los parámetros de diseño, la ingeniería y el diseño de la solución y se elaboraron las conclusiones del estudio.

### **3.2 GENERALIDADES DE LA EMPRESA DONDE SE REALIZÓ EL ESTUDIO**

La planta industrial cerámica objeto de este estudio se dedica a la fabricación de:

- **Revestimientos para pisos:** Para la producción de pisos cerámicos la planta tiene un atomizador, 5 prensas, 5 secadores, 5 líneas de producción y 4 hornos, produciendo un formato 30 cm x 30 cm.
- **Azulejos o revestimientos para muros:** Para la producción de azulejos, la planta tiene un atomizador, 5 prensas, 5 secadores, 5 líneas de producción y 5 hornos, produciendo formatos 20 cm x 25 cm, 20 cm x 30 cm y 15 cm x 15 cm.
- **Guarniciones o piezas especiales:** Para la producción de piezas especiales, la planta tiene 4 prensas, 2 secadores, 4 líneas de producción y 2 hornos, produciendo formatos 5 cm x 15 cm, 5 cm x 22 cm y 11 cm x 11 cm.
- **Ladrillos:** Para la producción de ladrillos, la planta tiene 2 extrusoras, 2 secadores, 4 líneas de producción y 2 hornos, produciendo en los formatos de 7cm x 7 cm x 24 cm y 6 cm x 9 cm x 19 cm.
- **Esmalte cerámico:** Para la producción de esmalte base y engobe, la planta tiene 13 molinos de bolas, produciendo 35 variedades de esmaltes.

La empresa cuenta con un área administrativa, la cual funciona en un único turno de trabajo y un área de producción, la cual funciona en tres turnos de ocho horas cada uno.

La producción promedio de pisos y azulejos es de 410,000 m<sup>2</sup>/mes. La producción promedio de ladrillos es de 4,700 Ton/mes. En la Figura 3.1 se muestra la producción trimestral de pisos y azulejos en millones de metros cuadrados en el año 2,000. En la Figura 3.2 se muestra la producción trimestral de ladrillos en toneladas en el año 2,000.

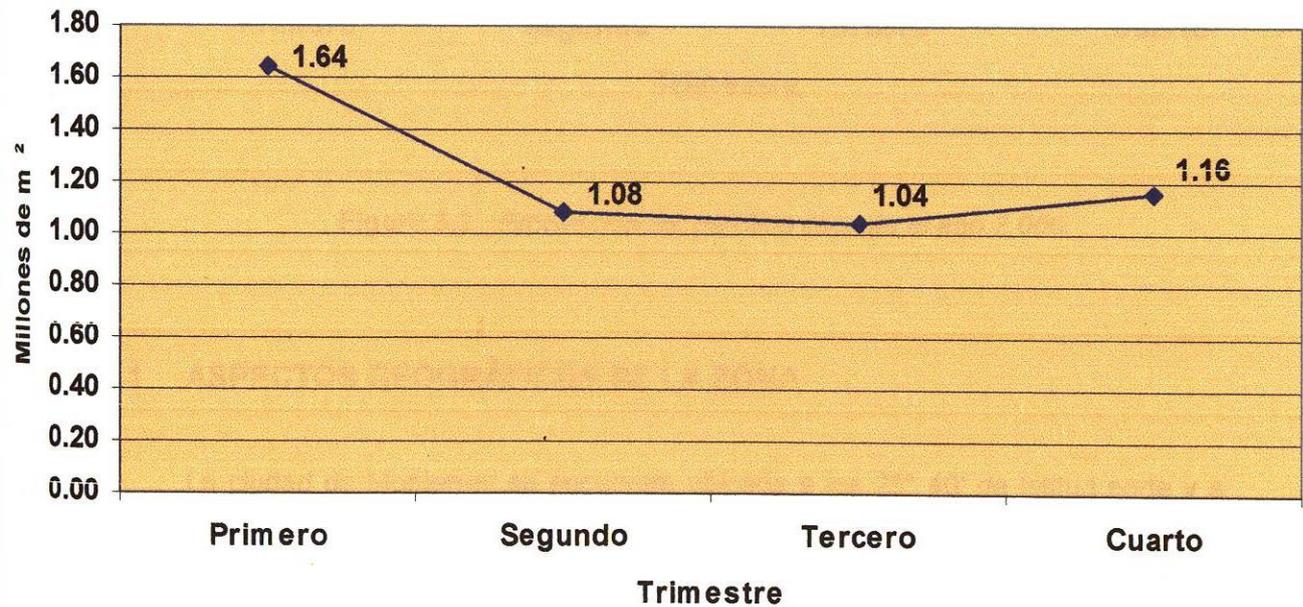


Figura 3.1 Producción de pisos y azulejos durante el año 2,000.

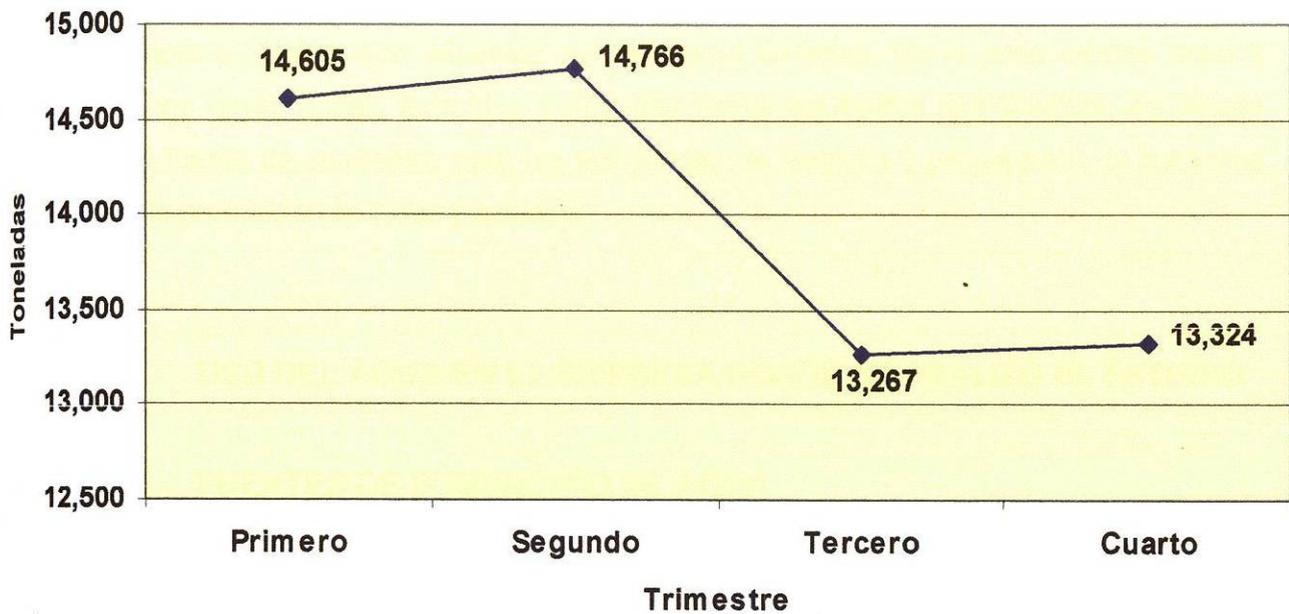


Figura 3.2 Producción de ladrillos durante el año 2,000.

### 3.2.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA

La ciudad de Monterrey se encuentra ubicada a los 25° 40' de latitud norte y a 100° 19' de longitud oeste y a una altitud de 540 metros sobre el nivel del mar. El clima de la región corresponde al tipo de *semiseco muy cálido y cálido*, en donde la temperatura media anual es de 22.1°C, siendo los meses más fríos Diciembre y Enero con temperaturas que promedian 10°C; los más cálidos son Julio y Agosto con temperaturas promedio de 30°C. La precipitación promedio anual es de 587.1 mm, la humedad es 70% y los vientos dominantes del sureste.

La fisiografía de la zona indica que el accidente más importante es la *Sierra Madre Oriental* y, específicamente, los Pliegues Saltillo-Parras son los que afectan a la zona donde se encuentra ubicada la planta. La geología de la zona indica que en sus

cercanías encontramos rocas de origen *sedimentario* correspondientes al período Cuaternario de la era Cenozoica y al período Cretácico de la era Mesozoica.

La hidrología de la región indica que la misma pertenece a la subcuenca del río San Juan, aunque en particular el río La Silla y el Arroyo Seco son los límites naturales de la empresa; ambos son afluentes del río Santa Catarina. En la zona existen mantos freáticos cuyas aguas, extraídas desde dos pozos equipados con bombas, se utilizan como fuente de suministro para las actividades de limpieza y preparación de barbotina para la producción de pisos y azulejos.

### **3.3 USO DEL AGUA EN LA EMPRESA DONDE SE REALIZÓ EL ESTUDIO**

#### **3.3.1 FUENTES DE SUMINISTRO DE AGUA**

El suministro de agua para las diferentes áreas de producción de la planta, para las áreas administrativas, el comedor, oficinas del sindicato, servicios sanitarios, vestidor de trabajadores y departamento médico, es abastecido por dos pozos (Pozos No.1 y No.2), los cuales son fuente segura de suministro de agua en cantidad y calidad. Dentro de las actividades de producción la única que no utiliza esta agua como fuente es la de elaboración de esmaltes cerámicos, en donde 13 molinos de bolas efectúan la molturación en húmedo de las fritas utilizando agua purificada, con un consumo promedio de 210 m<sup>3</sup> por mes.

Los pozos No. 1 y No. 2 abastecen en promedio 677 m<sup>3</sup> por día, los cuales se distribuyen en promedio como sigue: el área de producción consume 401 m<sup>3</sup> por día, las oficinas generales y otros, 172 m<sup>3</sup> por día, servicios sanitarios 70 m<sup>3</sup> por día y finalmente 34 m<sup>3</sup> por día estimados como pérdidas. En la Tabla 3.1 se muestra el análisis químico del agua del pozo No. 1.

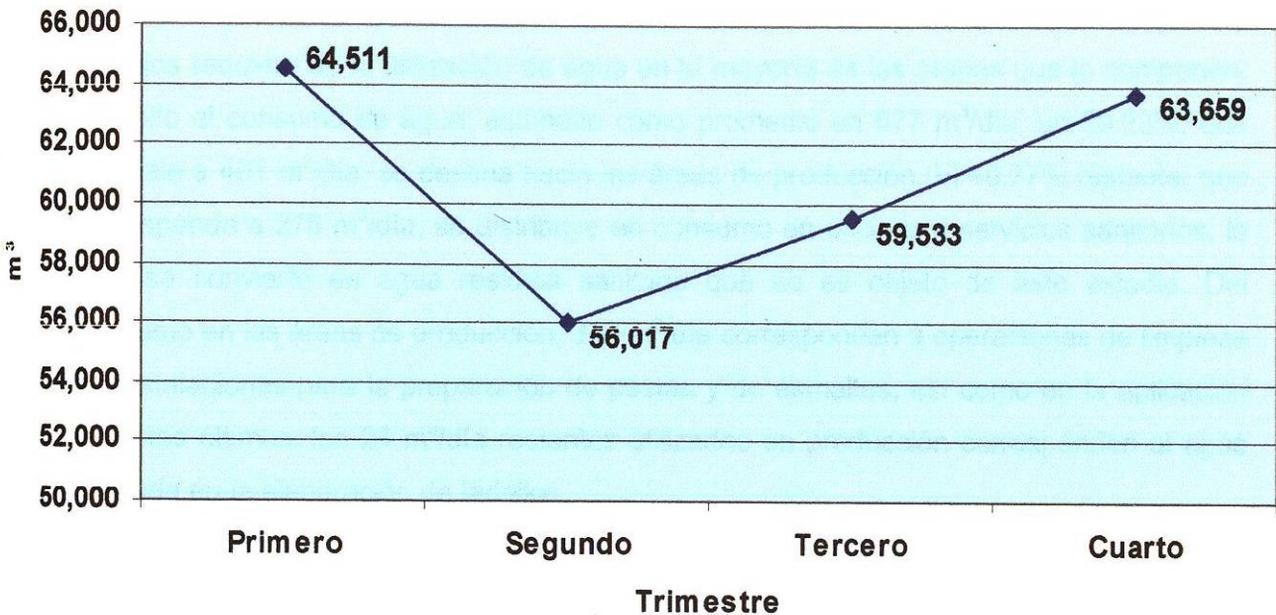
El agua de pozo No. 1 se utiliza en producción y abastece las siguientes áreas en operaciones de lavado y limpieza: atomizador de pisos y de azulejos, líneas de producción de pisos, azulejos y de guarniciones, líneas de producción de ladrillos, molinos y tanques en el área de preparación de esmaltes. También se utiliza para la

elaboración del producto en las máquinas extrusoras de ladrillo y en la preparación de barbotina de cuerpo blanco y rojo.

**Tabla 3.1** *Análisis químico del agua del Pozo No. 1.*

DETERMINACIÓN O COMPUESTO	VALOR OBTENIDO	LÍMITE PRÁCTICO DE CUANTIFICACIÓN	METODOLOGÍA UTILIZADA
MESOFÍLICOS AERÓBICOS (UFC/mL)	MENOR A 10	NO APLICABLE	NOM-F-253-77
COLIFORMES TOTALES (NMP/100mL)	MENOR A 2	NO APLICABLE	NOM-AA-42-87
pH	7.59	NO APLICABLE	NMX-AA-08
CONDUCTIVIDAD ( $\mu$ mhos/cm)	1 299	NO APLICABLE	NMX-AA-93
COLOR APARENTE	MENOR AL LÍMITE	5 u.c.	NMX-AA-45
ALCALINIDAD A LA FENOFTALEÍNA (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	MENOR AL LÍMITE	6.0	NMX-AA-36
ALCALINIDAD AL NARANJA DE METILENO (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	312	6.0	NMX-AA-36
DUREZA TOTAL (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	544	5.0	NMX-AA-72
CLORUROS (mg/L de Cl)	44	0.51	NMX-AA-73
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)	1 002	1.0	NMX-AA-20

En el año 2,000 se consumieron 243,720 m<sup>3</sup> provenientes de los dos pozos, lo cual demuestra la gran demanda de agua de la industria de la cerámica. En la Figura 3.3 se muestra el consumo de agua extraída de los pozos durante el año 2,000.



**Figura 3.3** Consumo de agua extraída de pozos No. 1 y No. 2 en el año 2,000.

El consumo de agua promedio, reportado por metro cuadrado fabricado de azulejos y pisos, es un indicador importante en la industria de la cerámica. La experiencia en diversas industrias establece que este indicador se ubica entre 5.0 y 15.0 L/m<sup>2</sup>; sin embargo para la industria de este estudio, el consumo es mucho mayor y se ha determinado a partir del cociente que resulta de la cantidad de litros consumida en el año 2,000 (ya vista arriba que fue de 243,720,000 L) dividida por la producción en metros cuadrados de azulejo y piso en el mismo año (que fue 4,920,000 m<sup>2</sup>), obteniéndose como resultado 49.54 L/m<sup>2</sup>; este resultado incluye el agua consumida en áreas de producción, oficinas, servicios sanitarios y pérdidas.

Si el cálculo se realiza solo para la cantidad de agua usada en producción, la cual en promedio es 401 m<sup>3</sup>/día, que corresponde para un año a 146,365 m<sup>3</sup> (146,365,000 L), el indicador arroja el siguiente resultado: 29.75 L/m<sup>2</sup> de fabricado de pisos y azulejos.

### **3.3.2 LA GENERACIÓN DEL AGUA RESIDUAL Y SU PROBLEMÁTICA**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proceso de fabricación de pisos y azulejos requiere de la utilización de agua en la mayoría de las etapas que lo componen. De todo el consumo de agua, estimado como promedio en 677 m<sup>3</sup>/día, un 59.23%, que equivale a 401 m<sup>3</sup>/día, se destina hacia las áreas de producción. El 40.77% restante, que corresponde a 276 m<sup>3</sup>/día, se distribuye en consumo en oficinas y servicios sanitarios, lo cual se convierte en agua residual sanitaria que no es objeto de este estudio. Del consumo en las áreas de producción, 377 m<sup>3</sup>/día corresponden a operaciones de limpieza de instalaciones para la preparación de pastas y de esmaltes, así como en la aplicación de éstos últimos; los 24 m<sup>3</sup>/día restantes utilizados en producción corresponden al agua utilizada en la elaboración de ladrillos.

Los 377 m<sup>3</sup>/día utilizados en actividades de lavado en áreas de producción se convierten en agua residual después de ser utilizada en las diferentes operaciones de limpieza, esta cantidad corresponde a un gasto de 4.36 L/s. La distribución de este caudal en las diferentes áreas productivas y las actividades en que se consume se describen en la Tabla 3.2. De esta cantidad, 158 m<sup>3</sup>/día se reciclan y son utilizados para la fase de preparación de pastas de cuerpo rojo y de cuerpo blanco, mientras los restantes 219 m<sup>3</sup>/día de agua residual se vierten directamente en una laguna de residuos de esmalte, o en parte se utilizan para actividades de riego de áreas verdes. Estas dos últimas actividades se efectúan sin algún control; los residuos de esmalte se hallan directamente en contacto con el suelo, contaminándolo, y el riego se realiza con agua que no cumple las condiciones de calidad para dicho uso.

El objetivo de este estudio es el de diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para procesar los 219 m<sup>3</sup>/día (que se están utilizando inadecuadamente y sin control) mediante un proceso físico-químico de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. El efluente de esta planta tratadora se aprovechará para las actividades de

limpieza y lavado en las áreas de producción y para el riego de áreas verdes y jardines. Esta recirculación de agua reducirá el consumo de agua para actividades de lavado y de riego provenientes de los pozos y eliminará la laguna de residuos de esmaltes. Los lodos generados de la planta tratadora podrán reciclarse para ser utilizados en la preparación de esmaltes, previa investigación y estudio reológico del comportamiento de las pastas de esmalte con el uso de los mismos, dicha investigación no compete al presente estudio pero puede ser objeto de otro tema de tesis.

Las medidas antes mencionadas deben estar acompañadas de un correcto uso del agua en las actividades de limpieza, reduciendo al máximo las necesidades de agua de lavado (optimización del consumo de agua), estableciendo procedimientos y hábitos para el uso racional de recurso y concientizando al personal de los beneficios que trae el uso adecuado del agua, con lo cual se podrá minimizar el impacto ambiental.

En la primera etapa de este estudio se identificó la carencia de varios medidores volumétricos de agua dentro de la red hidráulica, que permitieran cuantificar el consumo total de agua dentro de la planta de producción cerámica.

El resultado de la inspección estimó que se requería la instalación de 16 medidores nuevos y que sólo había 14 medidores existentes. Los medidores requeridos se instalaron y conformaron un total de 30 medidores distribuidos en la red hidráulica, los cuales permitieron cuantificar el consumo de agua proveniente de las fuentes (pozos No. 1 y No. 2) y el consumo en cada área de producción y en las administrativas.

Las lecturas en los medidores permitieron calcular los caudales medios diarios descritos en este capítulo y, por ende, obtener el balance hídrico dentro de la planta cerámica, el cual se muestra en la Figura 3.4.

En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran los diagramas de flujo de utilización del agua en la preparación de pasta de cuerpo rojo y de pasta de cuerpo blanco respectivamente.

**Tabla 3.2** *Uso del agua en actividades de limpieza en la planta cerámica.*

AREA DE PRODUCCIÓN	CONSUMO DE AGUA (m <sup>3</sup> /día)	ACTIVIDADES DE LIMPIEZA
ATOMIZADOR PISOS	55	Lavado de pisos, de estoperos, de cribas, enfriamiento de bombas y lavado de polvo fino en el atomizador.
ATOMIZADOR AZULEJOS	112	Lavado de pisos, de estoperos, de cribas, enfriamiento de bombas y lavado de polvo fino en el atomizador.
LÍNEAS DE PRODUCCIÓN DE PISOS	68	Lavado de cabinas de esmalte, cabinas de engobe, cabinas de esfumado, lavado de rebarbeadoras y lavado de pisos.
LÍNEAS DE PRODUCCIÓN DE AZULEJOS	37	Lavado de cabinas de esmalte, cabinas de engobe, lavado de rebarbeadoras y lavado de pisos.
LÍNEAS DE PRODUCCIÓN DE GUARNICIONES	21	Lavado de cabinas de esmalte, cabinas de engobe, lavado de rebarbeadoras y lavado de pisos.
ESMALTES	84	Lavado de molinos de bolas, de barricas, de tanques, de botes de pasta serigráfica, de ferrofiltros, de canal, de cisterna, de bombas y de pisos.

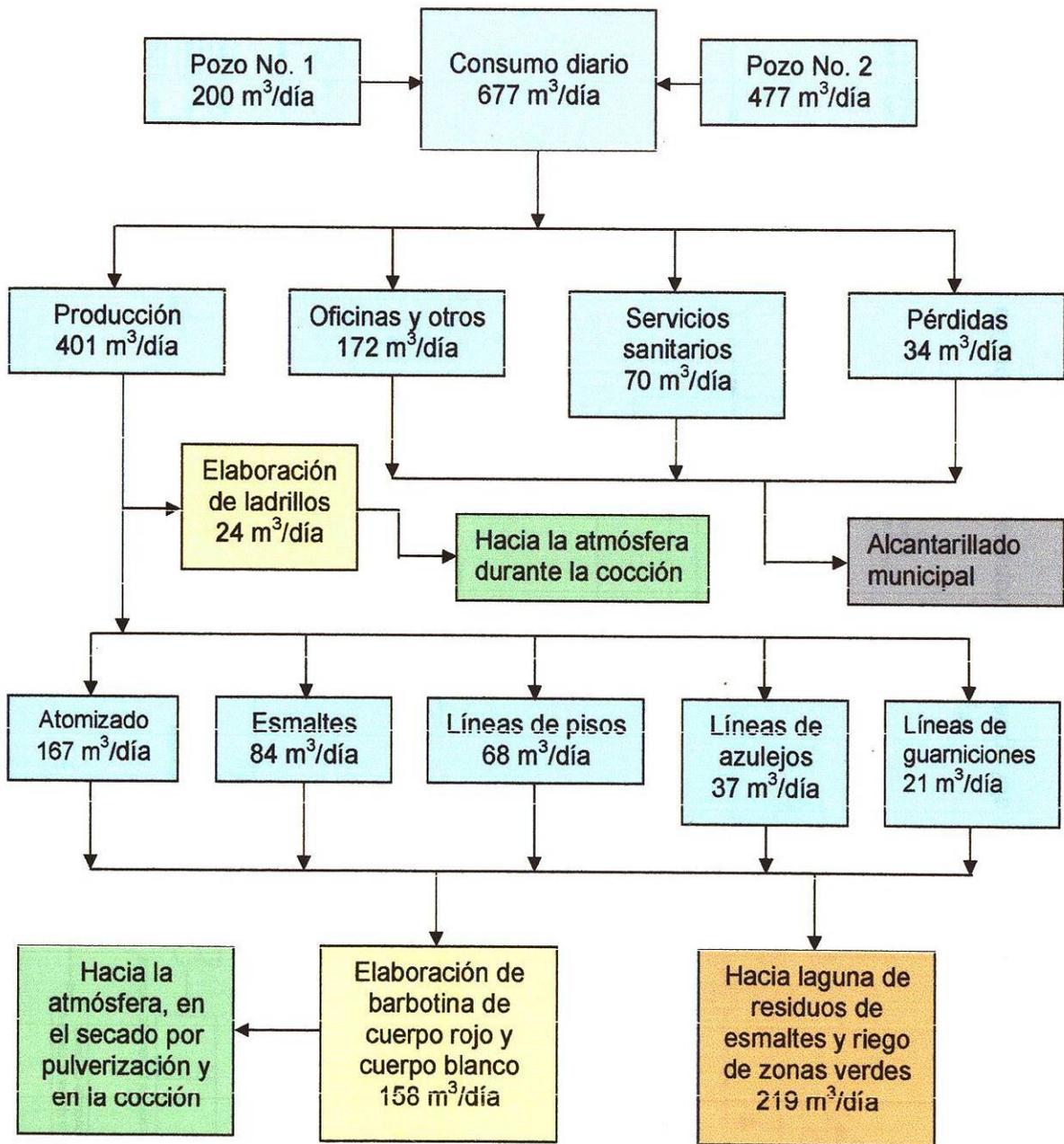
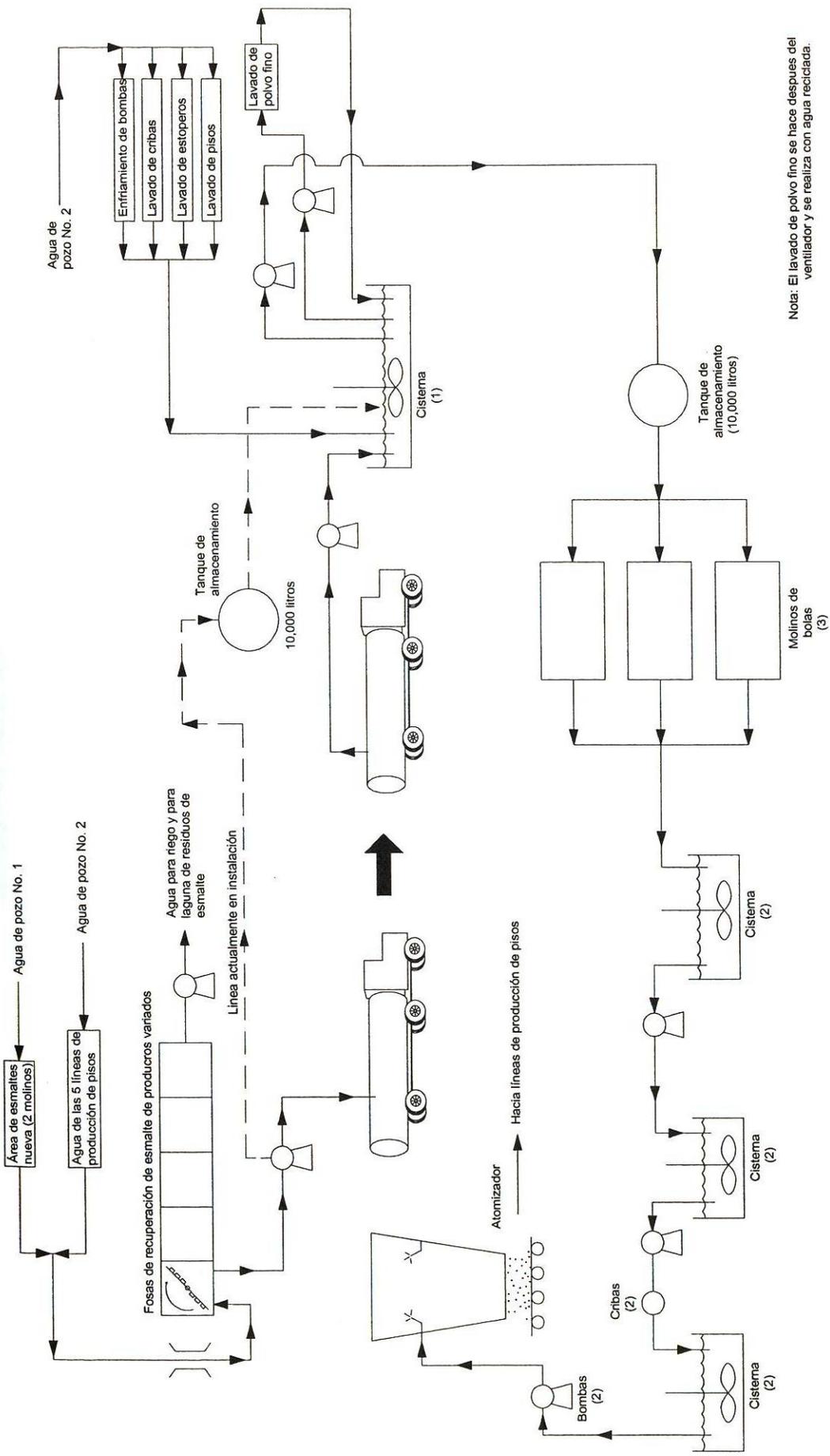
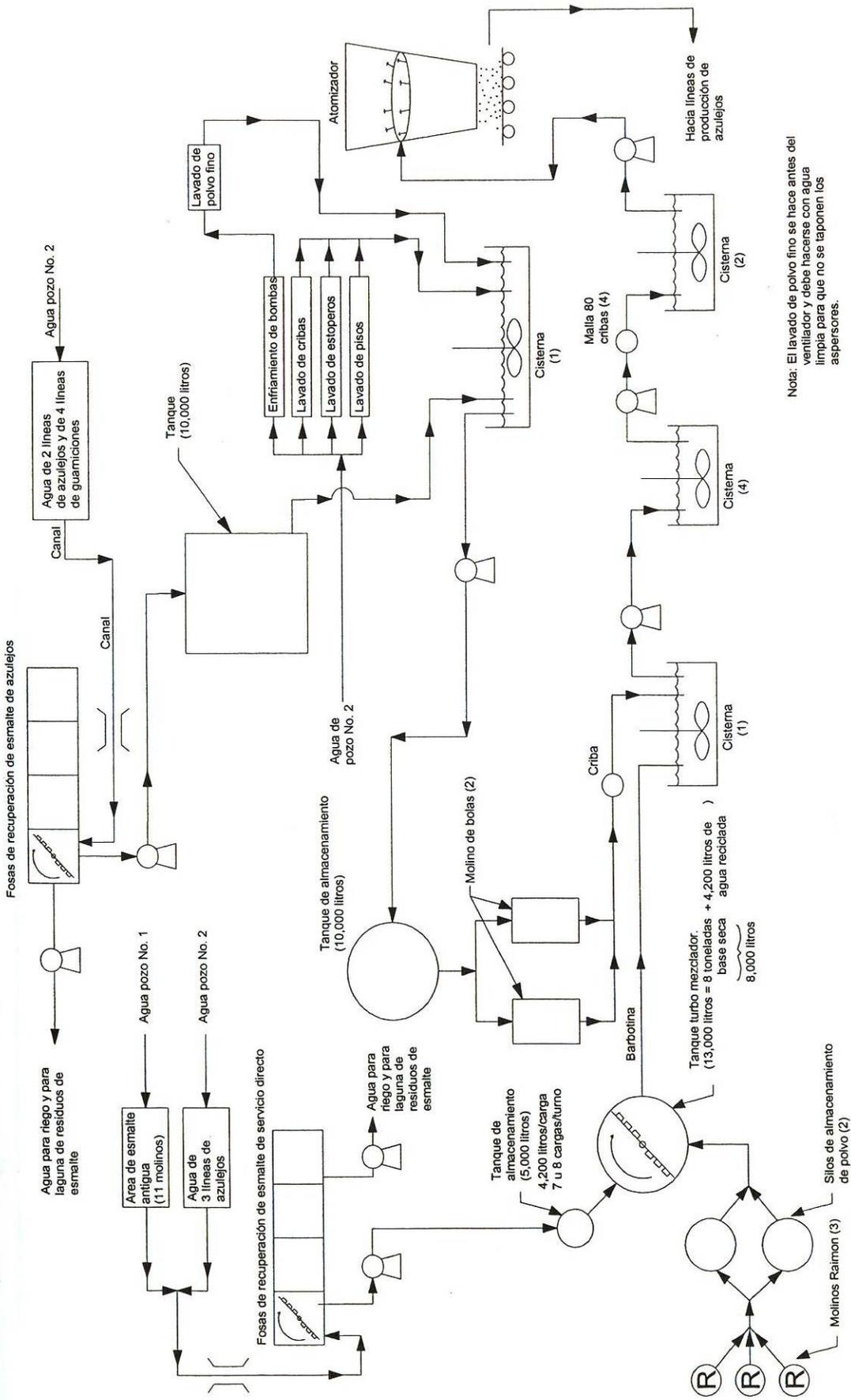


