



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**APLICACIÓN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS  
EN MATERIALES CEMENTANTES PARA ELABORAR  
PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN**



**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A:**

**OSWALDO CERÓN ALFARO**

**ASESOR: DRA. ROSA MARIA RAMÍREZ ZAMORA**

MEXICO, D. F.

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



## DEDICATORIAS

*A DIOS:*

*Gracias por iluminar el camino hacia un sueño que ahora se ha vuelto realidad.*

*A MIS PADRES: ALTAGRACIA Y ROBERTO*

*Gracias por darme la libertad para elegir mi camino esperando no haberlos decepcionado, pero sobre todo gracias por creer en mí.*

*A MI SEGUNDA MADRE: CONCEPCION GUZMAN*

*Gracias por las inolvidables bendiciones, por todo lo que signifíco en vida para mí.*

*A MIS HERMANOS: JAVIER, ROBERTO, EDUARDO, ELIZABETH*

*Gracias por el apoyo otorgado incondicionalmente para la realización de este sueño, principalmente a ella por el sacrificio realizado para que pudiese finalizar este camino.*

*A MI PAREJA: YOLANDA GARCIA*

*Gracias por permitirme estar a tu lado durante más de una década y por todo lo que representas en mi vida.*

*Esto es por y gracias a ustedes*



## AGRADECIMIENTOS

*A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por darme la oportunidad de continuar superándome y por el gran apoyo recibido durante la elaboración de este proyecto.*

*Al Instituto de Ingeniería, UNAM, por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto.*

*Al Programa de Becas del Instituto de Ingeniería (PBII) por el financiamiento para este proyecto.*

*Al Ingeniero Alberto Fuentes y el Ingeniero Raymundo Mondragón del laboratorio de materiales y estructuras del Instituto de Ingeniería por los conocimientos y facilidades otorgadas para la experimentación de este proyecto.*

*A mis compañeros y amigos del Instituto de Ingeniería por compartir conmigo sus conocimientos y brindarme su amistad.  
Especialmente: Sandra Millán, Bertha Mercado, Dra. Nathalie Cabirol, Fabricio Espejel, Arturo Rodríguez, Jorge Elías, Marcelo Rojas.*

*A todos mis amigos que conforman el "Dvo. 18" por los grandes momentos vividos, que en lo personal, han sido los mejores de mi vida.*

*Mil Gracias*



# “APLICACIÓN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS EN MATERIALES CEMENTANTES PARA ELABORAR PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN”

## INDICE

· Lista de tablas.....	3
· Lista de figuras.....	6
· Lista de fotos.....	7
· Abreviaturas.....	8
- Resumen.....	9
- Introducción.....	10
- Objetivos.....	11

### CAPITULO 1. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO

1.1 Generalidades de lodos fisicoquímicos.....	13
1.1.1 Definición.....	13
1.1.2 Procesos de producción.....	14
1.1.3 Caracterización de lodos.....	16
1.1.4 Legislación.....	20
1.1.5 Prácticas de disposición final.....	29
1.1.6 Tratamiento y disposición final.....	31
1.2 Panorama general de opciones de aprovechamiento y utilización de lodos.....	32
1.2.1 Tendencias de aprovechamiento en diferentes países.....	33
1.2.2 Estudio de casos.....	38
1.3 Generalidades de materiales cementantes para elaborar productos de la construcción.....	44
1.3.1 Definición y tipos.....	44
1.3.2 Procesos de fabricación de productos elaborados con materiales cementantes.....	46
1.3.3 Factores de influencia de los procesos de fabricación de productos elaborados con materiales cementantes.....	49
1.3.4 Características de productos fabricados con materiales cementantes.....	51
1.3.5 Aplicaciones.....	55

### CAPITULO 2. METODOLOGIA DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ELABORAR PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN

2.1 Materiales y reactivos.....	57
2.1.1 Lodo.....	58
2.1.1.1 Descripción de la planta potabilizadora en estudio.....	58
2.1.1.2 Muestreo.....	60
2.1.1.3 Caracterización de lodos.....	64



2.2	Sistemas y técnicas experimentales para la elaboración de productos a base de cementantes y lodo.....	64	
2.3	Técnicas analíticas para pruebas de laboratorio.....	69	
<b>CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>			
3.1	Muestreo y caracterización de lodos.....	72	
3.1.1	Caracterización de lodos.....	72	
3.1.2	Estimación de la producción de lodos.....	87	
3.2	Resultados de pruebas de elaboración de mezclas cementantes.....	91	
3.3	Estimación de costos.....	106	
<b>CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>			<b>108</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>			<b>110</b>
<b>ANEXOS.....</b>			<b>115</b>