Figura 3.4 Balance de agua en el proceso cerámico, año 2,000.



Nota: El lavado de polvo fino se hace después del ventilador y se realiza con agua reciclada.

Diagrama de flujo de utilización del agua en la preparación de barbotina de cuerpo rojo



Nota: El lavado de polvo fino se hace antes del ventilador y debe hacerse con agua limpia para que no se tapen los aspersores.

Diagrama de flujo de utilización del agua en la preparación de barbotina de cuerpo blanco

### 3.3.3 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA RESIDUAL

Se tomó una muestra compuesta de agua residual de color entre blanco ostión y rosa tenue, de los puntos donde ésta se genera, a la cual se le hizo un análisis físico-químico para determinar las características del agua residual. Los resultados de dicho análisis se muestran en la Tabla 3.3 y muestran un agua con una alta concentración de sólidos suspendidos totales (6,484 mg/L), alta turbidez (281 unidad FTU), alta dureza (860 mg/L CaCO<sub>3</sub>), pH ligeramente alcalino (8.07) y una baja demanda bioquímica de oxígeno (83 mg/L). Éstas son aguas caracterizadas por tener residuos no biodegradables y una gran cantidad de sólidos, con partículas suspendidas que se generan en las áreas de producción del proceso cerámico.

**Tabla 3.3** *Análisis físicoquímico del agua residual.*

DETERMINACIÓN O COMPUESTO	VALOR OBTENIDO	LÍMITE PRÁCTICO DE CUANTIFICACIÓN	METODOLOGÍA UTILIZADA
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)	736	1.0	NMX-AA-20
TURBIDEZ (UNIDAD FTU)	281	4.0	AWWA - 2130
pH	8.07	NO APLICABLE	NMX-AA-08
COLOR APARENTE	6	5 u.c.	NMX-AA-45
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (mg/L)	83	1.0	NMX-AA-28
DUREZA TOTAL (mg/L, CaCO <sub>3</sub> )	860	5.0	NMX-AA-72
ALCALINIDAD AL NARANJA DE METILO (mg/L, CaCO <sub>3</sub> )	300.7	6.0	NMX-AA-36
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)	6,484	1.0	NMX-AA-34/76

### 3.3.4 LA PRUEBA DE JARRAS

La coagulación – floculación del agua constituye el proceso básico que determina en gran parte las condiciones de operación de la planta de tratamiento. De ello depende casi por completo la mayor o menor eficiencia del proceso subsiguiente: el de la separación de sólidos por sedimentación y filtración. La remoción de turbiedad en los sedimentadores y en los filtros, así como la calidad del agua que se obtenga en ellos, se relacionan directamente con la manera como las partículas sean desestabilizadas y con la intensidad de las fuerzas que las aglutinan. Por tanto, el cuidadoso control del proceso de coagulación – floculación, debe constituir una de las principales preocupaciones en la operación de plantas de tratamiento.

Desde alrededor de 1,920, cuando en los Estados Unidos de América (EUA) se empezaron a desarrollar diferentes sistemas para estimar la dosis de coagulante requerida en un sistema de tratamiento, hasta el presente, un sinnúmero de técnicas de control han ido surgiendo y entre ellas están: prueba de jarras convencional, prueba de jarras modificada, potencial zeta, filtración en filtro piloto, contador electrónico de partículas, conductividad, titulación de coloides y concentración volumétrica del floc, entre otros.

Los primeros aparatos para realizar la prueba de jarras fueron desarrollados en los EUA, entre 1,918 y 1,921, por Langelier y Baylis separadamente. Desde entonces la prueba de jarras ha constituido uno de los principales instrumentos de trabajo en las plantas de tratamiento de aguas en todo el mundo.<sup>18</sup>

La prueba de jarras se ejecuta básicamente colocando en cinco o seis vasos de precipitado, o frascos de boca ancha, de 1 a 3 litros de agua de la muestra, agregándole diversas dosis de coagulantes a cada uno mientras se agita fuertemente la muestra durante 2 minutos y luego suspendiendo la agitación violenta y aplicando por 10 a 30 minutos una agitación lenta, durante la cual se observa el aspecto y tamaño del floc formado en cada vaso. Este ensayo intenta simular las condiciones en las cuales coagula el agua en la planta de tratamiento.

Para objeto de este estudio se realizó la prueba de jarras a la muestra compuesta de agua residual de la planta cerámica, con el fin de determinar la dosis óptima de coagulante requerida. Se utilizó como coagulante sulfato de aluminio. Los resultados de la prueba de jarras se muestran en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Resultado de la prueba de jarras del agua residual.

No. de Jarra	mg de floculante por litro de muestra	Minutos de agitación a 100 rpm	Minutos de agitación a 40 rpm	Minutos de sedimentación	Índice de Willcomb
1	200	2	10	3.0	6
2	250	2	10	2.5	6
3	300	2	10	2.0	8
4	350	2	10	2.0	8
5	400	2	10	1.5	10
6	450	2	10	1.5	10
No. de Jarra	Turbidez FTU	Conductividad microhmos / cm	pH	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)
1	12	1,015	7.06	29.0	808
2	10	1,019	6.94	26.0	804
3	7	1,022	6.60	12.5	800
4	5	1,056	6.58	12.0	818
5	4	1,064	6.54	9.2	808
6	4	1,075	6.52	6.0	926

En la Tabla 3.4 se aprecia cómo en la prueba se logra obtener un índice de Willcomb de 10 en las dos últimas jarras, lo cual significa la formación de un floc excelente que se deposita rápido, dejando el agua sobrenadante cristalina. Se escogió la jarra no. 5 como representativa para la determinación de la dosis de coagulante óptima para la

planta de tratamiento, establecida en 400 mg/L. Al agua sobrenadante de esta jarra se le efectuó un análisis fisicoquímico, el cual se muestra en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** *Análisis fisicoquímico del agua sobrenadante de la jarra No.5.*

DETERMINACIÓN O COMPUESTO	VALOR OBTENIDO	LÍMITE PRÁCTICO DE CUANTIFICACIÓN	METODOLOGÍA UTILIZADA
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)	< L.P.C	0.20	NMX-AA-4
TURBIDEZ (UNIDAD FTU)	< L.P.C	4.0	AWWA - 2130
pH	6.54	NO APLICABLE	NMX-AA-08
COLOR APARENTE	< L.P.C	5 u.c.	NMX-AA-45
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (mg/L)	36	1.0	NMX-AA-28
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (mg/L)	130	1.0	NMX-AA-30
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)	9.2	1.0	NMX-AA-34/76
GRASAS Y ACEITES (mg/L)	8.5	5.0	NMX-AA-5
MATERIA FLOTANTE	AUSENTE	NO APLICABLE	DGN-AA6-73
FÓSFORO TOTAL (mg/L)	0.087	0.07	NMX-AA-29
NITRÓGENO TOTAL (mg/L)	1.68	1.0	NMX-AA-26
CIANUROS (mg/L)	< L.P.C	0.01	HACH-8027
ALUMINIO (mg/L)	< L.P.C	1.0	USEPA-2021
ARSENICO (mg/L)	0.0093	0.001	AWWA-AS-3114
CADMIO (mg/L)	< L.P.C	0.05	NMX-AA-51
COBRE (mg/L)	< L.P.C	0.10	NMX-AA-51
MERCURIO (mg/L)	< L.P.C	0.001	NMX-AA-51
NIQUEL (mg/L)	< L.P.C	0.20	NMX-AA-51
PLOMO (mg/L)	< L.P.C	0.20	NMX-AA-51
ZINC (mg/L)	5.98	0.05	NMX-AA-51

El índice de floculación de Willcomb permite, mediante la observación, determinar cómo se desarrolla la formación del floc en la prueba de jarras. En la Tabla 3.6 se muestra el índice de floculación de Willcomb.

**Tabla 3.6** Índice de floculación de Willcomb.<sup>18</sup>

NÚMERO DE ÍNDICE	DESCRIPCIÓN
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

Las características del agua tratada en la prueba de jarras y la seleccionada de la jarra No. 5 muestran un agua sin color, sin turbiedad, sin materia flotante, sin sólidos sedimentables, con baja concentración de sólidos suspendidos, baja concentración de grasas y aceites y baja demanda bioquímica de oxígeno, es un agua clarificada, sin contaminantes, que cumple con los límites especificados en las normas mexicanas, *NOM-001-SEMARNAT-1996* y *NOM-003-SEMARNAT-1997*, en materia de agua residual y que puede ser utilizada en la planta cerámica para las operaciones de lavado y para riego de áreas verdes.

### 3.3.5 ANÁLISIS DE LOS LODOS

También fue objeto de este estudio realizar un análisis CRETIB de los lodos que se generan en la laguna de residuos de esmaltes, para determinar si son un residuo peligroso. El resultado del análisis CRETIB se muestra en la Tabla 3.7. A continuación se presenta la definición de los siguientes conceptos que son importantes para la comprensión del mismo:

- Residuos Peligrosos: Aquellos residuos en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológico-infecciosas representan un peligro para el equilibrio ecológico o el medio ambiente.
- CRETIB: El código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y que significan: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

**Tabla 3.7** Resultado de análisis CRETIB de lodos con residuos de esmalte.

DETERMINACIÓN O COMPUESTO	VALOR OBTENIDO	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMITIDA
pH	9.18	2.0 – 12.5
SULFUROS (mg/kg)	< 50.00	500.00
CIANUROS (mg/kg)	< 0.50	250.00
ARSÉNICO (mg/L)	< 0.05	5.00
BARIO (mg/L)	< 1.00	100.0
CADMIO (mg/L)	< 0.05	1.0
CROMO VI (mg/L)	< 0.15	5.0
PLOMO (mg/L)	< 0.15	5.0
PLATA (mg/L)	< 0.10	5.0
SELENIO (mg/L)	< 0.05	1.0
MERCURIO (mg/L)	0.023	0.2
NIQUEL (mg/L)	< 0.15	5.0

La interpretación de la peligrosidad de los lodos con residuos de esmalte es la siguiente:

- **CORROSIVIDAD:** Negativa por su valor de pH.
- **REACTIVIDAD:** Negativa por su valor de cianuros y sulfuros.
- **TOXICIDAD AL AMBIENTE:** Negativa por su concentración lixiviable de compuestos inorgánicos, arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio.

Los análisis de resultados se hicieron con base en los límites que establece la Norma Oficial Mexicana *NOM-052-SEMARNAT-1993*, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente. Obteniéndose como resultado que los lodos con residuos de esmalte generados en la planta de proceso cerámico de este estudio son Residuos No Peligrosos.

### **3.4 OBJETIVOS**

- Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el agua residual que no es recirculada en el proceso de fabricación de la cerámica y que proviene de actividades de lavado de líneas de producción, de lavado de molinos y de actividades de limpieza en general.
- Implementación en la planta de una red de medidores volumétricos de agua con la cual se podrá medir el consumo de agua en cada una de las áreas de producción de la planta y en las fuentes de suministro. Con esta red de medidores se podrá realizar un balance de agua en la planta, el cual estará basado en registros de lecturas reales tomadas en el campo.
- Propuestas y recomendaciones para un uso óptimo del consumo de agua dentro de la planta.

### 3.5 HIPÓTESIS

- Si el agua residual (la que no está siendo reciclada al proceso de fabricación de los pisos y azulejos en la planta de productos cerámicos) se somete a un sistema de tratamiento, se dejará de contaminar el cuerpo receptor (suelo, jardines y áreas verdes) y además se podrá utilizar el agua tratada en operaciones de lavado y en riego de zonas verdes, lo cual lleva a una disminución de costos por consumo de agua.
- Si se implementa una red de medidores volumétricos de agua en la planta se podrá obtener información diaria y mensual del consumo de agua en cada área de producción y en las fuentes de suministro, con lo que será posible realizar un balance de agua basado en registros de mediciones reales de consumo de agua en el campo. Dicha información servirá para controlar el consumo de agua y tomar acciones correctivas e implementar procedimientos para su uso racional y óptimo.

## **CAPÍTULO 4**

### **DISEÑO DE LAS UNIDADES DE HOMOGENEIZACIÓN, COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE LA PLANTA TRATADORA**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

La importancia del diseño de un buen sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta de productos cerámicos brinda beneficios en la optimización del uso del agua, aportando mejoras a la gestión y uso del agua dentro del proceso, disminuyendo el consumo actual de agua extraída de los pozos para actividades de limpieza, y contribuyendo a la mejora y protección del medio ambiente, permitiendo eliminar la laguna de residuos de esmaltes y la contaminación de las áreas verdes regada con aguas con trazas de esmalte.

El sistema de tratamiento de aguas residuales constará de las siguientes operaciones unitarias: homogeneización, coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

Los criterios y parámetros de diseño de los componentes de la planta se expondrán en el capítulo 4 y en el capítulo 5, al igual que los cálculos para determinar la ingeniera y dimensiones de cada unidad de tratamiento.

#### 4.1.1 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO

En el balance de agua realizado en la planta de proceso cerámico se estimó que de los 377 m<sup>3</sup>/día generados como agua residual, 158 m<sup>3</sup>/día se destinaban a la elaboración de la barbotina de cuerpo rojo y de cuerpo blanco, mientras que 219 m<sup>3</sup>/día se descargaban en la laguna de residuos de esmaltes o se utilizaban en el riego de áreas verdes.

El propósito de este estudio es plantear una solución de tratamiento de aguas residuales a los 219 m<sup>3</sup>/día que se están utilizando sin control y que están contaminando en la planta cerámica. Este caudal corresponde a un gasto de 2.53 litros por segundo (L/s) y se denominará caudal bruto de agua residual. Multiplicando este caudal por un factor de seguridad (FS = 1.20), que cubra las variaciones en el consumo de agua debido al clima, a incrementos o decrementos de producción, fugas u otros factores, se obtiene el caudal medio de agua residual definitivo.

$$Q_m = FS \cdot Q$$

en donde:

$Q_m$  : caudal medio de agua residual, en L/s

FS : factor de seguridad, adimensional = 1.2

Q: caudal bruto de agua residual, en L/s

$$Q_m = 1.20 (2.53) \text{ L/s}$$

$$Q_m = 3.04 \text{ L/s}$$

Para efecto de este estudio se objetarán las cifras decimales y se adoptará como caudal medio de agua residual el valor de  $Q_m = 3.00 \text{ L/s}$ .

Si la planta de tratamiento operara solamente un turno laboral, lo cual corresponde a trabajar solamente 8 horas de 24 horas laborales, con el fin de facilitar que en los dos turnos laborales restantes se realicen actividades de limpieza, lavado de filtros, mantenimiento de unidades, embalaje de lodos, entre otras, el caudal medio de agua residual para la planta tratadora se triplicaría para poder atender la acumulación de aguas residuales durante los turnos de no operación, determinándose de esta manera el caudal de diseño de la planta tratadora. La planta operará durante el primer turno de 7 AM a 15 PM.

$$Q_d = 3 Q_m$$

en donde:

$Q_d$  : caudal de diseño, en L/s

$Q_m$  : caudal medio de agua residual, en L/s

$$Q_d = 3 (3) \text{ L/s} = 9 \text{ L/s.}$$

## 4.2 TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN

El tanque de homogeneización es la primera unidad de la planta tratadora de aguas residuales y es en éste donde se almacena el agua residual cruda, garantizándose un agua lo más homogénea posible. Este tanque debe tener capacidad suficiente para absorber la variación horaria que presentan los caudales de agua residual generados en el proceso cerámico. El caudal de agua residual no es constante y varía con el tiempo dependiendo de los programas de producción y del horario en que se realizan las actividades de lavado en las líneas de producción y en el área de esmaltes. También deberá garantizar un caudal de alimentación regular a las instalaciones de tratamiento.

La determinación del volumen del tanque consiste en conciliar las leyes de entrada y de salida de los caudales horarios que se presentan en 24 horas de operación, mediante un método analítico que permite el cálculo del volumen de almacenamiento a base del volumen requerido para cubrir la demanda, el cual se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Estimación del volumen de almacenamiento del tanque de homogeneización.

HORAS	ENTRADAS (m <sup>3</sup> /hora)	SALIDAS (m <sup>3</sup> /hora)	VOLUMEN REQUERIDO PARA CUBRIR LA DEMANDA (m <sup>3</sup> )
0 - 1	11.34	0	0
1 - 2	11.12	0	0
2 - 3	12.42	0	0
3 - 4	12.74	0	0
4 - 5	10.80	0	0
5 - 6	11.23	0	0
6 - 7	11.02	0	0
7 - 8	8.42	32.40	23.98
8 - 9	7.55	32.40	24.85
9 - 10	6.48	32.40	25.92
10 - 11	6.47	32.40	25.93
11 - 12	8.64	32.40	23.76
12 - 13	7.56	32.40	24.84
13 - 14	9.72	32.40	22.68
14 - 15	7.56	32.40	24.84
15 - 16	11.34	0	0
16 - 17	12.96	0	0
17 - 18	11.88	0	0
18 - 19	12.97	0	0
19 - 20	14.04	0	0
20 - 21	14.05	0	0
21 - 22	14.04	0	0
22 - 23	12.42	0	0
23 - 24	12.43	0	0
TOTAL m <sup>3</sup> /día	∑ 259.20	∑ 259.20	∑ 196.80

Para determinar la entrada de caudales de agua residual por hora ( $\text{m}^3/\text{hora}$ ), se tomaron mediciones, cada hora, del gasto de agua residual generado en la fábrica cerámica en un día completo típico de producción; éstos se muestran en la primera columna de la Tabla 4.1. El caudal de salida se muestra en la segunda columna de la tabla en mención y está determinado por el caudal de diseño, 9 L/s, correspondiendo a  $32.40 \text{ m}^3/\text{hora}$  y el cual se suministrará a las unidades de tratamiento durante las 8 horas que operará la planta tratadora de aguas residuales. La tercera columna de la tabla en mención muestra los volúmenes de almacenamiento que se requieren para satisfacer la demanda, que en este caso es el caudal de diseño, es decir que dicho volumen es suficiente para satisfacer los volúmenes de salida durante el o los intervalos de tiempo en que la salida es mayor que la entrada. Lo anterior está basado en el hecho de que al término del ciclo considerado, generalmente un día, el volumen total de salida debe necesariamente ser igual al volumen total de entrada.<sup>19</sup>

El volumen del tanque de homogeneización es la suma de los volúmenes requeridos para cubrir la demanda en un ciclo de un día, y según la Tabla 4.1 el resultado es igual a  $196.80 \text{ m}^3$ . Las dimensiones propuestas son:

$$V = a b L$$

En donde:

V : volumen del tanque, en  $\text{m}^3$

a : ancho, en m

b : profundidad, en m

L : longitud, en m

Para un volumen de  $196.80 \text{ m}^3$  las dimensiones son  $a = 4 \text{ m}$ ,  $b = 4.10 \text{ m}$  y  $L = 12 \text{ m}$ , pero adoptándose un borde libre de 0.40 metros, la profundidad del tanque sería  $b = 4.50 \text{ m}$ , de esta manera el volumen definitivo del tanque de homogeneización es:

$$V = (4) (4.50) (12)$$

$$V = 216 \text{ m}^3$$

En esta unidad de homogeneización es conveniente instalar un sistema de agitación para lograr la homogeneidad del agua en un régimen de flujo turbulento ( $Re > 10,000$ ). El sistema de agitación puede ser mecánico, mediante agitadores de turbinas de palas planas, o un sistema de aireación por difusores, este último además de agitar el agua favorece la aireación de la misma, con lo que se consigue la eliminación de malos olores y se favorece la oxidación de la materia orgánica y de los compuestos oxidables presentes en el agua.

Las turbinas son dispositivos para agitación (impulsor) que consisten en paletas montadas radialmente y de forma perpendicular en los bordes de una placa plana, girando a velocidades moderadas, entre 70 y 150 rpm.<sup>20</sup>

El gradiente de velocidad generado en el tanque homogeneizador debe estar entre  $250 \text{ s}^{-1} < G < 1,500 \text{ s}^{-1}$ .<sup>21</sup>

Los procesos de mezclado tienen generalmente lugar en el régimen de flujo turbulento donde predominan las fuerzas de inercia. Por regla general, cuanto más alta sea la velocidad y mayor la turbulencia tanto más eficaz será el mezclado. Rushton desarrolló, considerando las fuerzas de viscosidad y de inercia, las siguientes relaciones matemáticas para el cálculo de la energía necesaria en condiciones turbulentas:

$$P = k \rho n^3 D^5$$

En donde:

P : potencia necesaria, en N m / segundo o en vatios (watts)

k : constante del impulsor en flujo turbulento, adimensional, véase Tabla 4.2

n : revoluciones por segundo, rps

$\rho$  : densidad del fluido, en  $\text{kg}_m/\text{m}^3$  o en  $\text{N s}^2/\text{m}^4$

D : diámetro del impulsor, en m.

**Tabla 4.2** Valores de  $k$  para las necesidades de energía de mezclado.<sup>20</sup>

IMPULSOR	RÉGIMEN TURBULENTO, VALOR DE $k$
Hélice, paso cuadrado, 3 palas	0.32
Hélice, paso de dos, 3 palas	1.00
Turbina, 6 palas planas	6.30
Turbina, 6 palas curvas	4.80
Turbina ventilador, 6 palas	1.65
Turbina, 6 palas en punta de flecha	4.00
Paleta plana, 6 palas	1.70
Turbina cerrada, 2 palas curvas	1.08
Turbina cerrada con estator sin deflectores	1.12

Para determinar el régimen de flujo se utiliza el número de Reynolds acorde con la siguiente expresión:

$$Re = D^2 n \rho / \mu$$

En donde:

Re: número de Reynolds, adimensional

$n$  : revoluciones por segundo, rps

$\rho$  : densidad del fluido, en  $kg_m / m^3$  o en  $N s^2 / m^4$

$D$  : diámetro del impulsor, en m.