## **LISTA DE TABLAS**

## **LISTA DE FIGURAS**

## **LISTA DE FOTOS**

## **NOMENCLATURA**

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1.</b> Composición típica de los lodos con contenido de hierro y aluminio producidos en el tratamiento de agua.....	17
<b>Tabla 1.2.</b> Trazas de compuestos orgánicos.....	18
<b>Tabla 1.3.</b> Análisis de fluorescencia de Rayos X de los residuos de tratamiento de agua con sales de aluminio en dos plantas en Sudáfrica y Taiwán.....	19
<b>Tabla 1.4.</b> Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.....	21
<b>Tabla 1.5.</b> Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	21
<b>Tabla 1.6.</b> Aprovechamiento de biosólidos.....	21
<b>Tabla 1.7.</b> Criterios microbiológicos para biosólidos clase A.....	22
<b>Tabla 1.8.</b> Criterios microbiológicos para biosólidos clase B.....	22
<b>Tabla 1.9.</b> Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura en la Comunidad Económica Europea.....	23
<b>Tabla 1.10.</b> Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura en Australia.....	24
<b>Tabla 1.11.</b> Condiciones para tratamiento biológico en suelos.....	27
<b>Tabla 1.12.</b> Resumen de niveles permitidos de algunos metales para un riesgo ambiental aceptable y para disposición de los mismos aplicados en suelo.....	28
<b>Tabla 1.13.</b> Valores límite de concentración de sólidos, hierro y aluminio en lodos destinados como materiales fertilizantes en Canadá.....	29
<b>Tabla 1.14.</b> Valores límite de contaminantes en lixiviados para disposición en rellenos sanitarios de materiales no peligrosos.....	30
<b>Tabla 1.15.</b> Porcentaje de reducción del volumen de diferentes tipos de lodos.....	31
<b>Tabla 1.16.</b> Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países.....	35
<b>Tabla 1.17.</b> Comparación de la composición mineral de la arcilla y de los lodos producidos por dos plantas de tratamiento, una en Taiwán y otra en Sudáfrica.....	50
<b>Tabla 1.18.</b> Aplicaciones de lodo fisicoquímico en materiales de construcción.....	50
<b>Tabla 1.19.</b> Clasificación de ladrillos y tabicones.....	53
<b>Tabla 1.20.</b> Resistencia a la compresión de ladrillos y tabicones.....	53
<b>Tabla 1.21.</b> Tipos de ladrillos fabricados en México.....	54
<b>Tabla 1.22.</b> Resistencia a la compresión y composición de los tipos de mortero.....	55
<b>Tabla 1.23.</b> Volumen y valor de producción de materiales de construcción.....	56
<b>Tabla 2.1.</b> Muestras colectadas en los espesadores de la planta potabilizadora en estudio.....	61
<b>Tabla 2.2.</b> Relación de muestras tomadas en las cuatro etapas de lavado de los sedimentadores.....	63
<b>Tabla 2.3.</b> Formulaciones para elaborar especímenes de mezclas de cementantes con lodo.....	65
<b>Tabla 2.4.</b> Técnicas analíticas para determinar fluidez, resistencia a la compresión y contracción por secado.....	69
<b>Tabla 3.1.</b> Parámetros estadísticos de las características de los lodos generados y almacenados en la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje.....	73
<b>Tabla 3.2.</b> Parámetros estadísticos de las características microbiológicas de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje.....	74
<b>Tabla 3.3.</b> Parámetros estadísticos de las características microbiológicas de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de lluvias.....	74
<b>Tabla 3.4.</b> Comparación de resultados de caracterización microbiológica de lodo de espesadores de la planta potabilizadora en estudio con la normatividad nacional e internacional.....	75