$\mu$  : viscosidad dinámica, en  $N s/m^2$

Para determinar el gradiente hidráulico se utiliza la siguiente expresión:

$$G = \sqrt{(P / \mu V)}$$

En donde:

G : gradiente medio de velocidad, en  $s^{-1}$

P : potencia necesaria, en N m/s o en Watt

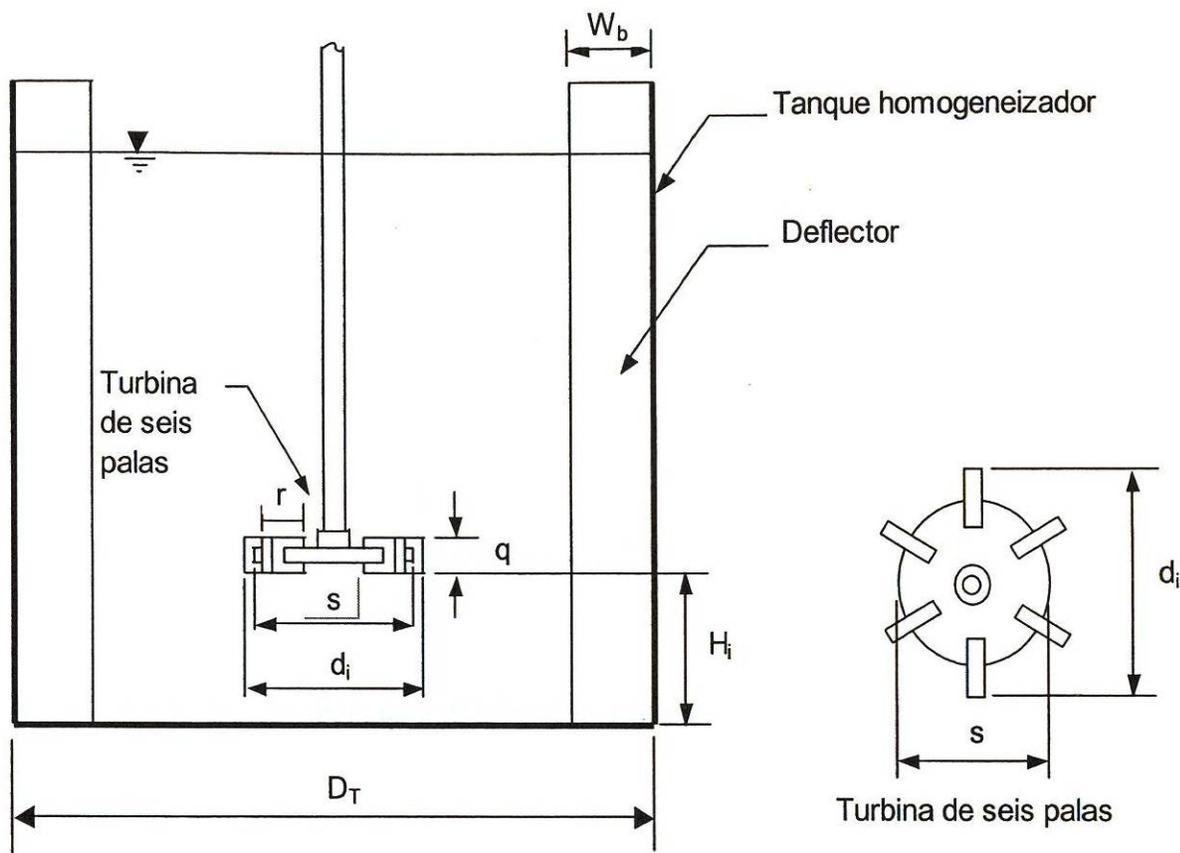
$\mu$  : viscosidad dinámica, en N s/m<sup>2</sup>

V: volumen de líquido a mezclar, en m<sup>3</sup>

En la operación de mezclado pueden presentarse movimientos giratorios de la masa líquida que siguen la inercia de los impulsores disminuyendo la eficiencia de la mezcla. Estos movimientos de masa son eliminados con la instalación de deflectores situados en la pared del depósito, el ancho de cada uno de los cuales es un 10% del diámetro del depósito. Las dimensiones de los deflectores, y de los componentes de la turbina o impulsor se determinan acorde a los criterios de diseño que se muestran en la Figura 4.1 y en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** *Diseño de un mezclador de turbina.*

ELEMENTO DE LA TURBINA	CRITERIO DE DISEÑO	DIMENSIÓN (m)
Diámetro o ancho del tanque	$D_T$	4.0
Diámetro de la turbina	$0.30 D_T < d_i < 0.50 D_T$	1.20
Longitud de la pala de la turbina	$r = d_i / 4$	0.30
Altura de la turbina respecto del fondo	$H_i = d_i$	1.20
Ancho de las palas de la turbina	$q = d_i / 5$	0.24
Ancho de los deflectores del tanque	$W_b = D_T / 10$	0.40
Diámetro del disco central	$S = D_T / 4$	0.90
Longitud de las palas del impulsor montadas en el disco central	$r / 2 = d_i / 8$	0.15



**Figura 4.1** Mezclador de turbina en un tanque provisto de deflectores.<sup>21</sup>

El tanque homogeneizador se dividirá en tres secciones de 4 metros cada una a lo largo de los 12 metros de longitud del mismo, con el fin de colocar en cada sección un mezclador de turbina.

El volumen que mezclará cada turbina será de  $V = 65.6 \text{ m}^3$ , que es la tercera parte de la capacidad máxima del tanque  $196.80 \text{ m}^3$ . Con el diámetro de la turbina  $D = 1.20 \text{ m}$ , tomando un valor de  $k = 6.30$  para turbina con 6 palas planas, con una velocidad moderada de turbina de  $n = 1.50 \text{ rps}$  (90 revoluciones por minuto) y con las propiedades del agua tomadas para una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , densidad  $\rho = 998.23 \text{ N s}^2/\text{m}^4$  y viscosidad dinámica  $\mu = 0.001008 \text{ N s}/\text{m}^2$  se calcula a continuación la energía necesaria  $P$ , el gradiente de velocidad  $G$  y el número de Reynolds para determinar qué régimen de flujo alcanza la mezcla en el tanque homogeneizador.

El cálculo de la potencia necesaria :

$$P = k \rho n^3 D^5$$

$$P = (6.30) (998.23) (1.50)^3 (1.20)^5$$

$$P = 52,814.26 \text{ N m / s}$$

$$P = 70.8 \text{ HP}$$

El cálculo del gradiente hidráulico:

$$G = \sqrt{(P / \mu V)}$$

$$G = \sqrt{(52,814.26) / ((0.001008) (65.60))}$$

$$G = 893.70 \text{ s}^{-1}$$

El cual está dentro del intervalo  $250 \text{ s}^{-1} < G < 1,500 \text{ s}^{-1}$ .

El cálculo del número de Reynolds:

$$Re = D^2 n \rho / \mu$$

$$Re = (1.20)^2 (1.50) (998.23) / (0.001008)$$

$$Re = 2,139,064.29$$

El cual cumple con el requisito de  $Re > 10,000$ , garantizando régimen turbulento para la mezcla.

La distribución de las turbinas en el tanque de homogeneización, la localización de los deflectores, las dimensiones del tanque y detalles en planta se muestran en la Figura 4.2. La sección transversal del tanque, dimensiones de la turbina y su localización, se muestran en la Figura 4.3.

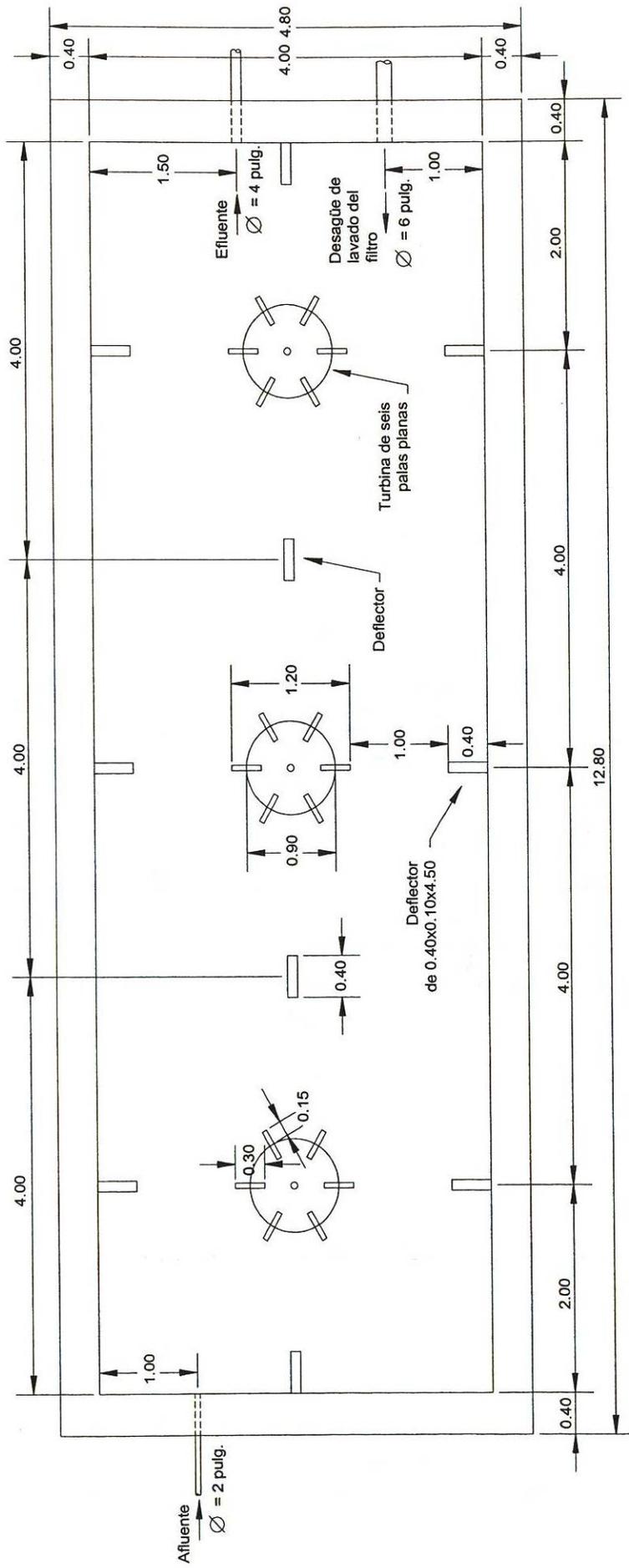


Figura 4.2  
 Vista en planta del tanque de homogeneización

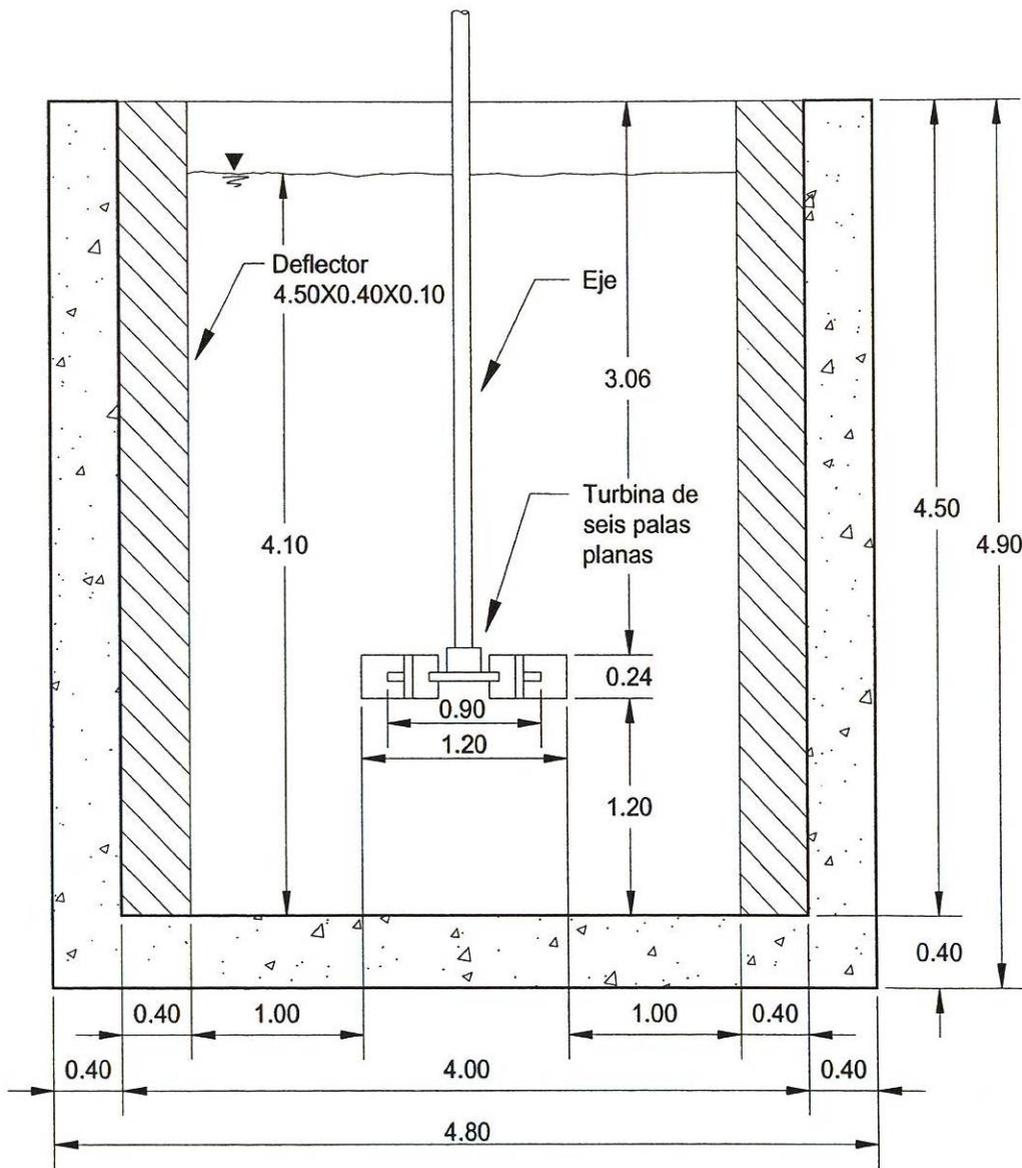


Figura 4.3  
Sección transversal del tanque de homogeneización

#### 4.2.1 CÁLCULO DE LA TUBERÍA DEL INFLUENTE

El cálculo del diámetro de la tubería que suministrará agua residual al tanque homogeneizador se efectúa con el gasto medio de agua residual  $Q_m = 3 \text{ L/s}$  ( $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y una velocidad del flujo de  $v = 1.50 \text{ m/s}$ . El cálculo se determina con la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{4 Q_m / v \pi}$$

En donde:

D : diámetro de la tubería, en m

$Q_m$  : caudal medio de agua residual, en  $\text{m}^3/\text{s}$

v : velocidad del flujo, en m/s

$$D = \sqrt{4 (0.003) / (1.50 \pi)}$$

$$D = 0.05 \text{ m}$$

$$D = 1.97 \text{ pulgadas}$$

Se adopta el diámetro comercial  $D = 2$  pulgadas, para el cual recalculando la velocidad del flujo lleva a  $v = 1.48 \text{ m/s}$ .

#### 4.2.2 CÁLCULO DE LA TUBERÍA DE SALIDA DEL HOMOGENEIZADOR

El cálculo del diámetro de la tubería a la salida del tanque homogeneizador se efectúa con el gasto de diseño  $Q_d = 9 \text{ L/s}$  ( $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y velocidad del flujo  $v = 1.50 \text{ m/s}$ . El cálculo se lleva a cabo con la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{4 Q_d / v \pi}$$

En donde:

D : diámetro de la tubería, en m

$Q_d$  : caudal de diseño, en  $m^3/s$

v : velocidad del flujo, en m/s

$$D = \sqrt{4 (0.009) / (1.50 \pi)}$$

$$D = 0.087 \text{ m}$$

$$D = 3.42 \text{ pulgadas}$$

Se adopta el diámetro comercial  $D = 4$  pulgadas, para el cual recalculando la velocidad del flujo produce  $v = 1.11$  m/s.

### 4.3 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Se llama coagulación – floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos.

Dicho proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros.<sup>18</sup>

El uso de cualquier otro proceso, como la sedimentación simple, para la remoción de partículas muy finas, resulta antieconómico, si no imposible.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación – floculación del agua:

- La desestabilización de las partículas suspendidas, es decir, la remoción de las fuerzas electrostáticas que las mantienen separadas.
- El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de flóculos porosos.

Al primer aspecto los autores suelen referirse como a coagulación y al segundo como floculación.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar agregados mayores.

En la floculación debe distinguirse entre: floculación ortocinética y pericinética.

La primera es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias por ejemplo).

La segunda es la promovida, internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro del movimiento browniano y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse, y se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula.<sup>18</sup>

### 4.3.1 ADICIÓN DEL COAGULANTE

Los coagulantes como el sulfato de aluminio, siempre deben aplicarse en solución verdadera. El aplicarlos en suspensión o peor aún en polvo, sin que las partículas del compuesto hayan tenido tiempo de disolverse, disminuye notablemente la efectividad del proceso, lo que se traduce en un desperdicio de dichas sustancias químicas.

La solución de coagulantes puede prepararse en dos formas:

- Dosificando el polvo en forma continua en un tanque de hidratación, desde donde la solución se lleva al punto de aplicación, lo que impropriadamente se llama dosificación en seco.
- Preparando la solución previamente y dosificándola por gravedad o por bombeo en el punto de aplicación, lo que se suele llamar dosificación en húmedo.

Tanto en el primero como en el segundo caso, los coagulantes están ya mezclados con el agua cuando se aplican.<sup>18</sup>

En este estudio se propone una dosificación en húmedo. A continuación se presenta el cálculo del caudal de la solución de sulfato de aluminio, la determinación del diámetro de la tubería dosificadora y el volumen del tanque que almacenará la solución. La concentración de la solución de sulfato de aluminio es igual a  $C_1 = 20 \text{ mg/mL}$ , la concentración del sulfato de aluminio en el afluente es igual a  $C_2 = 400 \text{ mg/L}$  ( $0.40 \text{ mg/mL}$ ), dato tomado de la prueba de jarras; el caudal en el afluente es el caudal de diseño  $Q_d = 9 \text{ L/s}$  ( $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la determinación del gasto de la solución de sulfato de aluminio ( $q$ ) se calcula según la siguiente expresión:

$$q = (Q_d C_2) / (p C_1)$$

En donde:

$q$  : caudal de la solución de sulfato de aluminio en  $\text{m}^3/\text{s}$

$Q_d$  : caudal de diseño en  $m^3/s$

$C_1$  : concentración de la solución de sulfato de aluminio en  $mg/mL$

$C_2$  : concentración del sulfato de aluminio en el afluente en  $mg/mL$

$p$  : pureza del sulfato de aluminio, 90%

$$q = (0.009) (0.40) / (0.90) (20)$$

$$q = 0.0002 m^3/s$$

$$q = 0.20 L/s$$

El cálculo del diámetro de la tubería dosificadora de la solución de sulfato de aluminio se efectúa con el caudal de la solución de sulfato de aluminio,  $q = 0.0002 m^3/s$ , y velocidad de flujo  $v = 1.50 m/s$ . El cálculo se lleva a cabo con la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{4 q / v \pi}$$

En donde:

$D$  : diámetro de la tubería, m

$q$  : caudal de la solución de sulfato de aluminio,  $m^3/s$

$v$  : velocidad del flujo,  $m/s$

$$D = \sqrt{4 (0.0002) / (1.50 \pi)}$$

$$D = 0.013 m$$

$$D = 0.513 \text{ pulgadas}$$

Se adopta el diámetro comercial  $D = 1/2$  pulgada, para el cual recalculando la velocidad del flujo produce  $v = 1.58 m/s$ .

La solución de sulfato de aluminio se almacenará en un tanque que tendrá capacidad para abastecer un turno de operación de la planta, 8 horas de operación por día, (28,800 segundos). De tal manera que el volumen del tanque es igual a:

$$V = q t$$

En donde:

V : volumen del tanque para la solución de sulfato de aluminio, en  $m^3$

q : caudal de la solución de sulfato de aluminio, en  $m^3/s$

t : tiempo de un turno de operación de la planta tratadora, en segundos

$$V = (0.0002) (28,800)$$

$$V = 5.76 m^3$$

Se propone un tanque de diámetro  $D = 2.0$  m y altura  $h = 1.83$  m, si se coloca un borde libre de aproximadamente  $BL = 0.30$  m, la altura definitiva del tanque es  $h = 2.15$  m. La solución de sulfato de aluminio de  $20$  mg/mL, con un volumen de solución de  $5.76 m^3$  se tendrá que preparar diariamente para satisfacer el suministro del coagulante durante las 8 horas de operación diarias de la planta tratadora.

El mezclado para la preparación de la solución de sulfato de aluminio se hará mediante un sistema de agitación que se calcula con los criterios de diseño expuestos en el numeral 4.2 de este estudio. El volumen que mezclará la turbina será de  $V = 5.76 m^3$ . Con el diámetro de la turbina  $D = 0.60$  m ( 30% del diámetro del tanque, 2.0 m), tomando un valor de  $k = 6.30$  para la turbina con 6 palas planas, con una velocidad moderada de turbina de  $n = 1.75$  rps (105 rpm) y con las propiedades del agua tomadas para una temperatura de  $20^\circ C$ , densidad  $\rho = 998.23$  N  $s^2/m^4$  y viscosidad dinámica  $\mu = 0.001008$  N  $s/m^2$  se calcula a continuación la potencia necesaria P, el gradiente de velocidad G y el número de Reynolds para determinar qué régimen de flujo alcanza la mezcla en el tanque dosificador de sulfato de aluminio.

El cálculo de la energía necesaria:

$$P = k \rho n^3 D^5$$

$$P = (6.30) (998.23) (1.75)^3 (0.60)^5$$

$$P = 2,620.85 \text{ N m/s}$$

$$P = 3.51 \text{ HP}$$

El cálculo del gradiente hidráulico:

$$G = \sqrt{(P / \mu V)}$$

$$G = \sqrt{(2,620.85) / ((0.001008) (5.76))}$$

$$G = 671.86 \text{ s}^{-1}$$

El valor calculado está dentro del intervalo  $250 \text{ s}^{-1} < G < 1,500 \text{ s}^{-1}$ .

Para el cálculo del número de Reynolds:

$$Re = D^2 n \rho / \mu$$

$$Re = (0.60)^2 (1.75) (998.23) / (0.001008)$$

$$Re = 623,893.75$$

El cual cumple con el requisito de  $Re > 10,000$ , garantizando flujo turbulento para la mezcla. Para evitar la rotación de masas de líquido se colocarán 4 deflectores en el tanque con un ancho igual al 10 % del diámetro (2.0 m) del tanque;  $W_b = 0.20 \text{ m}$ .

Antes de mezclar el coagulante con el flujo de agua residual, si esta presenta un pH mayor a 7, se adicionará ácido clorhídrico para ajustar el pH a un valor de 7. El HCL se presenta en disolución acuosa de cloruro de hidrógeno, Cl:97.23% y H:2.76% con peso molecular igual a 36.46 g/mol.

### 4.3.2 EL MEZCLADO RÁPIDO

La función del sistema de mezclado rápido es dispersar el coagulante uniformemente en toda la masa de agua, con la máxima rapidez que se pueda alcanzar a fin de asegurar que el proceso de coagulación sea tan eficaz como sea posible. Este proceso generalmente es seguido por un período de floculación, durante el cual se agita suavemente el agua para promover la aglomeración de las partículas coaguladas, o para no desgarrarlas. Las unidades de mezclado rápido se localizan en el principio de la planta y están diseñadas para generar turbulencia intensa en el agua cruda por medios mecánicos o hidráulicos. La rápida difusión es necesaria debido a que el proceso de coagulación, que comprende la hidrólisis del coagulante y desestabilización del material

coloidal, se completa casi instantáneamente (en menos de un segundo). Puesto que los mezcladores rápidos hidráulicos pueden lograr altos gradientes de velocidad para la difusión rápida de coagulantes sin utilizar equipo mecánico, éstos se prefieren en los países en desarrollo. Además, no requieren equipo importado y se construyen, operan y mantienen fácilmente con personal y materiales locales.<sup>22</sup>

En el proceso de mezclado rápido el principal objetivo consiste en mezclar completamente una sustancia con otra. La mezcla rápida puede durar desde una fracción de segundo hasta alrededor de 30 segundos. La mezcla rápida de productos químicos se puede llevar a cabo mediante diversos sistemas, entre los que destacan:

- Resaltos hidráulicos en canales
- Dispositivos Venturi
- Conducciones
- Por bombeo
- Mediante mezcladores estáticos
- Mediante mezcladores mecánicos

En los cuatro primeros, el mezclado se consigue como consecuencia de las turbulencias que se crean en el régimen de flujo. En los mezcladores estáticos, las turbulencias se producen como consecuencia de la disipación de energía, mientras que en los mezcladores mecánicos las turbulencias se consiguen mediante la aportación de energía con impulsores giratorios como las paletas, hélices y turbinas.<sup>21</sup>

En este estudio se propone utilizar un mezclador estático el cual deberá instalarse en la tubería de diámetro  $D = 4$  pulg, que alimenta al tanque floculador. El número de elementos que debe tener este mezclador estático se determina con el caudal de diseño, 9 L/s (142.67 galones/minuto), según la siguiente expresión:

$$n_e = 3,157 Q_d / D$$

En donde:

$n_e$  : elementos requeridos de mezclador estático

$Q_d$  : caudal de diseño en galones/minuto

$D$  : diámetro de la tubería en pulgadas

$$n_e = 3,157 (142.67) / (4)$$

$$n_e = 112,602$$

Si  $n_e$  es mayor que 1,000 se deben usar 6 elementos. El cálculo de la pérdida de carga debido a un mezclador estático está determinada por la siguiente expresión:

$$\Delta P = 0.0020 Q_d^2 SG \mu^{0.10} / D^4$$

En donde:

$\Delta P$  : pérdida de carga en libras/pulgada<sup>2</sup>

$Q_d$  : caudal de diseño en galones/minuto

$SG$  : gravedad específica del agua, igual a  $1\text{gcm}^{-3}$

$\mu$  : viscosidad dinámica del agua en centipoises

$D$  : diámetro de la tubería en pulgadas.

La viscosidad dinámica del agua a una temperatura de 20° C es igual a 0.01009 poise (1 centipoise para fines prácticos).

$$\Delta P = 0.0020 (142.67)^2 (1) (1)^{0.10} / 4^4$$

$$\Delta P = 0.159 \text{ libras/pulgada}^2$$

La pérdida de carga de 0.159 libras/pulgada<sup>2</sup>, transformada a metros de columna de agua equivale a 0.11 m.

### 4.3.3 DISEÑO DEL FLOCULADOR MECÁNICO

Se plantea para este estudio un floculador giratorio que consta de un sistema de paletas adheridas a un eje vertical, el cual gira impulsado por un motor eléctrico desplazando el agua y produciendo un trabajo.

Bean considera que el área total de las paletas no debe ser mayor del 15 al 20% de la sección transversal del tanque,<sup>18</sup> con el objeto de prevenir la rotación general del líquido alrededor del eje, disminuyendo de esta manera la eficiencia de la agitación. Para evitar esto, algunos diseñadores prefieren colocar los deflectores fijos en los muros del tanque.

La distancia entre el extremo de la paleta agitadora y el fondo del tanque debe ser preferiblemente mayor de 0.30 m.<sup>18</sup>

El tiempo de retención hidráulico durante la floculación debe ser aproximadamente entre 2 y 2.5 veces el tiempo de agitación de la prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante. El tiempo de agitación en la prueba de jarras del presente estudio dio como resultado  $t_j = 12$  minutos, 2 minutos de agitación rápida y 10 minutos de agitación lenta.

Se plantean dos tanques iguales (dos compartimientos), instalados en serie para conformar el floculador. Los cálculos que se presentan a continuación son sólo para el primer tanque, pero son válidos para el segundo. Las dimensiones propuestas para el tanque floculador son:

$$V = a b L$$

En donde:

V : volumen del tanque, en  $m^3$

a : ancho, en m

b : profundidad, en m

L : longitud, en m

$$V = (2.60) (4 (0.3048) ) (2.60)$$

$$V = 8.24 m^3$$

Para un volumen de  $8.24 \text{ m}^3$  las dimensiones son  $a = 2.60$  ,  $b = 1.22$  y  $L = 2.60$ , pero adoptándose un borde libre de 0.28 metros, la profundidad del tanque sera  $b = 1.50$ , de esta manera el volumen definitivo del tanque de floculación es:

$$V = (2.60) (1.50) (2.60)$$

$$V = 10.14 \text{ m}^3$$

El cálculo del tiempo de retención hidráulico en el tanque floculador se calcula según la siguiente expresión:

$$t = V/Q_d$$

En donde:

$t$  : tiempo de retención hidráulico, en segundos

$V$ : volumen de líquido a mezclar, en  $\text{m}^3$

$Q_d$  : caudal de diseño, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$$t = (8.24) / (0.009)$$

$$t = 915.55 \text{ segundos}$$

$$t = 15.26 \text{ minutos}$$

El tiempo obtenido es para un tanque, como la floculación constará de dos compartimientos el tiempo total de floculación es el doble;  $t = 30.52$  minutos, el cual corresponde a 2.54 veces el tiempo de agitación de la prueba de jarras ( $t_j = 12$  minutos) cumpliendo con el criterio de diseño expuesto anteriormente.

El agitador será de eje vertical con 4 paletas verticales, dos en cada lado. Se colocarán paletas de 6 pulgadas de ancho ( $a = 0.1524 \text{ m}$ ) por dos pies de largo ( $L = 0.6096 \text{ m}$ ). El área de la paleta será:

$$A_p = a L$$

En donde:

$A_p$  : área de la paleta, en  $m^2$

$a$  : ancho de la paleta, en  $m$

$L$  : longitud de la paleta, en  $m$

$$A_p = (0.1524) (0.6096)$$

$$A_p = 0.093 \text{ m}^2$$

El área total de las paletas será cuatro veces  $0.093 \text{ m}^2$ , o sea  $A_{PT} = 0.372 \text{ m}^2$ .

El área transversal del tanque floculador se calcula de la siguiente manera:

$$A_T = a b$$

En donde:

$A_T$  : área transversal del tanque, en  $m^2$

$a$  : ancho del tanque, en  $m$

$b$  : profundidad del tanque, en  $m$

$$A_T = (2.60) (1.22)$$

$$A_T = 3.172 \text{ m}^2$$

La relación entre el área de las paletas con el área transversal del tanque floculador es igual a:

$$A_{PT} / A_T = 0.372 \text{ m}^2 / 3.172 \text{ m}^2$$

$$A_{PT} / A_T = 11.73 \%$$

La relación de áreas cumple con el criterio de diseño de Bean; el área total de las paletas no debe ser mayor del 15 al 20% de la sección transversal del tanque.

La relación largo ancho de las paletas del agitador es igual a:

$$L / a = 0.6096 / 0.1524$$

$$L / a = 4$$

La potencia neta del agitador se calcula según la siguiente expresión:

$$P = ( 12,600 C_D n^3 ( 1 - k )^3 \Sigma Ar^3 ) / V$$

En donde:

P : potencia neta por unidad de volumen, en  $kg_f / m^2 s$

$C_D$  : coeficiente de arrastre de las palas, adimensional, veáse Tabla 4.4

n : revoluciones por segundo, rps

k : coeficiente que representa la relación entre la velocidad del fluido y la velocidad del impulsor, es adimensional y se toma igual a 0.25.

$\Sigma Ar^3$  : suma de los productos del área de las paletas por su distancia al eje de rotación r, al cubo, en  $m^5$

V : volumen de líquido a mezclar en  $m^3$

Según Rouse,<sup>18</sup> para secciones rectangulares que se desplazan en el agua el valor de  $C_D$  puede estimarse según la Tabla 4.4, acorde con la relación largo ancho de la paleta.

**Tabla 4.4** *Coeficiente de arrastre de palas según Rouse.<sup>18</sup>*

L / a	NÚMERO DE REYNOLDS Re	$C_D$
1	$> 10^3$	1.16
5	$> 10^3$	1.20
20	$> 10^3$	1.50
$\infty$	$> 10^3$	1.95

Interpolando en la Tabla 4.4 para la relación largo ancho que se obtuvo de las paletas igual a  $L / a = 4$ , se obtiene un coeficiente de arrastre de las paletas  $C_D = 1.19$ .

El cálculo de  $\Sigma Ar^3$ , suma de los productos del área de las paletas por su distancia al eje de rotación al cubo, se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Cálculo de  $\Sigma Ar^3$ .

ÁREA DE LA PALETA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE PALETAS	RADIO DE LA PALETA (m)	$\Sigma Ar^3$
0.093	2	0.674	0.057
0.093	2	0.271	0.004
		TOTAL	0.061

Con el coeficiente  $k = 0.25$ , el volumen de líquido a mezclar  $V = 8.24 \text{ m}^3$ , el coeficiente  $C_D = 1.19$  y la sumatoria  $\Sigma Ar^3 = 0.061 \text{ m}^5$ , se determina la siguiente expresión para la potencia neta por unidad de volumen  $P$  en  $\text{kg}_f / \text{m}^2 \text{ s}$ , en función de la velocidad  $n$  del agitador en rps.

$$P = 12,600 (1.19) (1 - 0.25)^3 (0.061) n^3 / (8.24)$$

$$P = 46.83 n^3$$

El cálculo del gradiente de velocidad se determinó con la siguiente expresión:

$$G = \sqrt{(P / \mu)}$$

En donde:

$G$  : gradiente medio de velocidad, en  $\text{s}^{-1}$

$P$  : potencia neta por unidad de volumen, en  $\text{kg}_f / \text{m}^2 \text{ s}$

$\mu$  : viscosidad dinámica, en  $\text{kg}_f \text{ s} / \text{m}^2$

La viscosidad dinámica del agua para una temperatura de 20 ° C es  $\mu = 0.0001029 \text{ Kg}_f \text{ s/m}^2$ .

El cálculo de la potencia en unidades HP se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{HP} = P V \text{FS} / 75$$

En donde:

HP : potencia neta en unidades HP

P : potencia neta por unidad de volumen, en  $\text{kg}_f / \text{m}^2 \text{ s}$

V : volumen de líquido a mezclar, en  $\text{m}^3$  (8.24  $\text{m}^3$ )

FS : factor de seguridad, se asigna un valor de 4

El cálculo de la potencia neta por unidad de volumen P, el gradiente de velocidad G, y la potencia en unidades HP, se muestra en la Tabla 4.6.

Camp estimó que el gradiente de velocidad óptimo en los floculadores estaba entre  $20 \text{ s}^{-1} < G < 40 \text{ s}^{-1}$ .<sup>18</sup>

Del análisis de la Tabla 4.6 se arrojan los siguientes resultados:

- En el primer tanque del floculador se instalará un motor de velocidad variable que trabaje entre 11 y 15 rpm, con gradientes entre 53 y 84  $\text{s}^{-1}$ .
- Al segundo tanque del floculador se le instalará un motor de velocidad variable que trabaje entre 6 y 10 rpm, con gradientes entre 21 y 46  $\text{s}^{-1}$ .

El cálculo del producto del gradiente de velocidad y el tiempo de retención hidráulico en el tanque de floculación, se recomienda<sup>20</sup> esté entre  $10^4 < G t < 10^5$ . El cálculo de G t para los gradientes, el mayor 84  $\text{s}^{-1}$  y el menor 21  $\text{s}^{-1}$ , y tiempo de retención hidráulico t = 15.26 minutos (915.60 segundos) produce los siguientes resultados que cumplen con el intervalo recomendado  $10^4 < G t < 10^5$ .

$$G_{\text{menor}} t = (21) (915.60) = 19,227.60$$

$$G_{\text{mayor}} t = (84) (915.60) = 76,910.40$$

En la Figura 4.4 se muestra una vista en planta y una sección transversal del floculador mecánico de eje y paletas verticales.

**Tabla 4.6** Cálculo de potencia y gradiente de velocidad en el tanque floculador.

REVOLUCIONES POR MINUTO (rpm)	POTENCIA POR UNIDAD DE VOLUMEN ( $\text{kg}_f / \text{m}^2 \text{ s}$ )	GRADIENTE DE VELOCIDAD ( $\text{s}^{-1}$ )	POTENCIA (HP)
1	0.00022	1.45	0.000095
2	0.0017	4.11	0.00076
3	0.0058	7.54	0.0026
4	0.014	11.61	0.0061
5	0.027	16.23	0.012
6	0.047	21.33	0.021
7	0.074	26.88	0.033
8	0.111	32.84	0.049
9	0.158	39.19	0.069
10	0.217	45.90	0.095
11	0.289	52.96	0.127
12	0.375	60.34	0.165
13	0.476	68.04	0.209
14	0.595	76.04	0.261
15	0.732	84.33	0.322
16	0.888	92.89	0.390
17	1.065	101.74	0.468
18	1.264	110.85	0.556
19	1.487	120.21	0.653
20	1.730	129.83	0.762

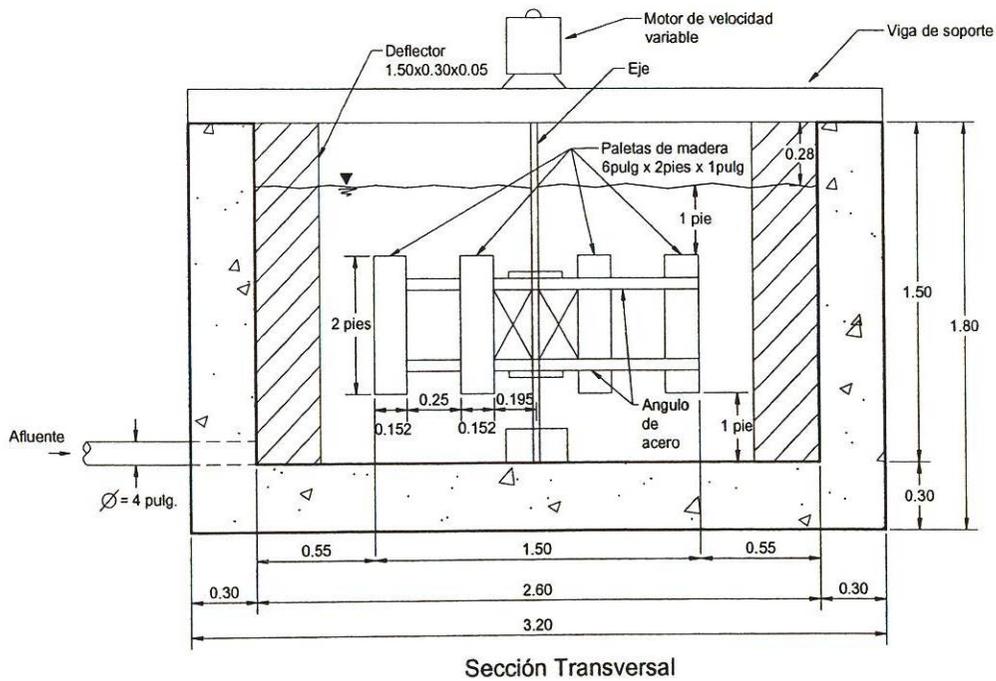
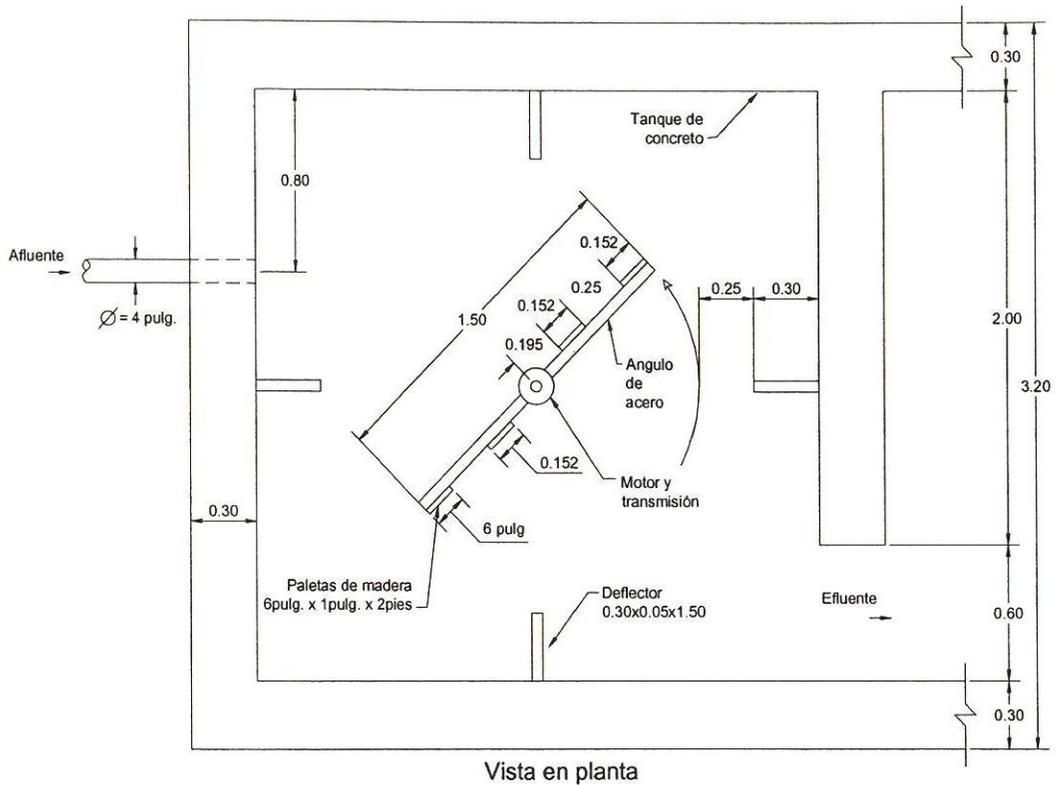


Figura 4.4  
Floculador mecánico de eje y paletas verticales

## **CAPÍTULO 5**

### **DISEÑO DE LAS UNIDADES DE SEDIMENTACIÓN, FILTRACIÓN Y TANQUE DE AGUAS CLARAS DE LA PLANTA TRATADORA**

#### **5.1 LA SEDIMENTACIÓN**

El proceso de sedimentación en el tratamiento de agua facilita el asentamiento y remoción de las partículas suspendidas de mayor tamaño y masa. Comúnmente, la filtración se utiliza para remover las partículas floculadas antes de la filtración. La eficiencia de la remoción en un sedimentador determina las cargas subsecuentes sobre los filtros y, por lo tanto, tiene una influencia notable en su capacidad durante el ciclo del filtro y en la calidad del agua filtrada. Las dos clasificaciones principales para el diseño de unidades de sedimentación son: 1) unidades de flujo horizontal y 2) unidades de flujo vertical. El diseño de ambos tipos de unidades implica factores tales como forma, número de tanques, dimensiones, velocidad y dirección de flujo, tiempo de retención, volumen de almacenamiento de lodos, método de remoción de lodos, arreglos de entrada y de salida y las características del agua floculada entrante.

En este estudio se aplicarán los criterios para unidades de sedimentación de flujo horizontal. La sedimentación de flujo horizontal es un proceso de separación por gravedad, en el cual el tanque de sedimentación proporciona un medio tranquilo que permite a las partículas, de peso específico mayor que el del agua, sedimentar en el fondo del tanque. Un tanque de sedimentación de flujo horizontal bien diseñado puede remover hasta un 95% de la turbiedad del agua cruda después de una coagulación y floculación

eficaz; la turbiedad restante se elimina en los filtros. Son varias las ventajas de las unidades de flujo horizontal respecto a las unidades de flujo ascendente:

- 1) El proceso es más tolerante a las variaciones hidráulicas y de calidad.
- 2) El proceso proporciona un rendimiento predecible en la mayoría de las condiciones climáticas y operacionales.
- 3) Los resultados a escala del laboratorio son aplicables a escala de la planta.
- 4) El proceso opera excepcionalmente bien cuando las cargas de lodo son muy altas.
- 5) Los costos de construcción son bajos y permiten la ampliación.
- 6) La operación y el mantenimiento son sencillos.<sup>22</sup>

### **5.1.1 CRITERIOS DE DISEÑO**

Tres criterios básicos regulan el diseño de los tanques de sedimentación:

- 1) Cantidad de agua que se va a tratar, que identifica al caudal de diseño.
- 2) Tiempo de residencia determinado.
- 3) Gasto superficial, también llamado carga hidráulica superficial.

La carga superficial se define como la relación entre el gasto influente (caudal de diseño) y el área superficial del tanque en vista de planta, que puede expresarse en unidades de gasto por unidad de área superficial del tanque ( $\text{m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ ); ésto es equivalente a la velocidad de sedimentación. Las fórmulas básicas que se aplican al diseño de tanques de sedimentación son:

$$t = 24 V / Q_d$$

$$V_s = 24 H / t$$

$$V_s = Q_d / W L$$

En donde:

$V_s$  : carga superficial o velocidad de sedimentación, en  $m^3 / \text{día} / m^2$

$t$  : tiempo de residencia, en horas

$Q_d$  : caudal de diseño, en  $m^3 / \text{día}$

$V$  : volumen del tanque, en  $m^3$

$H, W, L$  : profundidad, anchura y largo del tanque, en m

Estas fórmulas se pueden utilizar en combinación con métodos gráficos para determinar las velocidades de sedimentación de las partículas sedimentables en el agua cruda.<sup>18</sup> Mediante pruebas a escala de laboratorio, utilizando cilindros de plástico similares en profundidad al tanque propuesto y con puntos de extracción a diferentes profundidades, se pueden obtener datos de sedimentación. Las muestras se toman a intervalos de tiempo regulares para medir la turbiedad a varias profundidades en el cilindro, lo cual es una indicación de la tasa o rapidez de sedimentación.

La Tabla 5.1 presenta las cargas superficiales recomendados, o velocidades de sedimentación, y los tiempos de residencia para varias condiciones que se pueden encontrar en la práctica. Los valores de carga superficial varían de  $20 m^3 / \text{día} / m^2$  a  $60 m^3 / \text{día} / m^2$  (lo cual es equivalente a los valores de velocidad de sedimentación de  $0.020 \text{ cm/s}$  y  $0.070 \text{ cm/s}$ , respectivamente). La Tabla 5.1 revela que el mezclado y floculación eficaces antes de la sedimentación (condición D) puede reducir considerablemente los tiempos de residencia requeridos e incrementar los gastos superficiales, permitiendo así el diseño de tanques de sedimentación más pequeños y menos costosos.<sup>22</sup>

Las cargas superficiales bajas ( $20 m^3 / \text{día} / m^2$  a  $30 m^3 / \text{día} / m^2$ ) se usan en combinación con filtros de arena sólo. Las cargas altas ( $30 m^3 / \text{día} / m^2$  a  $60 m^3 / \text{día} / m^2$ ) se combinan con filtros de lecho múltiple.<sup>18</sup>

**Tabla 5.1** Criterios de diseño para tanques de sedimentación de flujo horizontal.<sup>22</sup>

TIPO	DESCRIPCIÓN	CARGA SUPERFICIAL ( m <sup>3</sup> / día / m <sup>2</sup> )	TIEMPO DE RESIDENCIA (horas)
A	Instalaciones pequeñas de operación precaria.	20 - 30	3 a 4
B	Instalaciones planificadas con tecnología nueva y operación razonable.	30 - 40	2.5 a 3.5
C	Instalaciones planificadas con tecnología nueva y buena operación.	35 - 45	2 a 3
D	Instalaciones grandes con nueva tecnología, operación excelente y con auxiliares de coagulación siempre que se necesiten.	40 - 60	1.5 a 2.5

Se recomienda una profundidad del tanque igual o mayor a  $H = 3.0$  m, para permitir la acumulación y almacenamiento de lodo en el tanque. Para reducir la probabilidad de cortocircuitos se recomienda una relación longitud – ancho (  $L / W$  ) de 3 o más. Las velocidades de flujo horizontal deben variar de 4.0 m/hora a 36.0 m/hora (lo que es equivalente a 0.11 cm/s y 1.0 cm/s, respectivamente).<sup>22</sup>

### 5.1.2 LA ESTRUCTURA DE ENTRADA

Las estructuras de entrada se deben diseñar de tal manera que el agua con flóculos que entra al tanque sedimentador, sea distribuida uniformemente a través del área transversal completa de la zona de entrada sin causar turbulencia excesiva, ya que eso fragmentaría los flóculos. Sin embargo, no es fácil hacer pasar un agua con un

gradiente de velocidad de 20 a 40  $\text{s}^{-1}$  como el que hay en el floculador, a un tanque decantador en donde el gradiente de velocidad es menor a 1  $\text{s}^{-1}$ , sin que se produzcan perturbaciones grandes en sus líneas de flujo. Cualquier sistema que disipe la energía del agua que proviene del floculador tiende a romper el floc que entra al sedimentador, por lo que el propósito de la estructura de entrada es:

- Distribuir el afluente tan uniformemente como sea posible en toda el área transversal del sedimentador.
- Evitar chorros de agua que puedan provocar movimientos rotacionales de la masa líquida u otras corrientes cinéticas.
- Disipar el momento (energía) transportado por el agua.
- Evitar las altas velocidades que puedan perturbar los sedimentos del fondo.

Es pues conveniente que, en lo posible, las velocidades de entrada no sean mayores que 15 cm/s.<sup>18</sup>

Es costumbre utilizar como estructura de entrada tabiques difusores con orificios circulares. Para el caudal de diseño  $Q_d = 9 \text{ L/s}$  y con un gradiente de velocidad de 20  $\text{s}^{-1}$ , los siguientes diámetros de orificio, número de orificios y velocidades de flujo pueden ser seleccionados, según la descripción que sigue y el resumen mostrado en la Tabla 5.2.

Respetando el criterio de que las velocidades preferiblemente no deben exceder de 15 cm/s, se determina para un área dada por 1.22 m de ancho por 1.5m de alto (que es el área del tabique difusor a la entrada al tanque sedimentador de este estudio) que lo más conveniente es colocar 12 orificios de 8 cm de diámetro, con un caudal por orificio de 0.75 litros por segundo, lo que representa en 12 orificios 9 L/s. Podrían colocarse 4 filas de 3 orificios espaciados, centro a centro, 40 cm en lo horizontal y 27 cm en lo vertical. La primer fila de orificios deberá estar a un pie (0.3048 m) del fondo del tanque, así como la última fila deberá quedar también a un pie de la parte superior del tanque. Los orificios de los extremos deberán quedar a 0.17 m de las paredes del tanque.

**Tabla 5.2** *Diámetros de orificios y velocidades de flujo para  $G = 20 \text{ s}^{-1}$ .*

DIÁMETRO ( cm )	CAUDAL POR ORIFICIO ( litros / seg )	VELOCIDAD ( cm / seg )	No. DE ORIFICIOS
4.0	0.13	10.3	69
5.0	0.22	11.2	41
6.0	0.36	12.7	25
8.0	0.75	14.9	12
10.0	1.15	14.6	8
12.0	1.80	16.0	5
15.0	3.30	18.0	3

### 5.1.3 LA SEDIMENTACIÓN DE ALTA VELOCIDAD

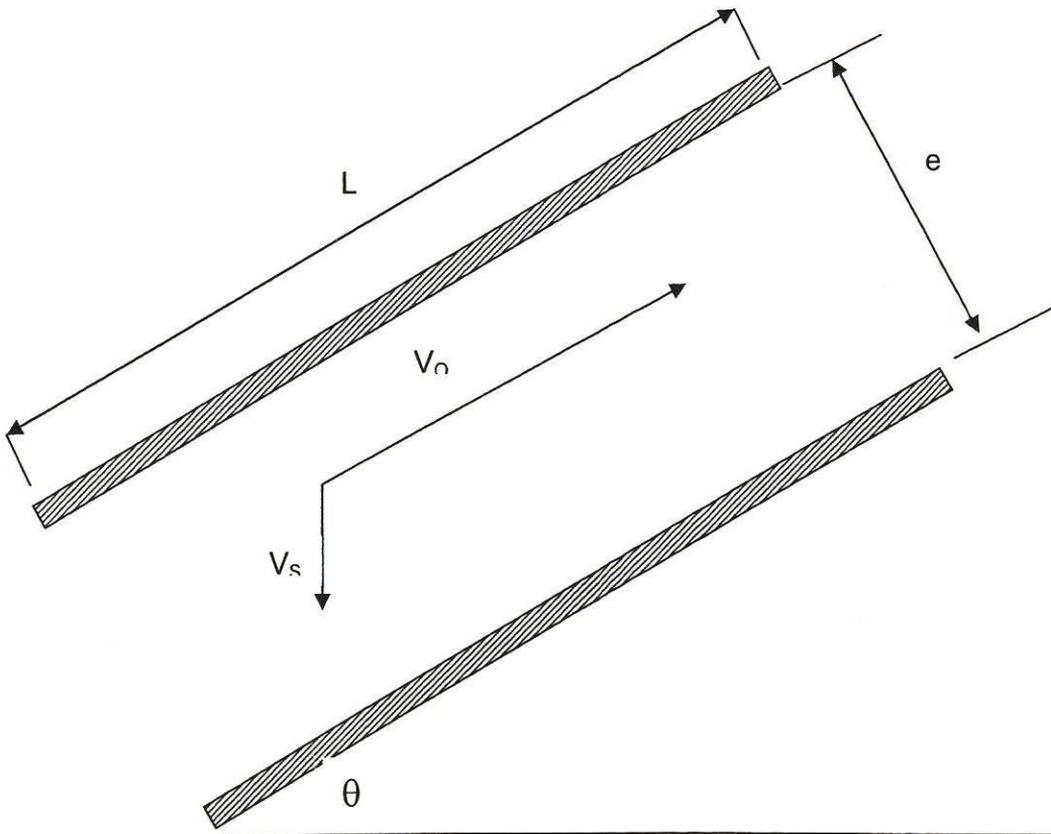
Los sedimentadores de alta velocidad consisten esencialmente en una serie de tubos ( circulares, cuadrados o hexagonales ) o láminas planas paralelas colocadas en un tanque apropiado con un ángulo de inclinación  $\theta$ , de modo que el agua ascienda a través de las celdas en flujo laminar (  $Re < 500$  ). Lo anterior permite cargas superficiales entre 4 y 10 veces mayores que las usadas en sedimentadores horizontales, o sea, entre  $120 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  y  $360 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  (lo que es equivalente a  $0.14 \text{ cm/s}$  y  $0.42 \text{ cm/s}$ , respectivamente), en comparación con los sedimentadores ordinarios que comúnmente trabajan entre  $20 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  y  $60 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ . Los períodos de sedimentación son usualmente menores de 10 minutos. La ventaja de trabajar con velocidades de asentamiento de  $0.14$  a  $0.42 \text{ cm/s}$  reside en que se obtiene un flujo más estable que el existente en los sedimentadores ordinarios, en los que la velocidad de asentamiento rara vez excede de  $0.07 \text{ cm/s}$  y generalmente es menor.<sup>18</sup>

La instalación de sedimentadores de placas inclinadas, o de tubería en los tanques de sedimentación, permite cargas superficiales mucho más altas y, por lo tanto, puede dar por resultado cantidades mayores de lodo generado en un espacio pequeño

cuando se trate agua de turbiedad similar. En consecuencia, las unidades que incorporan sedimentadores de placas inclinadas o de tubería requieren remoción frecuente de lodos debajo de los módulos de sedimentación. En tales situaciones, para evitar el desague del tanque a intervalos relativamente cortos se pueden utilizar tolvas hidráulicamente drenadas. Los pisos de las tolvas deben formar un ángulo no menor de  $55^\circ$  por encima de la horizontal.<sup>22</sup>

La eficiencia de los sedimentadores de placas y de tubo inclinado supera la de los decantadores convencionales bajo cargas similares.<sup>24</sup> La utilización de sedimentadores de placas inclinadas se ha generalizado en América Latina; se diseñan con valores de velocidades de sedimentación entre  $120 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  y  $185 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ , y se pueden lograr eficiencias de remoción mayores del 90%.

Las siguientes ecuaciones, derivadas de consideraciones geométricas y estudios de rendimiento en laboratorio, se pueden utilizar para diseñar sedimentadores de tubos y placas inclinadas:



**Figura 5.1** Relaciones geométricas de un sedimentador de placas inclinadas.

$$V_S = K V_O / (\text{sen } \theta + L_U \text{ cos } \theta )$$

$$L_R = L / e$$

$$L_U = L_R - 0.013 \text{ Re}$$

$$\text{Re} = 2 V_O e / \nu$$

En donde.

$V_S$  : carga superficial crítica de sedimentación en m/día

$K$  : constante según el tipo de sedimentador (1.0 para placas inclinadas; 1.33 para tubos circulares)

$V_O$  : carga superficial del área de sedimentación de alta velocidad, o velocidad promedio del flujo a través del sedimentador en m/día

$\theta$  : ángulo de inclinación de las placas o tubos del sedimentador

$L_R$  : longitud relativa, adimensional

$L$  : longitud de las placas o tubos en m

$e$  : distancia perpendicular entre placas o diámetro de tubo en m

$L_U$  : longitud relativa efectiva, adimensional

$\text{Re}$  : número de Reynolds

$\nu$  : viscosidad cinemática del agua en m<sup>2</sup>/día

#### 5.1.4 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR DE ALTA VELOCIDAD

La teoría establece que el diámetro del floc varía entre 50 y 250 micras. Para efecto de este estudio se plantea el diseño de un sedimentador de alta velocidad para decantar un floc de diámetro  $d = 150$  micras (0.015 cm). Como referencia se tomará la temperatura del agua a 20°C, la viscosidad cinemática del agua para dicha temperatura es  $\nu = 0.0101$  cm<sup>2</sup>/s (stokes), la gravedad específica del floc  $S_s = 1.03$ , siendo gravedad específica la relación entre la densidad de la partícula sólida (floc) y la densidad del líquido (agua), y un caudal de diseño  $Q_d = 9$  L/s (0.009 m<sup>3</sup>/s o 777.6 m<sup>3</sup>/día).

Para calcular la velocidad de sedimentación de la partícula o floc, se utilizarán las fórmulas que representan la sedimentación de partículas discretas en un líquido en estado de reposo, las cuales se muestran a continuación:

$$V_S = 36 \sqrt{(S_S - 1) (d / C_D)}$$

$$C_D = (24 / Re) + (3 / \sqrt{Re}) + 0.34$$

$$Re = V_S d / \nu$$

En donde:

$V_S$  : velocidad de sedimentación de la partícula, en cm/s

$S_S$  : gravedad específica de la partícula, adimensional

$d$  : diámetro de la partícula, en cm

$C_D$  : coeficiente de fricción de Newton, adimensional

$\nu$  : viscosidad cinemática del agua, en  $\text{cm}^2/\text{s}$  (stokes)

Se puede observar que si se reemplaza la fórmula de  $C_D$  y también la de  $Re$  al lado derecho de la fórmula de  $V_S$ , queda una igualdad en la que la única incógnita es el valor de  $V_S$ , pues los valores de  $d$ ,  $\nu$  y  $S_S$  ya están definidos. De la igualdad no se puede despejar fácilmente la incógnita  $V_S$ , por lo tanto se puede suponer un valor cualquiera para  $V_S$  y verificar si los dos lados son iguales (a la manera de prueba y error o de aproximaciones sucesivas) y en caso negativo se propone un nuevo valor de  $V_S$  y así consecutivamente, por iteraciones hasta encontrar el valor de  $V_S$  que hace cumplir la igualdad.

El procedimiento de iteración descrito arriba fue aplicado y se encontró el valor de velocidad de sedimentación igual a  $V_S = 0.0354 \text{ cm/s}$ , para la partícula de diámetro  $d = 0.015 \text{ cm}$ , con gravedad específica  $S_S = 1.03$  y con viscosidad cinemática del agua dada por  $\nu = 0.0101 \text{ cm}^2/\text{s}$ . La velocidad de sedimentación obtenida también se puede expresar en las unidades de carga superficial y ella es  $V_S = 30.58 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ . El número de Reynolds calculado para esta velocidad de sedimentación es igual a  $Re = 0.0526$ , el cual es menor a  $Re < 0.5$  y por lo tanto las condiciones del flujo son de régimen laminar.

Se propone utilizar placas de polipropileno de dimensiones, largo  $L = 4$  pies (48 pulgadas), ancho  $B = 4$  pies (48 pulgadas) y espesor  $e_p = 1 / 4$  de pulgada. Estas placas estarán separadas entre sí una distancia igual a  $e = 2$  pulgadas (5.08 cm). Para una autolimpieza eficiente, las placas inclinadas usualmente se disponen a un ángulo  $\theta$  de entre  $40^\circ$  y  $60^\circ$  respecto a la horizontal. Para este caso se adoptará un valor de  $\theta = 60^\circ$ . Con las fórmulas antes mencionadas en el numeral 5.1.3, y la geometría ya definida de las placas para el sedimentador de alta velocidad, se realizaron los siguientes cálculos suponiendo un número de Reynolds igual a  $Re = 372$ , el cual es menor a  $Re < 500$ , garantizando flujo laminar entre las placas.

Cálculo de la longitud relativa.

$$L_R = L / e$$

$$L_R = 48/2$$

$$L_R = 24$$

Cálculo de la longitud relativa efectiva.

$$L_U = L_R - 0.013 Re$$

$$L_U = 24 - (0.013 (372))$$

$$L_U = 19.163$$

Cálculo de la carga superficial del área de sedimentación de alta velocidad, o velocidad promedio del flujo a través del sedimentador.

$$V_O = V_S (\text{sen } \theta + L_U \text{ cos } \theta) / K$$

$$V_O = 0.0354 (\text{sen } 60^\circ + 19.163 \text{ cos } 60^\circ)$$

$$V_O = 0.369 \text{ cm/s}$$

$$V_O = 319.55 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$$

Cálculo del número de Reynolds.

$$Re = 2 V_O e / \nu$$

$$Re = 2 (0.369) (5.08) / (0.0101)$$

$$Re = 371.19 < 500 \text{ flujo laminar}$$

Cálculo de carga hidráulica superficial equivalente

$$CHS_{EQ} = V_O \text{ sen } \theta$$

$$CHS_{EQ} = 319.55 \text{ sen } 60^\circ$$

$$CHS_{EQ} = 276.74 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$$

Calculo de coeficiente  $\xi$

$$\xi = e_p / (e_p + e)$$

$$\xi = 0.25 / (0.25 + 2)$$

$$\xi = 0.1111$$

Cálculo del área cubierta por las placas

$$A = Q_d / (CH S_{EQ} (1 - \xi))$$

$$A = 777.6 / (276.74 (1 - 0.1111))$$

$$A = 3.16 \text{ m}^2$$

El ancho del sedimentador será igual al ancho de la placa de polipropileno  $W = 4$  pies (1.22 m), la longitud teórica del sedimentador será:

$$L_T = A / W$$

$$L_T = 3.16 / 1.22$$

$$L_T = 2.59 \text{ m}$$

Cálculo del número de placas

$$\# \text{ de placas} = L_T \text{ sen } \theta / (e_p + e)$$

$$\# \text{ de placas} = 2.59 \text{ sen } 60^\circ / (0.00635 + 0.0508)$$

$$\# \text{ de placas} = 39.25$$

Si se colocan definitivamente 39 placas serán 40 espacios y la longitud definitiva será:

$$L_D = (e_p + e) \# \text{ de placas} / \text{sen } \theta$$

$$L_D = (0.00635 + 0.0508) (40) / \text{sen } 60^\circ$$

$$L_D = 2.64 \text{ m}$$

El arreglo definitivo para el sedimentador de alta velocidad con placas constará de una fila de 39 placas de polipropileno de 4 pies x 4 pies x 1 / 4 pulgada, espaciadas a 2 pulgadas, con un ángulo de inclinación de 60°. El tanque tendrá una profundidad de 3.5 m, medida entre las canaletas de salida y el fondo de donde se extraerán los lodos.

A la salida del sedimentador en el canal de agua clarificada, si el agua presenta un pH menor a 7, se adicionará hidróxido de sodio (NaOH) para ajustar el pH a un valor de 7. El NaOH se utiliza como disolución al 50%, es soluble en agua, su peso molecular es igual a 40.01 g/mol, Na:57.48%, H:2.52% y O:40.00%.

### 5.1.5 EL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LODOS

La remoción hidráulica de los sedimentos es especialmente apropiada para decantadores de alta rapidez, debido a su menor área construida que permite construir tolvas en el fondo del tanque sin que el costo sea excesivo.

Para efectuar la remoción hidráulica es necesario acercar los lodos tanto como se pueda a las bocas de drenaje, ya que dichos fangos no son arrastrados por el flujo sino hasta tenerlos a muy corta distancia alrededor de ellas, debido a que la velocidad decrece en relación directa al cuadrado de la distancia al orificio de succión. Esto implica que:

- Para poder remover lodos hidráulicamente es necesario proyectar un gran número de bocas de desagüe.

- Para disminuir el número de puntos de salida, la única solución es construir tolvas con una pendiente suficiente como para que las partículas de lodo se deslicen hacia las bocas de drenaje, ya sea durante la apertura del desagüe o antes por aumento en la concentración o número de ellas.<sup>23</sup>

Se pueden proyectar dos tipos de tolvas para la remoción hidráulica de los lodos: tolvas continuas y tolvas separadas para cada orificio de drenaje.

Como no se puede colocar una válvula en cada orificio, es necesario unirlos por medio de un aspirador múltiple, el cual debe ser calculado adecuadamente.

En el diseño de las tolvas deben considerarse tres aspectos:

1. Pendiente de las paredes: la pendiente de las paredes depende del ángulo de reposo del material que se piense remover. Es obvio que para que el lodo no se pegue a ellas es necesario que la inclinación de las tolvas sea mayor que dicho ángulo de reposo. Éste varía entre 30° y 60° para material floculado, y entre 15° y 45° para material no floculado. La costumbre ha sido darle a las tolvas una inclinación de 50° a 60° para material floculado y de 40° a 50° para material no floculado, lo que ha demostrado que rara vez permite la adhesión de lodos a las paredes.
2. Número, diámetro y espaciamiento de orificios de drenaje: deben calcularse de tal manera que se recoja la mayor parte del lodo asentado no sólo junto al orificio, sino entre orificios. Que todos los orificios trabajen prácticamente con el mismo flujo (no más de un 10% de diferencia entre el primero y el último). En las tolvas separadas la separación entre orificios estará determinada por la configuración de las tolvas y su número. En las tolvas continuas el cálculo de espaciamiento es un poco más sofisticado pues debe tenerse en cuenta la esfera de influencia alrededor del orificio, dentro del cual la velocidad del flujo ( $V_a$ ) que confluye hasta el punto de salida es capaz de producir arrastre de las partículas sedimentadas o que están en proceso de sedimentación. Para ello es necesario calcular la velocidad del flujo a distintas distancias  $X$  a partir del orificio. Teóricamente las velocidades de arrastre ( $V_a$ ) pueden variar entre 1 cm/s y 3 cm/s.

3. Volumen de lodos recolectados en relación al tamaño de la tolva: El asunto más importante en el diseño del múltiple (en referencia a “muchos orificios”) es precisamente conseguir que extraiga oportunamente la misma cantidad de agua por todos los orificios, pues podría suceder que solo trabajen los orificios del lado de la salida y poco o nada los otros. Ésta ha sido la causa principal de las fallas que ha habido en la extracción de lodo por múltiples.<sup>23</sup>

Las fórmulas para el dimensionamiento de los sistemas de extracción gravitacional de lodos por medio de múltiples son las siguientes:

$$d = D \sqrt{(R / n)}$$

$$X = 1.162 d \sqrt{(h^{1/2} / V_a)}$$

$$X = L / n$$

En donde:

d : diámetro del orificio, en m

D : diámetro del múltiple, en m

R : relación entre la suma de secciones de todos los orificios perforados en el múltiple y la sección del múltiple, adimensional

n : número de orificios

h : profundidad desde el nivel del agua hasta el piso, en m

V<sub>a</sub>: velocidad mínima de arrastre, en m/s

L : longitud real del múltiple, en m

X : distancia a la cual se presenta la velocidad mínima de arrastre, en m

Las expresiones antes expuestas se determinaron para un orificio perforado en un plano horizontal en tolva continua y para orificios de pared delgada. Según estudios realizados pueden adoptarse como valores tentativos mientras no haya otros datos y, para estar del lado de la seguridad, tomar un valor de R entre 0.40 y 0.45 para dimensionar múltiples de corta y mediana longitud.<sup>23</sup>

A continuación se muestran los cálculos realizados para el sistema de extracción de lodos mediante tubería múltiple para aspiración de lodos en una tolva continua con

paredes inclinadas  $60^\circ$  en el sedimentador de alta velocidad con placas, suponiendo una velocidad mínima de arrastre  $V_a = 1 \text{ cm/s}$  ( $0.01 \text{ m/s}$ ), un valor del coeficiente  $R = 0.40$ , la longitud real del múltiple  $L = 2.40 \text{ m}$ , un diámetro de múltiple  $D = 4 \text{ pulgadas}$  ( $0.1016 \text{ m}$ ), número de orificios  $n = 6$  y la profundidad desde el nivel del agua hasta el piso de  $h = 3.5 \text{ m}$ .

Cálculo del diámetro del orificio

$$\begin{aligned}d &= D \sqrt{(R / n)} \\d &= 0.1016 \sqrt{(0.40 / 6)} \\d &= 0.02623 \text{ m} \\d &= 1.03 \text{ pulgadas}\end{aligned}$$

El diámetro comercial más cercano es  $d = 1 \text{ pulgada}$  ( $0.0254 \text{ m}$ ), recalculando el coeficiente  $R$  de nuevo;

$$\begin{aligned}R &= n d^2 / D^2 \\R &= 6 (0.0254)^2 / (0.1016)^2 \\R &= 0.38\end{aligned}$$

Este valor de  $R$  se acepta pues es ligeramente inferior a  $0.40$ .

Cálculo de la distancia  $X$  a la cual se presenta la velocidad mínima de arrastre:

$$\begin{aligned}X &= 1.162 d \sqrt{(h^{1/2} / V_a)} \\X &= 1.162 (0.0254) \sqrt{(3.5)^{1/2} / (0.01)} \\X &= 0.40 \text{ m}\end{aligned}$$

El cálculo de la distancia  $X$ , por otro lado:

$$\begin{aligned}X &= L / n \\X &= 2.40 / 6 \\X &= 0.40 \text{ m}\end{aligned}$$

Se ha logrado hacer coincidir la distancia X por dos caminos o cálculos diferentes, por lo cual los valores antes definidos ya establecen el diseño del sistema de aspiración de lodos. En resumen de ello, se colocará en la base de la tolva continua un tubo múltiple de diámetro  $D = 4$  pulgadas, con 6 niples de diámetro  $d = 1$  pulgada espaciados entre si a 0.40 m. Los niples primero y último quedan a una distancia 0.20 m del extremo. Se instalará el tubo de succión al centro.

### 5.1.6 LA ESTRUCTURA DE SALIDA

Existen una gran variedad de estructuras de salida para un tanque sedimentador, las cuales se pueden dividir en tres grupos: vertederos de rebose, canaletas de rebose y orificios. Antecediendo a la estructura de salida se pueden instalar deflectores del viento, los cuales penetran a poca profundidad dentro del agua y tienen por objeto evitar el oleaje que el viento produce y que puede acarrear considerable cantidad de floc hasta la estructura de salida.

Las canaletas de rebose pueden colocarse transversales al flujo o paralelas al flujo. En ambos tipos existe una cierta distorsión de las líneas de flujo por constricción de la sección inmediata antes de que la partícula alcance el borde de la canaleta, lo que induce un acarreo del floc más liviano. Para nivelarlas con más precisión se puede dejar una tira metálica, ajustable por medio de pernos, en los flancos externos de las canaletas. El nivel del agua en el decantador debe controlarse cuidadosamente pues, cuando las canaletas trabajan ahogadas, el floc suele resuspenderse en gran cantidad por el aumento de la velocidad de salida.<sup>18</sup>

En este trabajo se propone utilizar dos canaletas de rebose, como estructura de salida para el sedimentador de placas. La hidráulica de la zona de salida de las canaletas de recolección puede trabajar con descarga libre o con descarga sumergida. En este caso se diseñarán canaletas con descarga libre, para la cual la teoría establece las siguientes fórmulas.<sup>24</sup>

$$Y_c = ( q^2 / g )^{1/3}$$

$$H_o = \sqrt[3]{( Y_c^2 + ( ( 2 Q^2 ) / ( g b^2 Y_c ) ) + ( ( 2 n^2 L Q^2 ) / ( 3 C^2 b^2 r^{4/3} d ) ) )}$$

$$d = H_o - ( ( 1 / 3 ) ( H_o - Y_c ) )$$

$$r = d b / ( 2 d + b )$$

$$q = Q / b$$

$$H = ( Q / 2 C_1 L )^{2/3}$$

En donde :

$Y_c$  : profundidad crítica del flujo, en m

$q$  : caudal por unidad de ancho de la canaleta, en  $m^3 / s / m$

$g$  : aceleración de la gravedad, en  $m / segundo^2$  (9.806  $m/s^2$ )

$H_o$  : máxima profundidad del agua en la canaleta, en m

$Q$  : caudal en la canaleta, en  $m^3/s$

$b$  : ancho de la canaleta, en m

$n$  : número de Manning (0.032 para concreto)

$L$  : longitud de la canaleta, en m

$C$ : constante igual a 1 en el SI

$r$  : radio hidráulico promedio, en m

$d$  : profundidad media, en m

$H$ : carga hidráulica sobre la canaleta, en m

$C_1$ : constante para vertedor, igual a 1.86

Se colocarán dos canaletas, a cada canaleta le corresponde transportar la mitad del caudal de diseño,  $Q = 4.50 \text{ L/s}$  ( 0.0045  $m^3/s$ ), el material de las canaletas será hecho de concreto por lo que el número de Manning  $n = 0.032$ , la longitud de las canaletas es igual a la longitud del área cubierta por las placas del sedimentador,  $L = 2.64 \text{ m}$ , lo cual significa que las canaletas se colocarán en sentido paralelo al flujo, y se propone un ancho de canaleta igual a  $b = 0.15 \text{ m}$ .

Cálculo de profundidad crítica:

$$Y_c = ( q^2 / g )^{1/3}$$

$$Y_c = ((0.0045 / 0.15)^2 / 9.806)^{1/3}$$

$$Y_c = 0.045 \text{ m}$$

El cálculo de la máxima profundidad del agua en la canaleta se realiza con la fórmula antes expresada para  $H_o$ . Se observa que en la parte derecha de esa ecuación casi todos los datos se conocen, a excepción del radio hidráulico ( $r$ ) y la profundidad media ( $d$ ), pero éstos están en función de  $H_o$ . El resultado es una ecuación muy compleja de la cual es muy difícil despejar algebraicamente la incógnita  $H_o$ , por lo tanto se puede llegar al valor que satisface la ecuación mediante iteraciones con valores supuestos de  $H_o$  hasta encontrar al valor que iguale los dos lados de la ecuación. El valor de la profundidad máxima encontrado por iteraciones fue  $H_o = 0.0886$  m, y con éste finalmente se calculan los valores de  $d$  y  $r$ :

Cálculo de la profundidad media:

$$d = H_o - \left( \frac{1}{3} \right) (H_o - Y_c)$$

$$d = 0.0886 - \left( \frac{1}{3} \right) (0.0886 - 0.045)$$

$$d = 0.0741 \text{ m}$$

Cálculo del radio hidráulico:

$$r = d b / (2 d + b)$$

$$r = (0.0741) (0.15) / (2 (0.0741) + 0.15)$$

$$r = 0.0373 \text{ m}$$

Cálculo de la carga hidráulica sobre la canaleta:

$$H = (Q / 2 C_1 L)^{2/3}$$

$$H = (0.0045 / (2 (1.86) (2.64)))^{2/3}$$

$$H = 0.006 \text{ m}$$

Con el cálculo definitivo de  $H_o = 0.0886$  m, se determina como altura de la canaleta una distancia mayor a  $H_o$ , que es la profundidad máxima del agua en la canaleta, se propone una altura  $h = 0.17$  m. Quedando entonces determinadas las dimensiones de la canaleta: ancho  $b = 0.15$  m, alto  $h = 0.17$  m y longitud  $L = 2.64$  m. En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran, vista en planta, sección longitudinal y la sección transversal del sedimentador de alta velocidad con placas, respectivamente.

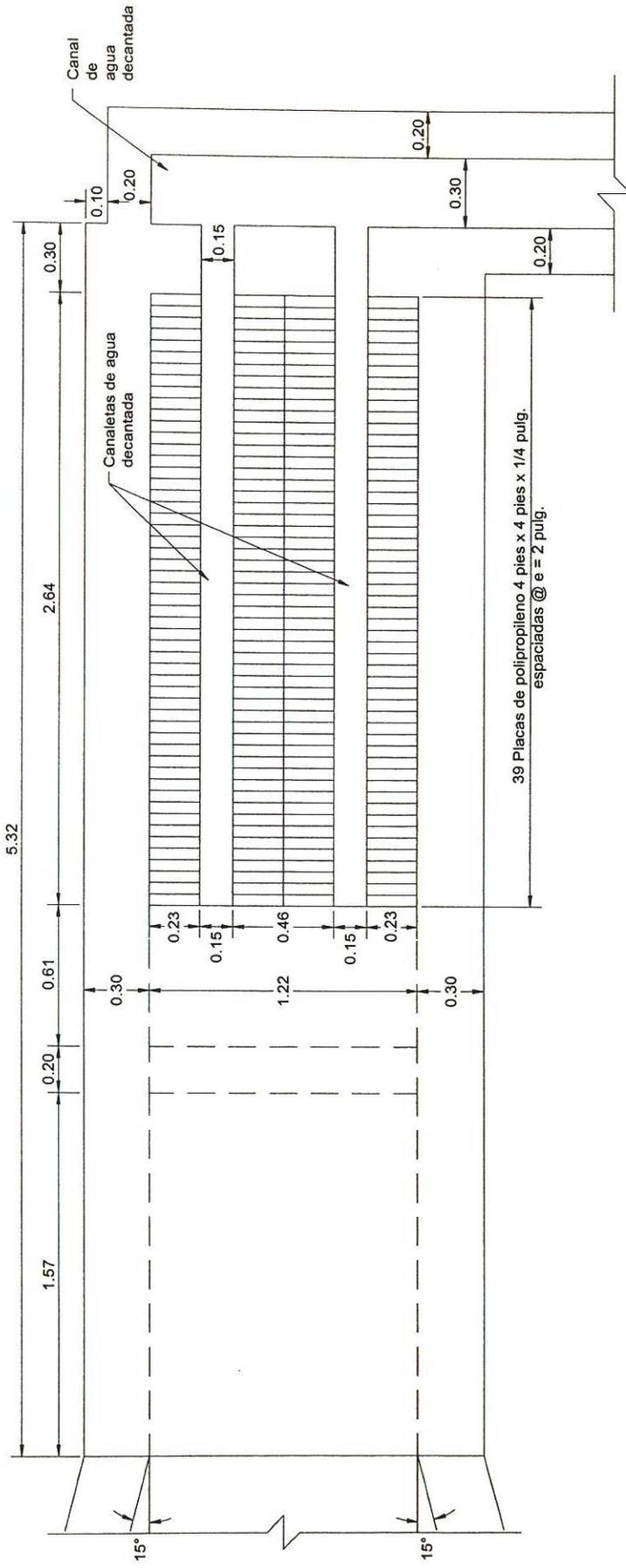
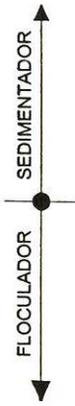


Figura 5.2  
Vista en planta del sedimentador de placas

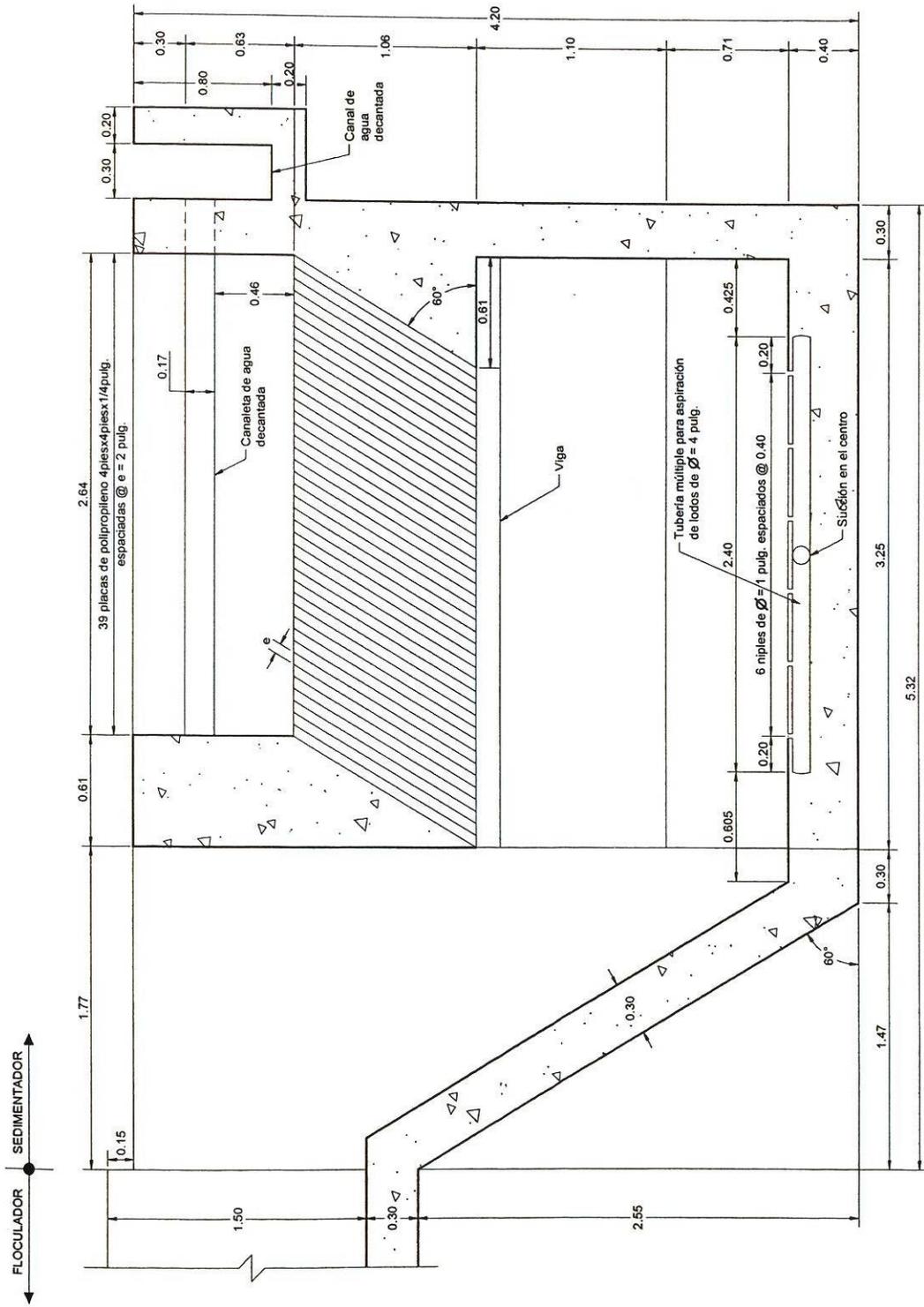


Figura 5.3  
 Sección longitudinal del sedimentador de placas

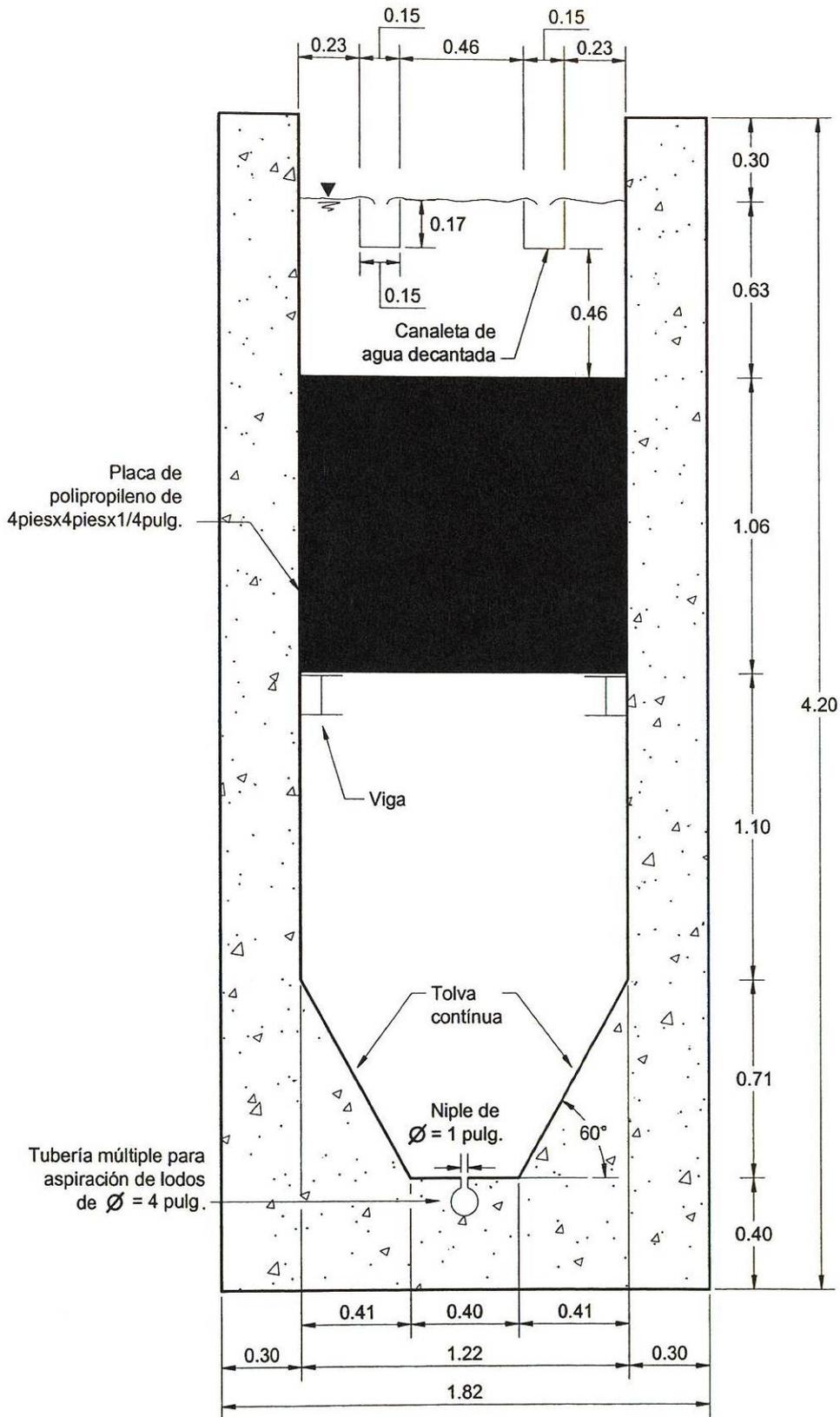


Figura 5.4  
Sección transversal del sedimentador de placas

## 5.1.7 EL FLUJO MÁSIICO DE LOS LODOS

El flujo másico de lodos generados en el sedimentador se determina como el producto de la concentración de sólidos suspendidos totales obtenida en el análisis físico - químico del agua residual SST = 6,484 mg/L (véase numeral 3.3.3), con el caudal de diseño  $Q_d = 9$  L/s, así como lo expresa la siguiente formula:

$$F_M = 0.0864 Q_d SST$$

En donde:

$F_M$ : flujo másico de SST, en kg/día

$Q_d$ : caudal de diseño, en L/s

SST : concentración de sólidos suspendidos totales, en mg/L

$$F_M = 0.0864 ( 9 ) ( 6,484 )$$

$$F_M = 5,041.9584 \text{ kg/día}$$

$$F_M = 11,115.50 \text{ libras/día}$$

Como la planta solo operará en un turno de 8 horas por día, la cantidad de lodos generados será la tercera parte del flujo másico obtenido. Por lo tanto el flujo másico del influente del sedimentador es igual a:

$$F_{MS} = F_M / 3$$

$$F_{MS} = 1,680.65 \text{ kg/turno}$$

$$F_{MS} = 3,705.17 \text{ libras/turno}$$

Un tanque de sedimentación bien diseñado puede remover hasta un 95% de la materia que causa turbiedad del agua cruda después de una coagulación y floculación eficaz; la turbiedad restante se elimina en los filtros. Para efecto de este estudio se supondrá una eficiencia de 95% en el sedimentador. El cálculo del flujo másico que retiene el sedimentador,  $F_{MR}$ , y del flujo másico  $F_{ME}$  que escapa al sedimentador (que será retenido por la unidad de filtración) se muestra a continuación:

Cálculo del flujo másico retenido por el sedimentador.

$$F_{MR} = ( 1,680.65 ) ( 0.95 )$$

$$F_{MR} = 1,596.62 \text{ kg / turno}$$

$$F_{MR} = 3,519.91 \text{ libras / turno}$$

Cálculo del flujo másico que escapa al sedimentador.

$$F_{ME} = ( 1,680.65 ) ( 1 - 0.95 )$$

$$F_{ME} = 84.032 \text{ kg / turno}$$

$$F_{ME} = 185.26 \text{ libras / turno}$$

Suponiendo que el lodo tiene una concentración de 3%, es decir por cada 100 litros de lodo 3 litros son sólidos y 97 litros son de agua, se calcula el flujo de lodo según la siguiente expresión:

$$Q_L = ( F_{MR} / ( \gamma C ) )$$

En donde:

$Q_L$  : caudal de lodo, en pies<sup>3</sup> / turno

$F_{MR}$  : flujo másico de SST retenidos, en libras / turno

$\gamma$  : peso específico del agua, en libras / pie<sup>3</sup> ( 62.4 libras / pie<sup>3</sup> )

$C$  : porcentaje de concentración del lodo (3% )

$$Q_L = ( 3,519.91 / ( ( 62.4 ) ( 0.03 ) ) )$$

$$Q_L = 1,880.294 \text{ pies}^3 / \text{turno}$$

$$Q_L = 14,064.60 \text{ galones / turno}$$

Teniendo en cuenta que el turno es de 8 horas, y que un galón es igual a 3.785 litros, el flujo de lodos, en litros por segundo, es igual a

$$Q_L = 1.85 \text{ L/s.}$$

$$Q_L = 0.00185 \text{ m}^3/\text{s}.$$

El flujo de lodos se transportará por la tubería múltiple, con diámetro de 4 pulgadas, que se calculó en el numeral 5.1.5. La extracción de lodos del sedimentador se hará por medio de una bomba neumática de desplazamiento positivo, la cual enviará los lodos hacia un tanque cilíndrico cónico espesador de lodos. La concentración de lodos a la salida del espesador será de 6 %. El volumen del tanque espesador se determina para un tiempo de retención igual a un turno de 8 horas (28,800 segundos).

$$V = Q_L t$$

En donde:

V : volumen del tanque espesador de lodos, en  $\text{m}^3$

$Q_L$  : caudal de lodos, en  $\text{m}^3/\text{s}$

t : tiempo de retención de los lodos, en segundos

$$V = ( 0.00185 ) ( 28,800 )$$

$$V = 53.28 \text{ m}^3$$

Para almacenar este volumen se propone un tanque compuesto por una parte superior cilíndrica y una parte inferior cónica. El diámetro del tanque, tanto del cilindro como del cono, será  $D = 5.0 \text{ m}$ , la altura del cilindro será  $h_1 = 1.27 \text{ m}$  y la altura del cono será  $h_2 = 4.33 \text{ m}$ , para una altura teórica total  $h = 5.60 \text{ m}$ , colocándose un borde libre  $BL = 0.40 \text{ m}$ ; la altura definitiva del tanque será  $6.0 \text{ m}$ . Los volúmenes del cilindro y del cono serán  $24.94 \text{ m}^3$  y  $28.34 \text{ m}^3$ , respectivamente, para un total de  $53.28 \text{ m}^3$ . La superficie cónica deberá tener un ángulo de  $60^\circ$  respecto a la horizontal. Los lodos serán extraídos por medio de una bomba neumática de desplazamiento positivo, la cual enviará los lodos de concentración 6% hacia un filtro prensa. El cálculo del caudal de lodos que sale del espesador de lodos se muestra a continuación.

Cálculo del flujo de lodo que sale del espesador

$$Q_L = (F_{MR} / (\gamma C))$$

$$Q_L = ( 3,519.91 / ( ( 62.4 ) ( 0.06 ) ) )$$

$$Q_L = 940.147 \text{ pies}^3 / \text{turno}$$

$$Q_L = 7,032.30 \text{ galones} / \text{turno}$$

Teniendo en cuenta que el turno es de 8 horas, y que un galón es 3.785 L, el flujo de lodos es igual a

$$Q_L = 0.925 \text{ L/s}$$

$$Q_L = 0.000925 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se propone como diámetro de la tubería que trasportará este flujo de lodos desde el espesador hasta el filtro prensa,  $D = 2$  pulgadas (0.0508 m); el cálculo de la velocidad del flujo se determina con la siguiente expresión:

$$v = ( 4 Q_L / \pi D^2 )$$

En donde:

$v$  : velocidad de flujo, en m/s

$Q_L$  : caudal de lodos, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$D$  : diámetro de la tubería, en m

$$v = ( ( 4 ) ( 0.000925 ) / ( \pi ) ( 0.0508^2 ) )$$

$$v = 0.45 \text{ m/s}$$

La diferencia entre el flujo de lodos que sale del sedimentador, 1.85 L/s, y el flujo de lodos que sale del espesador, 0.925 L/s, da como resultado la cantidad de agua sobrenadante en el espesador, es decir, 0.925 L/s, la cual se enviará al canal de agua decantada. Se propone que dicha tubería sea de un diámetro igual a  $D = 2$  pulgadas (0.0508 m) para la cual la velocidad es igual a 0.45 m/s.

En la Figura 5.5 y 5.6 se muestra la vista en planta y la sección transversal del espesador de lodos respectivamente.

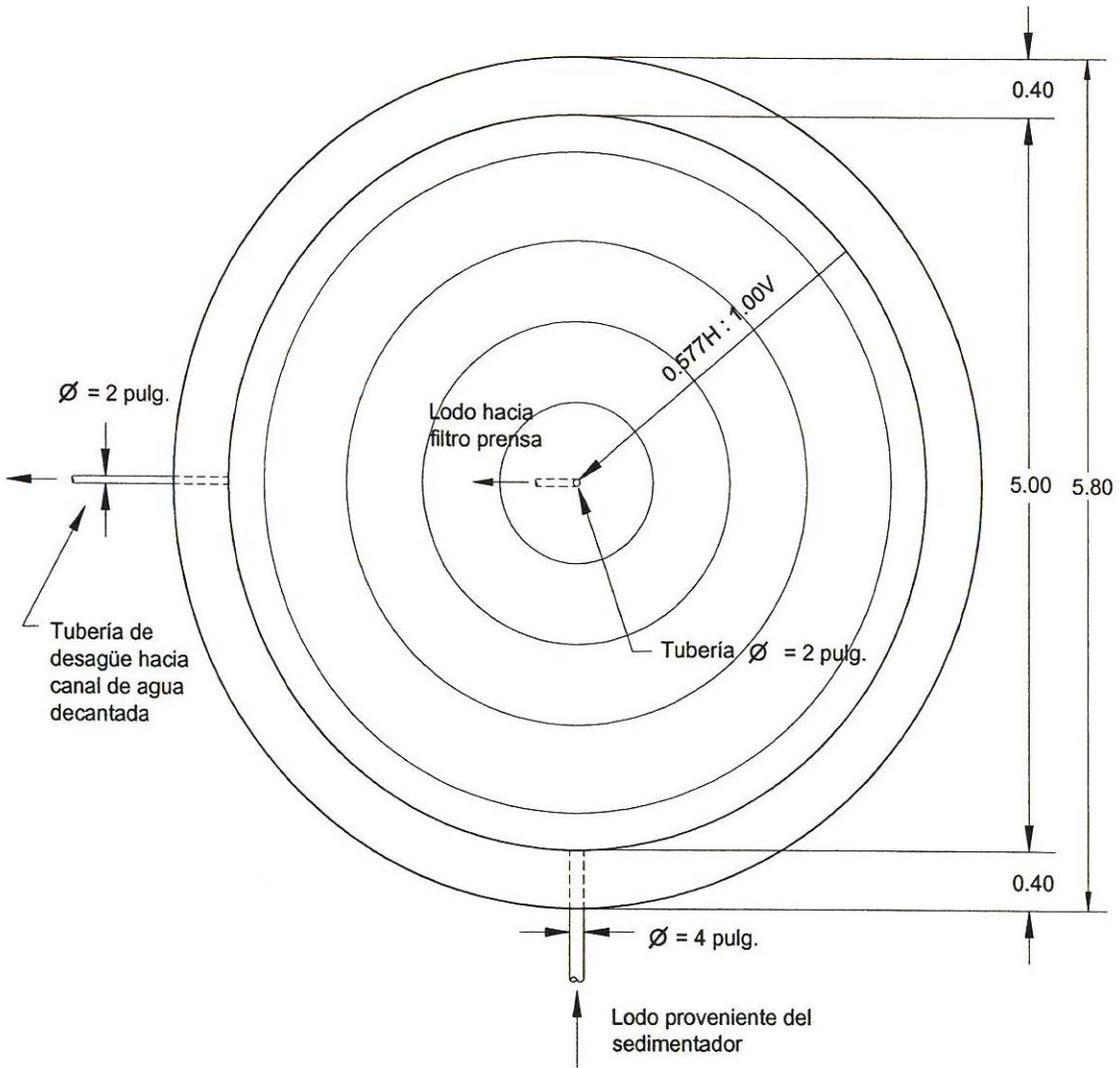


Figura 5.5  
 Vista en planta del espesador de lodos

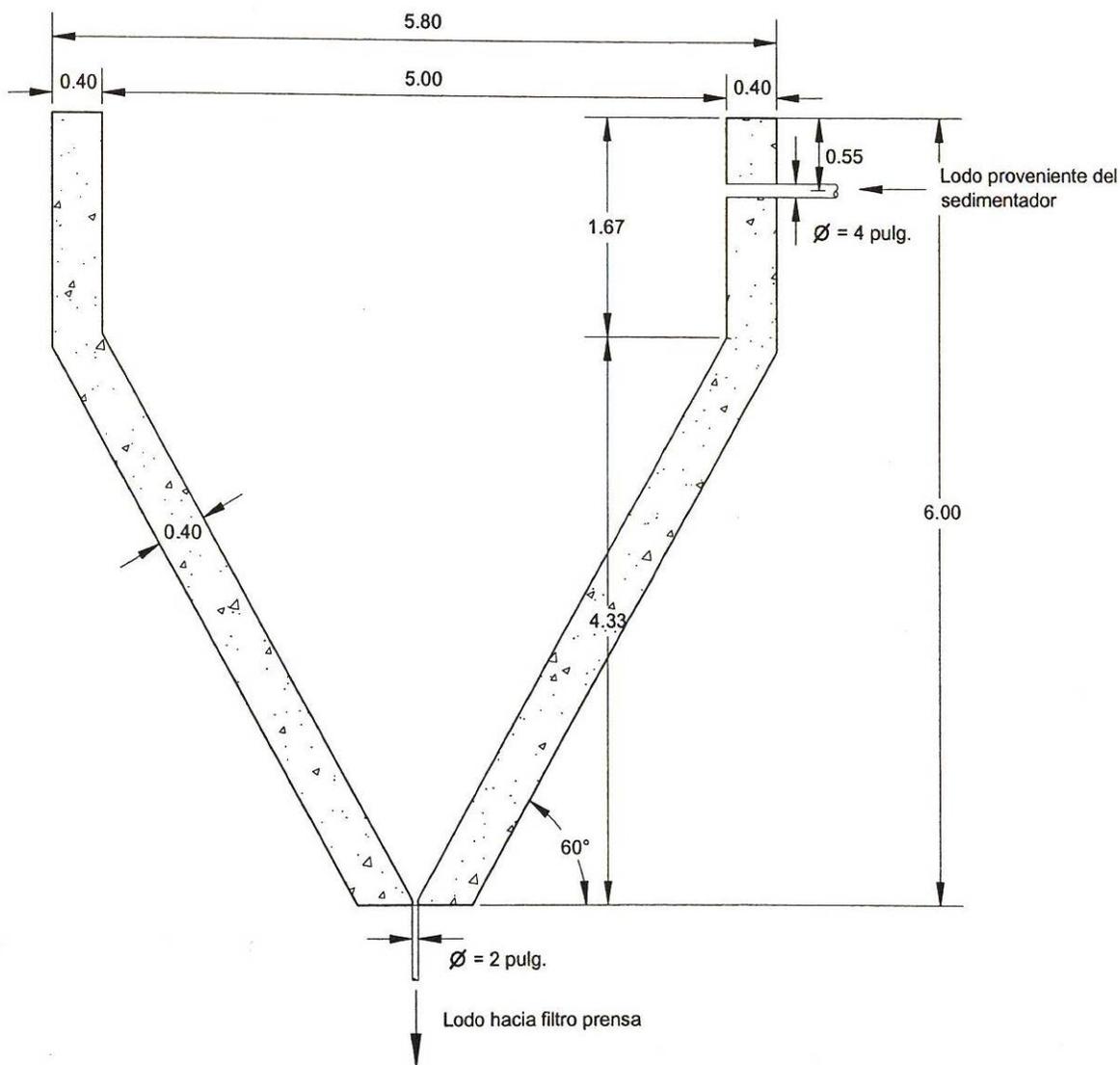


Figura 5.6  
Sección transversal del espesador de lodos

A la salida del tanque espesador se adicionará una solución al 5% de polímero poliacrilamida cationica (con pH entre 3 y 5) a la corriente de lodos que va hacia el filtro prensa, con el fin de espesar más los lodos. El agua proveniente de la deshidratación de lodos en el filtro prensa se enviará al canal de agua decantada. La torta (*cake*) de lodo que saldrá del filtro prensa tendrá una concentración de 60%, el flujo de esta torta se calcula a continuación:

$$Q_L = (F_{MR} / (\gamma C))$$

$$Q_L = ( 3,519.91 / (( 62.4 ) ( 0.60 ) ) )$$

$$Q_L = 94.0147 \text{ pies}^3 / \text{turno}$$

$$Q_L = 703.23 \text{ galones} / \text{turno}$$

$$Q_L = 2.66 \text{ m}^3 / \text{turno}$$

$$Q_L = 0.0925 \text{ L/s}$$

La diferencia entre el flujo de lodo que sale del espesador, 0.925 L/s, y el flujo de lodo o torta que sale del filtro prensa, 0.0925 L/s, da como resultado la cantidad de agua que extrae el filtro prensa, 0.8325 L/s, la cual se enviará a la entrada del sedimentador. Se propone que dicha tubería sea de un diámetro igual a  $D = 1.50$  pulgadas (0.0381 m), para la cual la velocidad de flujo es igual a 0.73 m/s.

## 5.2 LA FILTRACIÓN

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.<sup>18</sup>

Dos tipos generales de filtros se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas: el filtro lento de arena y el filtro rápido de arena. Un filtro lento de arena se compone de una capa de arena fina no clasificada, a través de la cual se filtra el agua a una baja velocidad, el filtro se limpia periódicamente raspando una delgada capa de arena sucia de la superficie a intervalos de varias semanas a meses. La arena se lava y después de varias raspaduras, se regresa al filtro. La lentitud de filtración permite la formación de una

capa activa de microorganismos llamada el *schmutzdecke* sobre el lecho de la arena, misma que proporciona el tratamiento biológico. Esta capa es particularmente efectiva en la remoción de microorganismos del agua, incluyendo los patógenos. Un filtro rápido, por otra parte, se compone de una capa de arena clasificada, o en algunos casos de un medio filtrante grueso y compuesto, por ejemplo una capa de antracita colocada encima de una capa de arena, a través de la cual se filtra el agua a velocidades más altas; el filtro se limpia retrolavando con agua.<sup>22</sup>

La filtración puede efectuarse en muchas formas distintas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados), con flujo ascendente o descendente o hasta mixto a través del filtro (parte ascendente y parte descendente). El filtro puede trabajar a presión o por gravedad según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante. Tradicionalmente, en las plantas de tratamiento municipales se han utilizado filtros de arena con flujo descendente por gravedad. Inicialmente se usaron cargas superficiales del orden de  $7 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  a  $14 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  y posteriormente se aumentaron de  $120 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  a  $180 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ . En la actualidad se está trabajando con velocidades aún mayores de  $180 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  a  $400 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$ , para lo cual se emplean medios filtrantes no homogéneos compuestos de capas de antracita y arena o antracita, arena y granate.<sup>18</sup>

Para la planta tratadora objeto de este estudio se propone utilizar un filtro rápido con lecho mixto (arena y antracita), de flujo descendente y rapidez de filtración constante. Los filtros de rapidez constante de filtración están equipados con un dispositivo de control de velocidad en el influente, o preferentemente, en el efluente (y entre los más usados es el controlador de flujo Venturi); Ésto último proporciona una resistencia ajustable al flujo del agua y compensa la creciente caída de presión en el medio filtrante. Por otra parte, los filtros de rapidez declinante no utilizan reguladores de velocidad, permitiendo que la velocidad decline en cada unidad a medida que aumenta la caída de presión.

Las variables de diseño para la filtración rápida incluyen: 1) medios filtrantes, 2) fondos del filtro y drenes inferiores, 3) arreglos para retrolavado, 4) sistemas auxiliares de lavado y 5) sistemas de control de velocidad. En la Tabla 5.3 se muestra la comparación de los criterios de diseño entre diferentes tipos de filtros.

**Tabla 5.3** Comparación entre diferentes tipos de filtros.

CARACTERÍSTICAS	FILTRO RÁPIDO CON LECHO MIXTO	FILTRO RÁPIDO CON LECHO DE ARENA	FILTRO LENTO CON LECHO DE ARENA
Carga superficial ( m <sup>3</sup> / día / m <sup>2</sup> )	235 a 590	87.50 a 175	7 a 14
Velocidad de filtración (cm/s)	0.272 a 0.683	0.101 a 0.203	0.0081 a 0.0162
Profundidad del lecho filtrante	30-45 cm de grava 45-60 cm de antracita 15-30 cm de arena	30-45 cm de grava 60-75 cm de arena	30 cm de grava 90-110 cm de arena
Drenaje	Fondos falsos o similares	Tuberías metálicas perforadas o placas porosas, fondos falsos, etc.	Tuberías perforadas de gres o cemento
Lavado	Con flujo ascendente a una velocidad entre 0.60 -1.00 m/minuto	Con flujo ascendente a una velocidad entre 0.80 -1.20 m/minuto	Raspando la superficie de la arena
Pérdida de carga	De 0.20 a 2.70 m	De 0.30 a 2.70 m	De 0.16 a 1.20 m
Tiempo entre limpiezas	12 - 48 horas	24 - 48 - 72 horas	20 - 30 - 60 días
Penetración floc	Profunda	5 cm superiores	Superficial
Cantidad agua usada en el lavado	1 - 3% del agua filtrada	1- 6% del agua filtrada	0.2-0.6% del agua filtrada
Tratamiento previo del agua	Coagulación, floculación y sedimentación	Coagulación, floculación y sedimentación	Ninguno o aireación, rara vez floculación y sedimentación
Costo de construcción	Más bajo que el de los filtros rápidos de arena	Más bajo que el de los filtros lentos	Alto
Costo de operación	Igual que el de los filtros rápidos de arena	Más alto que el de los filtros lentos	Bajo
Turbiedad y color del afluente	< 10 UT, < 20 UC 80% del tiempo	< 5 UT, < 10 UC 80% del tiempo	< 20 UT, < 10 UC 80% del tiempo
Área ocupada por los filtros	1/2 a 1/5 del área de los filtros rápidos de arena		Más grande que el área de los filtros rápidos de arena, aproximadamente 12 veces mayor

### 5.2.1 DISEÑO DEL FILTRO RÁPIDO

Se diseñará un filtro rápido de lecho mixto con arena y antracita, con flujo descendente y rata constante de filtración. La carga superficial de filtración, o velocidad de filtración igual a  $V_F = 235 \text{ m}^3 / \text{día} / \text{m}^2$  (0.272 cm/s), la velocidad de ascenso de lavado del filtro  $V_a = 0.50 \text{ m} / \text{minuto}$  (0.83 cm/s). Las propiedades y granulometría de la arena y antracita se muestran en las Tablas 5.4 , 5.5 y 5.6 a continuación.

**Tabla 5.4** *Propiedades de la antracita y de la arena.*

PROPIEDAD	ANTRACITA	ARENA
Tamaño efectivo (mm)	1.07	0.48
Coefficiente de uniformidad	1.25	1.40
Gravedad específica $S_s$	1.65	2.65
Profundidad del lecho filtrante L (cm)	50.00	25.00
Porosidad $P_o$	0.52	0.42
Coefficiente de esfericidad $C_E$	0.45	0.65

**Tabla 5.5** *Granulometría de la antracita.*

No. TAMIZ ASTM	DIÁMETRO ( cm )	$X_i$ ( % )	$X_i / d^2$ ( $\text{cm}^{-2}$ )
12.00	0.168	1.0	0.35
14.00	0.141	30.2	15.19
16.00	0.118	43.8	31.46
18.00	0.100	20.2	20.20
20.00	0.085	3.5	4.84
25.00	0.071	0.8	1.59
30.00	0.060	0.2	0.56
35.00	0.050	0.3	1.20
	TOTAL	100.0	75.39

**Tabla 5.6 Granulometría de la arena.**

No. TAMIZ ASTM	DIÁMETRO ( cm )	X <sub>i</sub> ( % )	X <sub>i</sub> / d <sup>2</sup> ( cm <sup>-2</sup> )
16.00	0.118	1.1	0.79
18.00	0.100	7.5	7.50
20.00	0.085	10.7	14.81
25.00	0.071	17.2	34.12
30.00	0.060	20.2	56.11
35.00	0.050	27.2	108.80
40.00	0.043	13.6	73.55
45.00	0.036	1.7	13.12
50.00	0.030	0.6	6.67
60.00	0.025	0.2	3.20
	TOTAL	100.0	318.67

El número de filtros a utilizar se determina según la siguiente fórmula:<sup>18</sup>

$$N_F = 0.044 \sqrt{Q_d}$$

En donde:

N<sub>F</sub> : número de filtros

Q<sub>d</sub> : caudal de diseño en m<sup>3</sup> / día (777.6 m<sup>3</sup> / día)

$$N_F = 0.044 \sqrt{ ( 777.6 ) }$$

$$N_F = 1.23$$

Se instalarán dos filtros en la planta tratadora, uno para uso y el otro para atender los casos en que la unidad en operación requiera mantenimiento.

El cálculo del área del filtro se determina con la siguiente fórmula:

$$A_F = Q_d / V_F$$

En donde:

$A_F$  : área del filtro, en  $m^2$

$Q_d$  : caudal de diseño, en  $m^3 / \text{día}$  ( $777.6 m^3 / \text{día}$ )

$V_F$  : velocidad de filtración en unidades de carga superficial,  $m^3 / \text{día} / m^2$

$$A_F = (777.6 / 235)$$

$$A_F = 3.31 m^2$$

Se proponen las siguientes dimensiones; ancho  $W = 1.50 m$  y longitud  $B = 2.20 m$ , para las cuales el área definitiva es  $A_F = 3.30 m^2$ .

Al pasar un flujo  $Q$  a través de un lecho filtrante granular de profundidad  $L$ , la fricción que el fluido sufre al atravesar los poros produce una pérdida de carga  $h$ . Al comenzar la operación del filtro, los granos del lecho están limpios y la pérdida de carga se deberá solamente al tamaño, forma y porosidad del medio filtrante y a la viscosidad y velocidad del agua, a ésta se le denomina pérdida de carga inicial  $h_0$ . Si el fluido no tuviera partículas en suspensión o disolución, esta pérdida de carga inicial sería constante a través de todo el período de trabajo o carrera del filtro. Sin embargo, como sucede ordinariamente, el fluido contiene sólidos y éstos irán recubriendo los granos del lecho incrementando su diámetro y disminuyendo la porosidad inicial  $P_0$  del lecho, con lo que la pérdida de carga irá incrementándose por la disminución del área de paso del flujo. La fórmula para calcular la pérdida de carga inicial es la siguiente:

$$h_0 = 150 \nu L (1 - P_0)^2 V_F \sum (X_i / d^2) / (g P_0^3 C_E^2) \quad 23$$

En donde:

$h_0$  : pérdida de carga inicial, en  $cm$

$\nu$  : viscosidad cinemática del agua en  $cm^2 / \text{segundo}$  ( $0.0101 cm^2/s$ )

L : profundidad del lecho filtrante, en cm

P<sub>0</sub> : porosidad inicial del lecho filtrante

V<sub>F</sub> : velocidad de filtración en cm/s (0.272 cm/s)

$\Sigma ( X_i / d^2 )$  : sumatoria de la relación porcentaje sobre diámetro del grano al cuadrado, obtenida con base en la granulometría, en cm<sup>-2</sup>

g : aceleración de la gravedad en cm/s<sup>2</sup> (9.81 cm/s<sup>2</sup>)

C<sub>E</sub> : coeficiente de esfericidad del lecho filtrante

La fórmula anterior es aplicable para sistemas en los que el número de Reynolds sea menor de seis (Re < 6 ).

El cálculo del número de Reynolds para el grano de antracita de mayor diámetro, d = 0.168 cm es como sigue:

$$Re = d V_F / \nu$$

$$Re = ( 0.168 ) ( 0.272 ) / ( 0.0101 )$$

$$Re = 4.52$$

El cálculo del número de Reynolds para el grano de arena de mayor diámetro d = 0.118 cm.

$$Re = d V_F / \nu$$

$$Re = ( 0.118 ) ( 0.272 ) / ( 0.0101 )$$

$$Re = 3.18$$

Los dos números de Reynolds calculados para la antracita y para la arena son menores a 6, luego se puede calcular la pérdida de carga inicial con la fórmula antes expuesta.

El cálculo de la pérdida de carga inicial para el lecho de antracita es como sigue:

$$h_0 = 150 ( 0.0101 ) ( 50 ) ( 1 - 0.52 )^2 ( 0.272 ) ( 75.39 ) / ( ( 981 ) ( 0.52 )^3 ( 0.45 )^2 )$$

$$h_0 = 12.81 \text{ cm}$$

$$h_{0 \text{ antracita}} = 0.13 \text{ m}$$

El cálculo de la pérdida de carga inicial para el lecho de arena es:

$$h_o = 150 (0.0101) (25) (1 - 0.42)^2 (0.272) (318.67) / ((981) (0.42)^3 (0.65)^2)$$

$$h_o = 35.96 \text{ cm}$$

$$h_{o \text{ arena}} = 0.36 \text{ m}$$

También se presentan pérdidas de carga cuando el filtro es lavado con una velocidad ascensional de lavado  $V_a = 0.50 \text{ m/minuto}$  ( $0.83 \text{ cm/s}$ ) y los lechos de arena y antracita se expanden debido a la acción del flujo ascendente. Las expresiones para calcular la pérdida de carga debido al lavado y el porcentaje de expansión del lecho son las siguientes.

$$\Delta h_L = L X_i (1 - P_o) (S_s - 1)$$

$$\%E = \Delta \varepsilon X_i$$

$$\Delta \varepsilon = (P_e - P_o) / (1 - P_e)$$

$$P_e = (V_a / V_s)^{0.22}$$

En donde:

$\Delta h_L$  : pérdida de carga en el lecho debido a lavado, en cm

L : profundidad del lecho filtrante, en cm

$X_i$  : porcentaje de granos que pasa el tamiz ASTM

$P_o$  : porosidad inicial del lecho filtrante, adimensional

$S_s$  : gravedad específica del lecho filtrante

$\%E$  : porcentaje de expansión del lecho filtrante

$\Delta \varepsilon$  : delta de expansión, adimensional

$P_e$  : porosidad expandida, adimensional

$V_a$  : velocidad ascensional de lavado, en cm/s

$V_s$  : velocidad de sedimentación del grano, en cm/s

Los cálculos del porcentaje de expansión del lecho y la pérdida de carga debido a lavado, en los lechos de antracita y de arena, se muestran en las Tablas 5.7 y 5.8.

**Tabla 5.7** Cálculo de la pérdida de carga debida al lavado en la antracita.

$X_i$ (%)	DIÁMETRO (cm)	$V_s$ (cm / seg)	$P_e$	$\Delta\epsilon$	%E	$\Delta h_L$ (cm)
1.0	0.168	15.123	0.528	0.017	0.017	0.16
30.2	0.141	13.163	0.544	0.054	1.619	4.71
43.8	0.118	11.325	0.563	0.097	4.281	6.83
20.2	0.100	9.753	0.581	0.147	2.971	3.15
3.5	0.085	8.335	0.602	0.206	0.721	0.55
0.8	0.071	6.909	0.627	0.288	0.23	0.12
0.2	0.060	5.715	0.654	0.388	0.077	0.03
0.3	0.050	4.577	0.686	0.533	0.159	0.05
100.00				TOTAL	10.075	15.60

**Tabla 5.8** Cálculo de la pérdida de carga debida al lavado en la arena.

$X_i$ (%)	DIÁMETRO (cm)	$V_s$ (cm / seg)	$P_e$	$\Delta\epsilon$	%E	$\Delta h_L$ (cm)
1.1	0.118	19.957	0.497	0.153	0.168	0.26
7.5	0.100	17.474	0.511	0.187	1.405	1.79
10.7	0.085	15.214	0.527	0.227	2.430	2.56
17.2	0.071	12.910	0.547	0.279	4.810	4.12
20.2	0.060	10.943	0.567	0.339	6.858	4.83
27.2	0.050	9.020	0.591	0.420	11.431	6.51
13.6	0.043	7.591	0.614	0.504	6.862	3.25
1.7	0.036	6.102	0.644	0.632	1.075	0.41
0.6	0.030	4.790	0.680	0.813	0.488	0.14
0.2	0.025	3.691	0.720	1.072	0.214	0.05
100.00				TOTAL	35.74	23.93

La velocidad de sedimentación para cada diámetro de grano de antracita y arena se calculó mediante la iteración de la fórmula para la sedimentación de partículas discretas en un líquido en reposo, la cual se muestra en el numeral 5.1.4 de este trabajo.

Al realizar el lavado de la unidad de filtración, el lecho de antracita se expande 10%. La profundidad del lecho de antracita es igual a  $L = 50$  cm, expandiéndose un 10% que corresponde a  $E_{\text{antracita}} = 5$  cm, la longitud del lecho expandido de antracita es igual a 55 cm. La pérdida de carga en la antracita debido a lavado es de  $\Delta h_{\text{antracita}} = 15.60$  cm.

Al realizar el lavado de la unidad de filtración el lecho de arena se expande 36%. La profundidad del lecho de arena es igual a  $L = 25$  cm, expandiéndose un 36% que corresponde a  $E_{\text{arena}} = 9$  cm, la longitud del lecho expandido de arena es igual a 35 cm. La pérdida de carga en la arena debido a lavado es de  $\Delta h_{\text{arena}} = 23.93$  cm.

## **PÉRDIDA DE CARGA EN EL LECHO DE GRAVA**

Debajo del lecho de arena se coloca un lecho de grava el cual se sostiene sobre el sistema de drenaje de la unidad de filtración. La grava tiene un doble propósito:

- Servir de soporte al lecho de arena durante la operación de filtrado para evitar que ésta se escape por los drenes.
- Distribuir uniformemente el agua de lavado

El tipo y tamaño del lecho de grava depende del sistema de drenaje que se use. Por lo general se colocan de 30 cm a 45 cm de lecho de grava. Se adoptará una profundidad de lecho de grava igual a 30 cm.

Al efectuar el lavado de la unidad de filtración también se generan pérdidas de carga en el lecho de grava. La pérdida de carga en un lecho de grava se determina con la siguiente expresión.

$$h_G = V_a L / 3$$

En donde:

$h_G$  : pérdida de carga en el lecho de grava, en m

$V_a$  : velocidad de ascenso en el lavado, en m/minuto

L : profundidad del lecho de grava, en m

$$h_G = ( 0.50 ) ( 0.30 ) / 3$$

$$h_G = 0.05 \text{ m}$$

$$h_G = 5 \text{ cm}$$

## **PÉRDIDA DE CARGA EN EL SISTEMA DE DRENAJE**

El objeto de los drenes que se colocan en el fondo del filtro es doble:

1. Recolectar y extraer el agua filtrada.
2. Distribuir uniformemente el agua de lavado en el lecho filtrante. Cuando los drenes están mal diseñados y no distribuyen uniformemente el agua de lavado, desestratifican la grava causando pérdidas del medio granular y una deficiente limpieza de los granos.

Los sistemas de drenaje pueden clasificarse en tres grupos: tuberías perforadas, fondos falsos y placas porosas.

Se adopta para este diseño un falso fondo de concreto prefabricado, que consiste en viguetas en forma de ve ( V ) invertidas, apoyadas a cada lado del filtro y atravesadas por segmentos de tubo o niples plásticos de 3/4 de pulgada, colocados cada 20 cm centro a centro.

Al efectuar el lavado de la unidad de filtración también se generan pérdidas de carga en el sistema de drenaje. Para un falso fondo en forma de vigueta invertida de concreto prefabricado, con una velocidad ascensional de lavado  $V_a = 0.50 \text{ m / minuto}$  (500 litros /  $\text{m}^2$  / minuto), diámetro del niple 3/4 de pulgada y una separación entre niples

de 20 cm, se determina que la pérdida de carga en el falso fondo es igual  $h_{FF} = 0.315$  m (31.5 cm) según gráfico de la referencia 18 de esta tesis.

## CÁLCULO DE LAS CANALETAS DE LAVADO

Se colocarán dos canaletas para recolectar el agua de lavado de la unidad de filtración. Siendo el área de filtración  $A_F = 3.30$  m<sup>2</sup>, a cada canaleta le corresponde un área igual a la mitad del área de filtración, es decir,  $A_C = 1.65$  m<sup>2</sup>. El caudal asignado a cada canaleta se calcula con la siguiente expresión.

$$Q_C = A_C V_a$$

En donde:

$Q_C$  : caudal en canaleta recolectora de agua de lavado, en m<sup>3</sup> / minuto

$A_C$  : área del filtro que corresponde a la canaleta de lavado, en m<sup>2</sup>

$V_a$  : velocidad ascensional de lavado, en m / minuto

$$Q_C = ( 1.65 ) ( 0.50 )$$

$$Q_C = 0.825 \text{ m}^3 / \text{minuto}$$

$$Q_C = 0.01375 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_C = 0.4856 \text{ pie}^3/\text{s}$$

La canaleta de lavado funcionará con descarga libre sobre un canal lateral dentro de la unidad de filtración. Se propone un ancho de canaleta  $b = 8$  pulgadas (0.666 pies). El cálculo de la profundidad máxima del flujo en la canaleta, para descarga libre, se calcula según la siguiente expresión.

$$H_o = (Q_C / 2.49 b)^{2/3}$$

En donde:

$H_o$  : máxima profundidad del agua, en pies

$Q_C$  : caudal en la canaleta en  $\text{pie}^3/\text{s}$

$b$  : ancho de la canaleta, en pies

$$H_o = ( 0.4856 / 2.49 ( 0.666 ) )^{2/3}$$

$$H_o = 0.44 \text{ pies}$$

$$H_o = 5.28 \text{ pulgadas}$$

Se propone como altura de la canaleta una distancia  $h = 9$  pulgadas que es mayor que la profundidad máxima del flujo  $H_o = 5.28$  pulgadas. Quedando así determinadas las dimensiones de la canaleta, ancho  $b = 8$  pulgadas (0.20 m), alto  $h = 9$  pulgadas ( 0.23 m) y longitud  $L = 1.50$  m.

Cálculo de la carga hidráulica sobre la canaleta

$$H = (Q_C / 2 C_1 L )^{2/3}$$

$$H = ( 0.01375 / ( 2 ( 1.86 ) ( 1.50 ) ) )^{2/3}$$

$$H = 0.02 \text{ m}$$

## **VOLUMEN DE AGUA REQUERIDO PARA EL LAVADO DEL FILTRO**

Al cabo de cierto número de horas de servicio el filtro se obstruye y es necesario lavarlo invirtiendo el sentido del flujo, por medio de agua que se inyecta a presión en los drenes y se recoge en las canaletas de lavado colocadas por encima de la superficie de la antracita. Esta operación de lavado dura entre 5 y 15 minutos, después de la cual el filtro vuelve a su operación normal.<sup>18</sup>

El volumen de agua necesaria para lavar el filtro se calcula como el producto del caudal de lavado  $Q_L$  por el tiempo de lavado que se adoptará  $t_L = 10$  minutos. El caudal de lavado se calcula con la siguiente expresión.

$$Q_L = A_F V_a$$

En donde:

$Q_L$  : caudal para lavar el filtro, en  $m^3 / \text{minuto}$

$A_F$  : área del filtro, en  $m^2$

$V_a$  : velocidad ascensional de lavado en  $m / \text{minuto}$

$$Q_L = ( 3.3 ) ( 0.50 )$$

$$Q_L = 1.65 \text{ m}^3 / \text{minuto}$$

$$Q_L = 0.0275 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del volumen de agua necesario para el lavado del filtro

$$V_L = Q_L t_L$$

$$V_L = ( 1.65 ) ( 10 )$$

$$V_L = 16.50 \text{ m}^3$$

La teoría recomienda efectuar el lavado de un filtro rápido con una frecuencia entre 12 y 48 horas. Se adoptará una frecuencia de cada 24 horas de operación del filtro y como la planta solo operará 8 horas por día, esto corresponde a que la limpieza del filtro se realizará cada 3 días. El volumen de agua requerido para hacer el lavado del filtro,  $V_L = 16.50 \text{ m}^3$ , se extraerá del tanque de aguas claras y se suministrará por medio de bombeo a la unidad de filtración durante 10 minutos. Esta agua sucia producida en el lavado se retornará hacia el tanque de homogeneización de la planta tratadora.

Se propone como diámetro de la tubería que transportará el agua para lavar el filtro,  $D = 6$  pulgadas ( $0.1524 \text{ m}$ ); el cálculo de la velocidad del flujo se determina con la siguiente expresión:

$$v = ( 4 Q_L / \pi D^2 )$$

En donde:

v : velocidad del flujo, en m/s

$Q_L$  : caudal de lavado del filtro, en  $m^3/s$

D : diámetro de la tubería, en m

$$v = ( ( 4 ) ( 0.0275 ) / ( \pi ) ( 0.1524^2 ) )$$

$$v = 1.51 \text{ m/s}$$

## NIVELES DE LA UNIDAD DE FILTRACIÓN

A continuación se mostrará el cálculo de los niveles de operación del filtro. A medida que transcurre el tiempo de operación, los lechos de arena y antracita se van tapando, con ello se presenta un aumento gradual en la pérdida de carga y se llega a la colmatación de los lechos, produciéndose el nivel de colmatación.

La altura de colmatación se calcula según la siguiente expresión:

$$h_{\text{colmatación}} = (H_C - h_{O \text{ arena}} - h_{O \text{ antracita}}) / n$$

En donde:

$h_{\text{colmatación}}$  : altura de colmatación, en m

$H_C$  : pérdida de carga para un filtro de rapidez constante (entre 1.80 y 2.50 m)

$h_{O \text{ arena}}$  : pérdida de carga inicial en la arena, en m

$h_{O \text{ antracita}}$  : pérdida de carga inicial en la antracita, en m

n : número de filtros

$$h_{\text{colmatación}} = (2.20 - 0.36 - 0.13) / 2$$

$$h_{\text{colmatación}} = 0.86 \text{ m}$$

En la Tabla 5.9 se muestra el cálculo de los niveles del filtro de rapidez constante.

**Tabla 5.9** Cálculo de niveles de operación del filtro.

NIVEL	FÓRMULA Y CÁLCULO
Nivel del lecho filtrante	$N_1 = \text{Falso fondo} + L_{\text{grava}} + L_{\text{arena}} + L_{\text{antracita}}$ $N_1 = 0.50 + 0.30 + 0.25 + 0.50$ $N_1 = 1.55 \text{ m}$
Nivel de canaleta de lavado	$N_2 = N_1 + E_{\text{arena}} + E_{\text{antracita}} + h_{\text{canaleta}}$ $N_2 = 1.55 + 0.09 + 0.05 + 0.28$ $N_2 = 1.97 \text{ m}$
Nivel estático	$N_3 = N_2 + h_{\text{FF}} + h_{\text{G}} + \Delta h_{\text{arena}} + \Delta h_{\text{antracita}}$ $N_3 = 1.97 + 0.315 + 0.05 + 0.239 + 0.156$ $N_3 = 2.73 \text{ m}$
Nivel mínimo	$N_4 = N_3 + h_{\text{O arena}} + h_{\text{O antracita}}$ $N_4 = 2.73 + 0.36 + 0.13$ $N_4 = 3.22 \text{ m}$
Nivel de equilibrio	$N_5 = N_4 + h_{\text{O arena}} + h_{\text{O antracita}}$ $N_5 = 3.22 + 0.36 + 0.13$ $N_5 = 3.71 \text{ m}$
Nivel de colmatación	$N_6 = N_5 + h_{\text{colmatación}}$ $N_6 = 3.71 + 0.86$ $N_6 = 4.57 \text{ m}$
Nivel de lavado	$N_7 = N_6 + (h_{\text{colmatación}} / 2)$ $N_7 = 4.57 + 0.43$ $N_7 = 5.00 \text{ m}$
Nivel o altura del filtro	$N_8 = N_7 + \text{Bordo libre}$ $N_8 = 5.00 + 0.30$ $N_8 = 5.30 \text{ m}$

En las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se muestran la vista en planta, la sección longitudinal y la sección transversal del filtro rápido de lecho mixto, respectivamente.

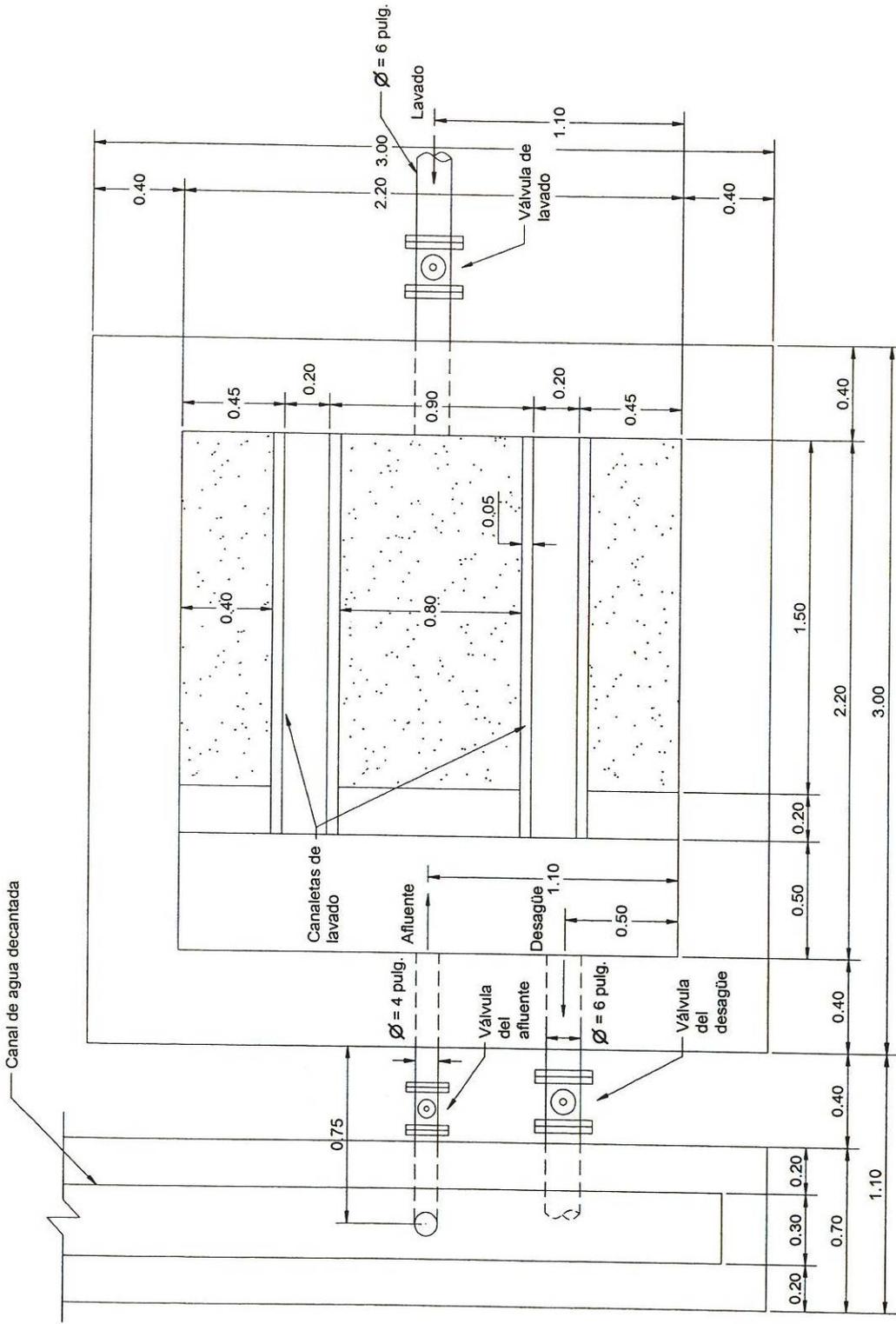


Figura 5.7  
Vista en planta del filtro rápido de lecho mixto

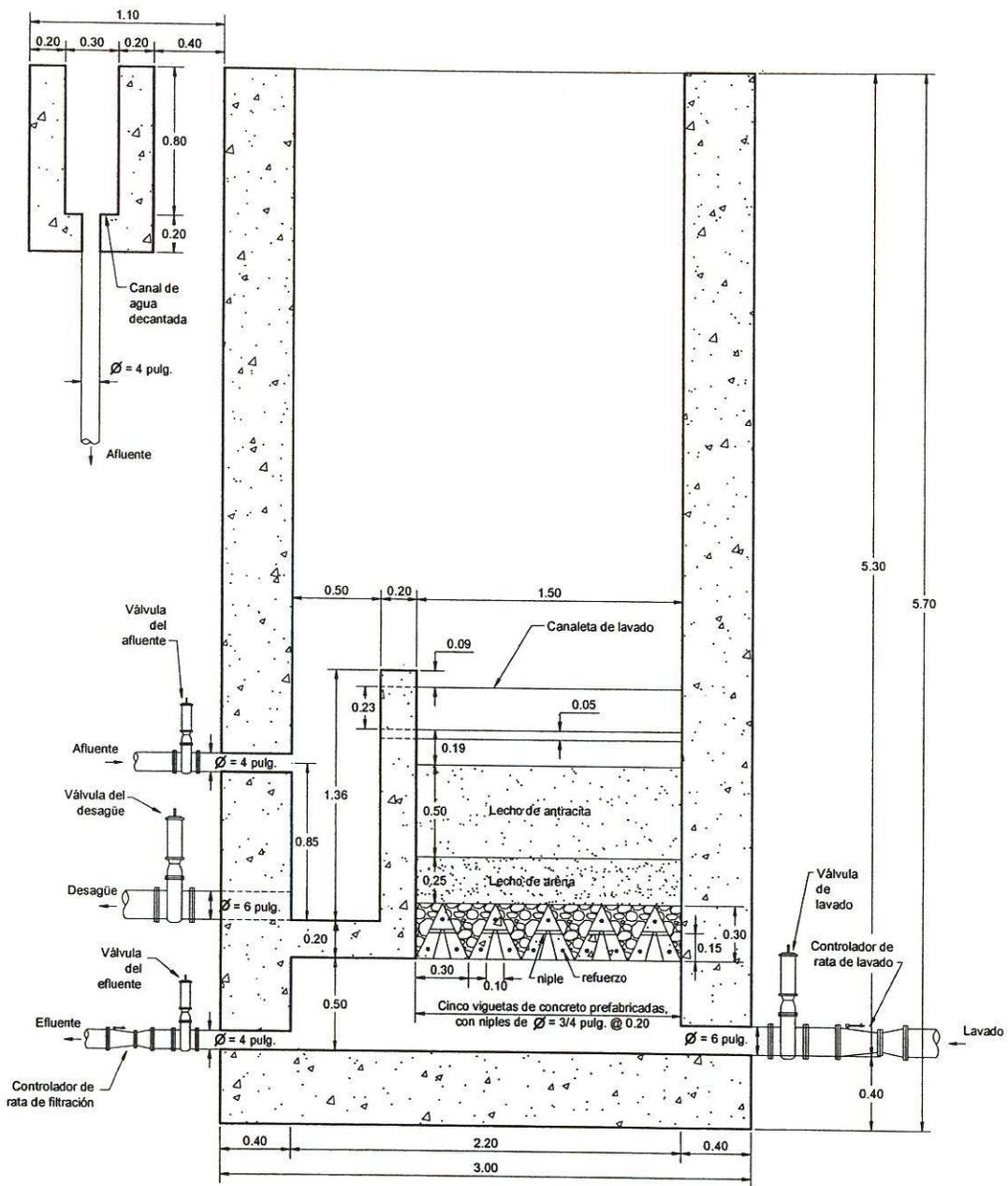


Figura 5.8  
Sección longitudinal del filtro rápido de lecho mixto

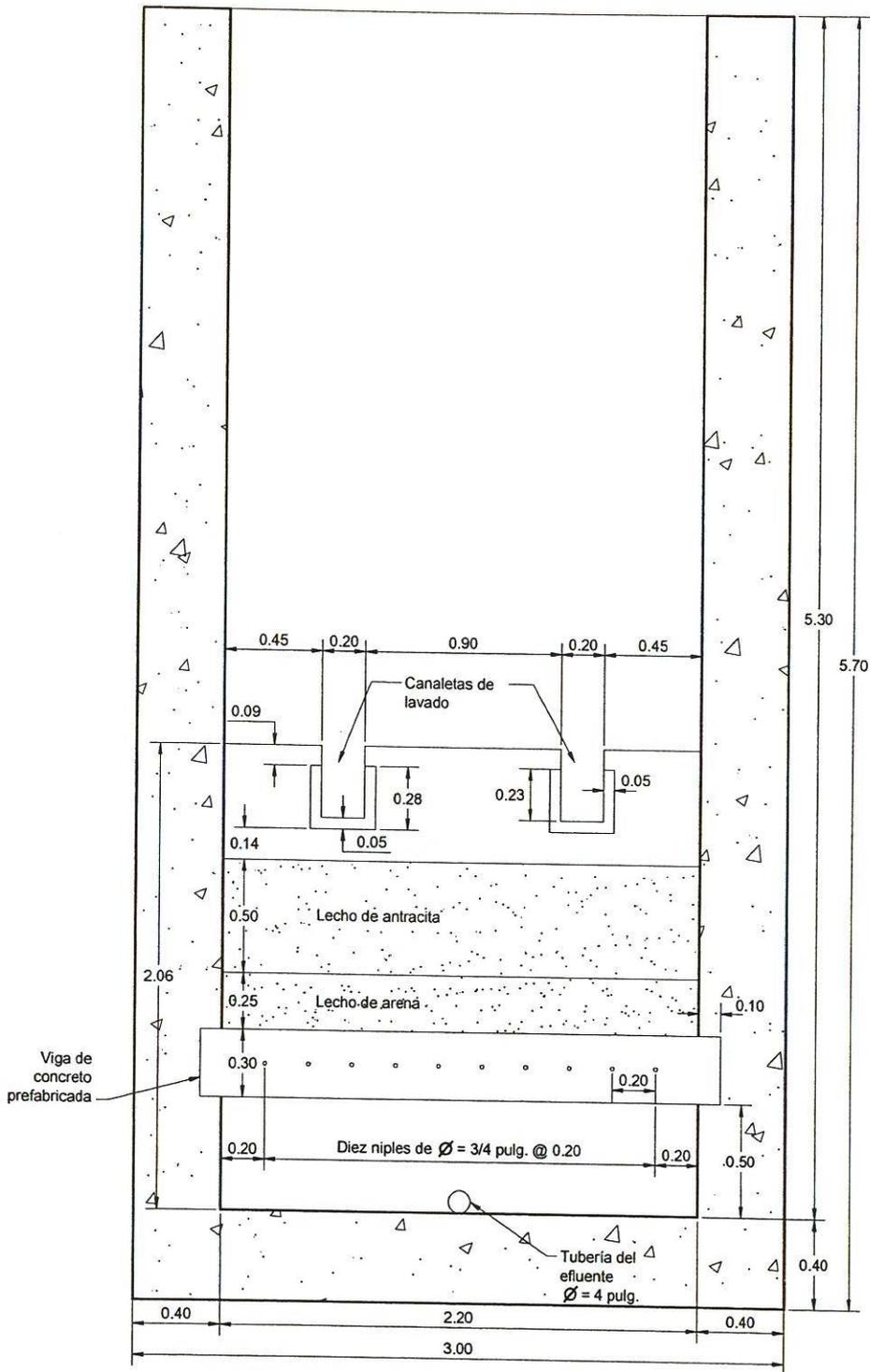


Figura 5.9  
Sección transversal del filtro rápido de lecho mixto

## 5.2.2 EL FILTRO ALBERCA

Otra alternativa para la filtración del agua proveniente del sedimentador es colocar un filtro alberca (EPD filtration system) en vez del filtro de lecho mixto. Esta alternativa ofrece fácil instalación, diseño compacto, excelente calidad de agua, operación automática, razonable precio, está revestido en acero y trabaja con caudales entre 40 galones / minuto y 1,296 galones / minuto.

Para el caudal de diseño de la planta tratadora  $Q_D = 0.54 \text{ m}^3 / \text{minuto}$  (9.00 L/s), se ha seleccionado el modelo EPD-49DWC. Este modelo trabaja con una carga hidráulica superficial igual a  $C_{HS} = 0.1222 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{minuto}$  ( 176  $\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$  ), con un caudal  $Q = 0.56 \text{ m}^3 / \text{minuto}$  ( 9.33 L/s) y un área filtrante igual a  $A_F = 4.60 \text{ m}^2$ . Este filtro constará de tres tanques que trabajarán a presión y se clasifica como un filtro de alta rapidez de filtración, ya que su carga superficial se ubica entre 120  $\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$  y 360  $\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$ .

## 5.2.3 EL CANAL DE ALIMENTACIÓN AL FILTRO

El canal que unirá el tanque sedimentador con el filtro de lecho mixto trabajará con flujo a superficie libre y su diseño lo determina la ecuación de Manning para flujo en canales abiertos:<sup>26</sup>

$$Q = A R^{2/3} S^{1/2} / n$$

$$A = b Y_n$$

$$R = b Y_n / ( b + 2 Y_n )$$

En donde:

Q : caudal en el canal en,  $\text{m}^3 / \text{s}$

A : área mojada del canal, en  $\text{m}^2$

S : pendiente del canal, adimensional

n : coeficiente de manning, adimensional

b : ancho del canal, en m

$Y_n$  : profundidad normal del flujo en el canal, en m

R : radio hidráulico, en m

Para efecto de diseño del canal se propone un ancho  $b = 0.30$  m, una pendiente del canal  $S = 0.001$  m / m, coeficiente de manning para concreto  $n = 0.013$  y el caudal de diseño que es  $Q = 0.009$  m<sup>3</sup> / segundo (9 L/s).

Cálculo de factor de sección

$$K = Q n / S^{1/2}$$

$$K = (0.009) (0.013) / (0.001)^{1/2}$$

$$K = 0.0037$$

El factor de sección también es igual a:

$$K = A R^{2/3}$$

En ésta ecuación A y R son función de la profundidad normal  $Y_n$ , que es desconocida, y del ancho del canal  $b = 0.30$  m. Como K ya es conocido e igual a 0.0037, la igualdad anterior quedaría en función de una sola incógnita,  $Y_n$ , la cual es difícil de despejar. Mediante un proceso iterativo suponiendo valores diferentes de  $Y_n$  hasta encontrar el valor que satisfaga la igualdad, se encontró que  $Y_n = 0.085$ m, para el cual el área hidráulica es igual a  $A = 0.0255$  m<sup>2</sup>, el radio hidráulico es  $R = 0.0543$  m y la velocidad del flujo en el canal es igual a  $V = 0.35$  m/s. Al canal se le dará una altura definitiva  $h = 0.50$  m.

#### 5.2.4 ELTANQUE DE AGUA CLARA

El cálculo del volumen de almacenamiento del tanque de aguas claras se determinará para el volumen de agua generado en un turno de operación de la planta tratadora,  $t = 8$  horas ( 28,800 segundos ). El cálculo se muestra a continuación.

$$V = Q_D t$$

En donde:

V = volumen del tanque de aguas claras, en litros

$Q_D$  : caudal de diseño en L/s

t : tiempo de retención en segundos (28,800 segundos)

$$V = ( 9 ) ( 28,800 )$$

$$V = 259,200 \text{ L}$$

$$V = 259.2 \text{ m}^3$$

Las dimensiones propuestas para almacenar este volumen son, ancho  $W = 8.0$  m, largo  $L = 12.0$  m y profundidad  $H = 2.70$  m. Colocándole un bordo libre de  $BL = 0.50$  m, la altura definitiva del canal es  $H = 3.20$  m.

Previo a que el agua ingrese al tanque de aguas claras se instalará un módulo de desinfección de agua por luz ultravioleta en la tubería de diámetro  $D = 4$  pulgadas que conduce el efluente clarificado del filtro de lecho mixto, este módulo tendrá una capacidad máxima de 757 litros minuto y se ha seleccionado el modelo UV 7200.

En la Figura 5.10 se muestra la vista en planta del sistema de tratamiento de agua residual, mostrándose cada una de las unidades de operación de tratamiento.

### 5.3 LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Las pérdidas de energía por fricción en una conducción que funciona a tubo lleno se calculan con la fórmula de Hazen-Williams como se muestra a continuación.

$$hf = L ( Q / ( 0.2788 C D^{2.63} ) )^{1.85}$$

En donde:

$h_f$  : pérdida de energía por fricción, en m

$L$  : longitud de la tubería, en m

$Q$  : caudal que conduce la tubería, en  $m^3/s$

$C$  : coeficiente de Hazen-Williams igual a 140 para tubos rectos y lisos

$D$  : diámetro de la tubería, en m

Las pérdidas de energía locales en una conducción cerrada se expresan como función de la altura cinética que se presenta dentro del accesorio o pieza especial que produce dichas pérdidas. La expresión general es:

$$h_L : K V^2 / 2 g$$

En donde:

$h_L$  : pérdida de energía local, en m

$K$  : coeficiente de pérdida de energía localizada

$V$  : velocidad del flujo en la tubería, en m/s

$g$  : aceleración de la gravedad, igual a  $9.81 \text{ m/s}^2$

El valor de  $K$  para codos de  $90^\circ$  es igual a 0.30, el valor de  $K$  para una embocadura o salida de un tanque es igual a 1.

En las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12 se muestra el cálculo de las pérdidas por fricción, cálculo de pérdidas locales debido a codos de  $90^\circ$  y cálculo debido a entradas o salidas de un tanque, respectivamente.

**Tabla 5.10** Cálculo de la pérdida de energía debido a fricción.

TUBERÍA	DIÁMETRO (pulgadas)	LONGITUD (m)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	hf (m)
Salida del tanque homogeneizador	4	6	0.009	0.08
Solución de coagulante	1/2	28	0.0002	7.69
Lodo del sedimentador al 3%	4	22	0.00185	0.01
Lodo del espesador al 6%	2	8	0.000925	0.04
Agua sobrenadante del espesador	2	40	0.000925	0.22
Agua que sale del filtro prensa	1 1/2	47	0.0008325	0.86
Afluente del filtro de lecho mixto	4	4	0.009	0.05
Efluente del filtro de lecho mixto	4	7	0.009	0.09
Lavado del filtro de lecho mixto	6	15	0.0275	0.21
Desagüe del filtro de lecho mixto	6	45	0.0275	0.63

**Tabla 5.11** Cálculo de pérdidas locales por codo de 90°.

TUBERÍA	DIÁMETRO ( pulgadas)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	VELOCIDAD (m/s)	NÚMERO DE CODOS	hL (m)
Salida del tanque homogeneizador	4	0.009	1.11	1	0.019
Solución de coagulante	1/2	0.0002	1.58	2	0.076
Lodo del sedimentador al 3%	4	0.00185	0.23	2	0.002
Lodo del espesador al 6%	2	0.000925	0.46	3	0.01
Agua sobrenadante del espesador	2	0.000925	0.46	6	0.019
Agua que sale del filtro prensa	1 1/2	0.0008325	0.73	6	0.049
Afluente del filtro de lecho mixto	4	0.009	1.11	1	0.019
Efluente del filtro de lecho mixto	4	0.009	1.11	2	0.038
Lavado del filtro de lecho mixto	6	0.0275	1.51	3	0.104
Desagüe del filtro de lecho mixto	6	0.0275	1.51	4	0.139

**Tabla 5.12** Cálculo de pérdidas locales por entradas y salidas.

TUBERÍA	DIÁMETRO (pulgadas)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	VELOCIDAD (m/s)	NÚMERO DE ENTRADAS Y SALIDAS	hL (m)
Salida del tanque homogeneizador	4	0.009	1.11	2	0.126
Solución de coagulante	1/2	0.0002	1.58	1	0.127
Lodo del sedimentador al 3%	4	0.00185	0.23	1	0.003
Lodo del espesador al 6%	2	0.000925	0.46	2	0.021
Agua sobrenadante del espesador	2	0.000925	0.46	2	0.021
Agua que sale del filtro prensa	1 1/2	0.0008325	0.73	2	0.054
Afluente del filtro de lecho mixto	4	0.009	1.11	2	0.126
Efluente del filtro de lecho mixto	4	0.009	1.11	2	0.126
Lavado del filtro de lecho mixto	6	0.0275	1.51	2	0.232
Desagüe del filtro de lecho mixto	6	0.0275	1.51	2	0.232

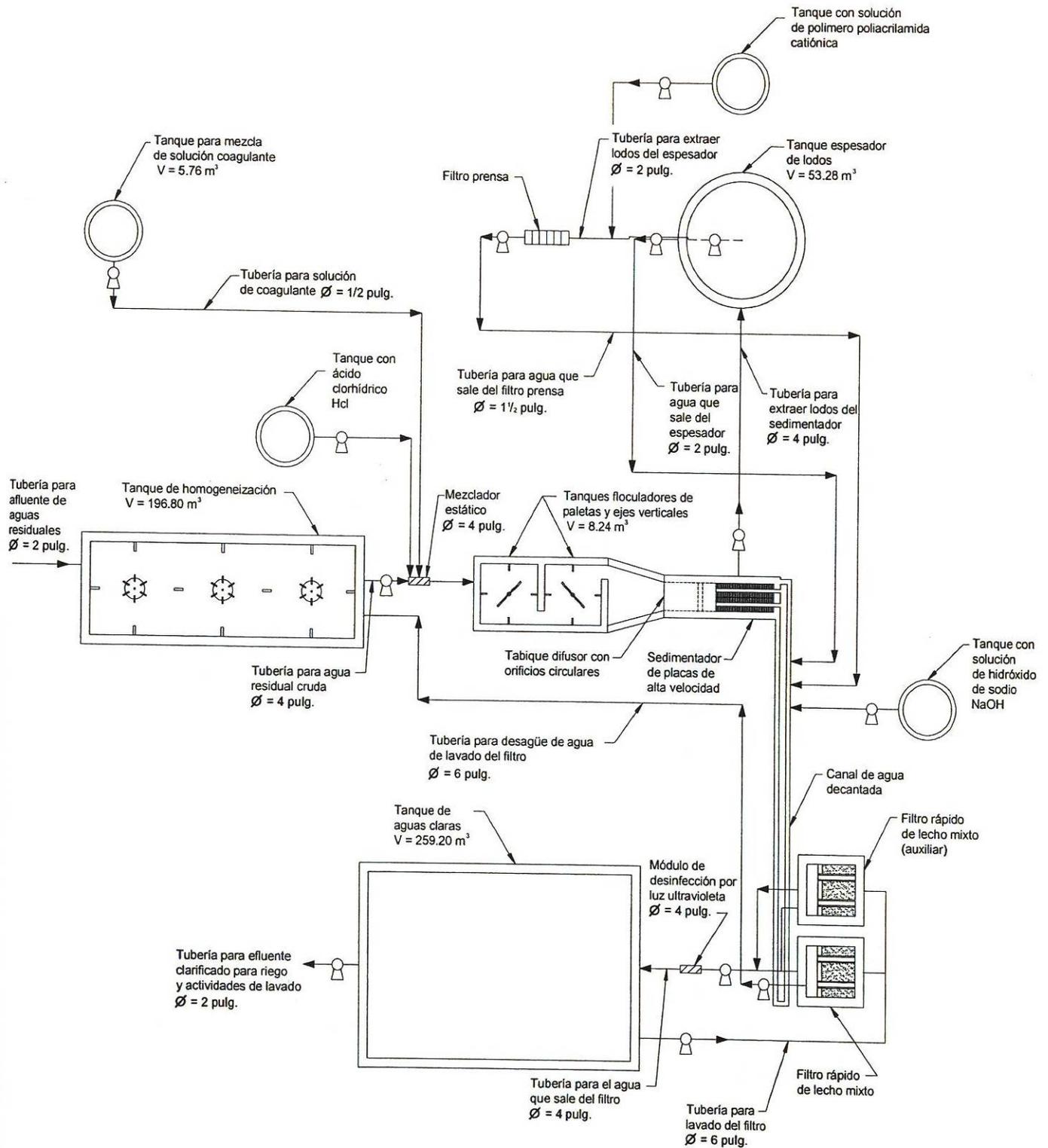


Figura 5.10  
Vista en planta del sistema de tratamiento de agua residual

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES**

En los capítulos anteriores se ha planteado la solución al problema de contaminación del suelo y áreas verdes, debida a la disposición directa de agua residual con trazas de esmalte sobre una laguna de residuos y a la utilización de la misma en el riego de áreas verdes. Esas actividades son realizadas sin control y han traído como consecuencia la contaminación de un sector de la planta cerámica objeto de este estudio. La solución planteada consiste en tratar el agua residual generada en las actividades de limpieza de las instalaciones en las que se efectúa la producción de pasta cerámica y de esmalte. El tratamiento propuesto es un proceso físico-químico que consiste de las operaciones de coagulación, floculación, sedimentación y filtración; el mismo permitirá reutilizar el agua tratada en actividades de lavado y riego de zonas verdes.

El tratamiento de agua residual traerá como beneficio minimizar el consumo de agua de pozo para las necesidades de la planta cerámica, la cual se abastece de agua desde dos pozos a fin de satisfacer sus necesidades, las cuales se han estimado en un gasto promedio de 677 m<sup>3</sup> por día. Minimizar este gran consumo con la reutilización y recirculación del efluente tratado, particularmente para actividades de lavado que consumen un gasto promedio de 219 m<sup>3</sup> por día, reducirá en un 32% el agua extraída de los pozos.

La experiencia en otras plantas de fabricación cerámica, la teoría e investigaciones hechas sobre los usos del agua en la industria de la cerámica, han permitido calcular que la cantidad de agua usada, por metro cuadrado de producto

cerámico fabricado, varía entre 5 L/m<sup>2</sup> y 15 L/m<sup>2</sup>. Los resultados de este estudio han superado dichas expectativas y se ha determinado un consumo de agua igual a 30 L/m<sup>2</sup>.

La implantación de este proyecto de tratamiento de agua residual tendrá mayor éxito si se apoya en un programa de gestión del agua que tenga como principal objetivo la optimización de este recurso, mediante una política de hacer conciencia entre el personal de la planta cerámica en lo concerniente a la importancia y beneficios que trae un uso adecuado y racional del agua, eliminando malos hábitos de uso y de desperdicio, implementando procedimientos para el uso del agua, eliminando fugas, instalando equipos y tuberías seguros y desarrollando un plan de riego controlado en las zonas verdes.

Finalmente, una correcta utilización del agua en la fábrica de productos cerámicos llevará a reducir al máximo las necesidades del agua de lavado y en aprovechar al máximo las posibilidades de reciclado del agua residual tratada, minimizando de este modo el impacto ambiental sobre la planta cerámica y sus alrededores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Osorio, Carlos. *Ética y educación en valores sobre el medio ambiente para el siglo XXI*. Segundo encuentro latinoamericano y caribeño de jóvenes por el medio ambiente, la vida y la paz. Cartagena. Editorial Latina, Colombia, 2000. p. 1-2.
2. Jonas, H. *El principio de responsabilidad. Ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Editorial Herder, Barcelona, 1995. p. 3.
3. Jacobs, M. *La economía verde. Medio ambiente, desarrollo sostenible y la política del futuro*. Editorial Icaria, Barcelona, 1997. p. 2.
4. Waks, L. *The responsibility cycle in STS education*. Working paper, National STS education network (U.S). University Park PA Publishers, USA, 1988. p. 5.
5. Morin, E. *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. UNESCO EDITORES, Paris, 1999. p. 2.
6. Bialy, Michele. *History of tile in other countries*. Ceramic Tile Institute. Tile Manual, Editorial CTI, Italia, 1991. p. 1-6.
7. Dacosta-Silveira, Cristina. *Soluciones de Ingeniería Ambiental para el control de partículas en una planta industrial cerámica*. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Escuela de graduados de Ingeniería Civil. Monterrey, México, 2001. p. 8-12.
8. *Hay suficiente agua en el mundo*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Organización Meteorológica Mundial, USA, 1997. p. 7-11.

9. Tebbutt. *Fundamentos de control de calidad del agua*. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México, 1999. p. 56-57, 75-76.
10. *Agua para todos, agua para la vida*. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, United N. Publishing., N.Y. 2002. p. 1, 5-7, 11-14, 19-20, 30-31.
11. *Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente*. Diario Oficial de la Federación. México, 28 de Enero 1988. p. 1-2.
12. *Ley de aguas nacionales*. Diario Oficial de la Federación. México, 1 de Diciembre 1992. p. 1.
13. *Tecnología de la fabricación de azulejos*. Asociación de técnicos cerámicos. SACMI. Litografía Castellón, S.A., Madrid, 1999. p. VI: 5-7, VII: 5-6,14, VIII: 5, IX: 5, 20, X: 5.
14. F. Ripolles, A. Arnau, A. Gimeno. *Las aguas residuales en la industria de la cerámica*. Técnica Cerámica No. 209. Editorial Publica S.A., Barcelona, Diciembre 1992. p. 851.
15. F. Ferrando, E. Monfort, A. Moreno, J.C. Orta. *Reciclado de aguas residuales en un proceso de fabricación de baldosas de gres moldeadas por extrusión*. Técnica Cerámica No. 224. Editorial Publica S.A., Barcelona, Junio 1994. p. 396-397.
16. A. Blasco, F. Gines, J.C. Jarque, E. Monfort. *Adición de fangos reciclados a composiciones de pavimentos y revestimientos cerámicos*. Técnica Cerámica No. 195. Editorial Publica S.A., Barcelona, Julio 1992. p. 471-472.
17. F. Ferrando, J.E. Enrique, M.F. Gazulla, P. Gómez, E. Monfort. *Eliminación de olores en aguas residuales del proceso de fabricación de baldosas cerámicas*. Técnica Cerámica No. 248. Editorial Publica S.A., Barcelona, Noviembre 1996. p. 641-649.

18. Arboleda, Jorge. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Serie Técnica 13. CEPIS Editores, Perú, Abril 1973. p. 35, 80, 141, 145,147, 161, 218-224 231-232, 256, 296-297, 356, 397, 405.
19. Valdez, Enrique. *Abastecimiento de agua potable*. Volumen I. UNAM Editores, México, Enero 1994. p. 194-195.
20. Metcalf, Eddy. *Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Editorial Labor, S.A., segunda edición, México, D.F., 1994. p. 214-218.
21. Metcalf, Eddy. *Waste water engineering. Treatment, disposal reuse*. Third edition. Mc Graw Hill, USA, 1979. p. 213, 215, 217.
22. Schulz, Okun. *Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo*. Noriega editores, México, 1998. p. 129, 173-179, 182, 188, 199.
23. Arboleda Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Acodal Editores, Colombia, 1992. p. 276-284.
24. D. Reynolds Tom, Richards Paul A. *Unit operations and procesos in environmental engineering*. Second edition. PWS publishing company. Boston USA., 1996. p. 312.
25. Fair, Geyer, Okun. *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Editorial Limusa. México, 1971. p. 257.
26. French, Richard. *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill. Primera edición. México, 1988. p.166.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

*Álvaro Moreno Restrepo*

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias

con orientación en Ingeniería Ambiental

Tesis: TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA  
DE LA CERÁMICA

Campo de Estudio: Ingeniería Ambiental

## Biografía:

Nacido en Medellín, Colombia el 16 de abril de 1968, hijo de Carlos Moreno Cubidez y Nelly Restrepo Ramírez.

## Educación:

Ingeniero Civil egresado el 22 de septiembre de 1992 de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia.

## Experiencia Profesional:

Ingeniero de diseño y de proyectos en el área de generación hidroeléctrica, sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario, sistemas de abastecimiento de agua potable, estimación de llanura de inundación de ríos, entre otros, en Empresas de Ingeniería de Consulta de Ingeniería Civil en Colombia. Ingeniero Ambiental en industria de remanufactura de inyectores para motores Caterpillar en Nuevo Laredo, Tamaulipas. Actualmente Ingeniero Ambiental en industria de productos cerámicos en Monterrey, Nuevo León.