<b>Tabla 3.5.</b> Comparación de resultados de caracterización microbiológica de lodo de tarquinias y presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio con la normatividad nacional e internacional.....	76
<b>Tabla 3.6.</b> Contenido de óxidos en muestras secas de lodo generado y depositado de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje.....	78
<b>Tabla 3.7.</b> Contenido de óxidos de lodos de espesadores y de fondo de sedimentadores de la planta potabilizadora en estudio, época de lluvias.....	79
<b>Tabla 3.8.</b> Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje.....	80
<b>Tabla 3.9.</b> Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de lluvias.....	80
<b>Tabla 3.10.</b> Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de lodos de tarquinias y presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje.....	81
<b>Tabla 3.11.</b> Comparación del contenido de óxidos en lodos de la planta potabilizadora en estudio con respecto a valores reportados para otros lodos.....	82
<b>Tabla 3.12.</b> Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje y lluvias.....	83
<b>Tabla 3.13.</b> Comparación de contenido de metales de lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora en estudio, respecto a otros lodos utilizados para fabricar ladrillos y cementantes.....	85
<b>Tabla 3.14.</b> Comparación del contenido de óxidos de lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora en estudio, respecto a otros lodos utilizados para fabricar ladrillos y cementantes.....	86
<b>Tabla 3.15.</b> Comparación de tierra para elaborar adobes con lodo de la planta potabilizadora en estudio.....	87
<b>Tabla 3.16.</b> Balance de materia para estimar la generación de lodo en sedimentadores de la planta potabilizadora en estudio, en época de estiaje.....	89
<b>Tabla 3.17.</b> Balance de materia para estimar la generación de lodo en sedimentadores de la planta potabilizadora en estudio, en época de lluvias.....	90
<b>Tabla 3.18.</b> Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas binarias lodo-cemento y lodo-cal.....	92
<b>Tabla 3.19.</b> Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas binarias lodo-yeso y lodo-mortero.....	93
<b>Tabla 3.20.</b> Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas ternarias lodo-yeso-cemento, lodo-yeso-cal y lodo-cal-cemento.....	94
<b>Tabla 3.21.</b> Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas ternarias lodo-yeso-andesita, lodo-yeso-arena de río.....	95
<b>Tabla 3.22.</b> Equivalencias de mezclas elaboradas con lodo y materiales cementantes con respecto a la mezcla propuesta en la norma para fabricar morteros de cemento y de tipo mixto para mampostería.....	98
<b>Tabla 3.23.</b> Comparación de mezclas elaboradas en laboratorio con respecto a mezclas empleadas para elaborar morteros de cal.....	98
<b>Tabla 3.24.</b> Propuesta de mezclas elaboradas con lodo y material cementante para fabricar concreto de relleno.....	99
<b>Tabla 3.25.</b> Mezclas propuestas para la elaboración de tabicónes a base de lodos de la planta potabilizadora en estudio.....	100
<b>Tabla 3.26.</b> Resultados preliminares de resistencia a la compresión de tabicónes elaborados a base de lodo de la planta potabilizadora en estudio.....	100
<b>Tabla 3.27.</b> Estimación comparativa de costos de materias primas para la elaboración de tabicónes con mezclas propuestas de lodos y otra de tipo comercial.....	106
<b>Tabla 3.28.</b> Estimación de costos de materias primas para producir tabicónes comerciales con respecto a tabicónes elaborados con lodo de la planta potabilizadora en estudio y la misma cantidad de cemento que los comerciales.....	107



<b>Tabla C1.</b> Composición química típica del cemento Pórtland.....	125
<b>Tabla C2.</b> Características químicas del cemento producido en México.....	125
<b>Tabla C3.</b> Composición química de la cal viva para estabilizaciones.....	127
<b>Tabla C4.</b> Composición química de la cal hidratada para estabilizaciones.....	128
<b>Tabla F1.</b> Técnicas analíticas para determinar fluidez.....	135
<b>Tabla F2.</b> Técnicas analíticas para determinar resistencia a la compresión y contracción por secado.....	135
<b>Tabla G1.</b> Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales, época estiaje (primer día de muestreo).....	136
<b>Tabla G2.</b> Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales, época de estiaje (segundo día de muestreo).....	137
<b>Tabla G3.</b> Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales, época de lluvias.....	138



LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Esquema del proceso de coagulación-floculación.....	14
<b>Figura 2.1.</b> Representación esquemática de los muestreos realizados en las tarquinas.....	60
<b>Figura 2.2.</b> Puntos de muestreo para realizar el balance de materia en la etapa de sedimentación de la planta en estudio.....	62
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama de bloques utilizado para establecer el balance de materia en un sedimentador de la planta potabilizadora en estudio.....	87
<b>Figura 3.2.</b> Resultados de resistencia a la compresión de mezcla binaria lodo-cemento.....	96
<b>Figura 3.3.</b> Resultados de resistencia a la compresión de mezcla binaria lodo-cal...96	
<b>Figura 3.4.</b> Resultados de resistencia a la compresión de mezcla ternaria lodo-yeso-cemento.....	97
<b>Figura B1.</b> Proceso de producción de cemento.....	119
<b>Figura B2.</b> Proceso de producción de cal.....	121



LISTA DE FOTOS

Foto 1.1.	Molde para fabricar adobes.....	46
Foto 1.2.	Relleno del molde para fabricar adobe.....	46
Foto 1.3.	Forma de preparar el pisón.....	47
Foto 1.4.	Apisonar la mezcla para elaborar adobe.....	47
Foto 1.5.	Desarmar el molde para adobe.....	47
Foto 1.6.	Retirar el adobe del molde.....	47
Foto 1.7.	Obtención del adobe tradicional.....	47
Foto 1.8.	Sistema Vene-Ram para adobes.....	47
Foto 1.9.	Agregado de tepojal y lodo en la mezcladora.....	48
Foto 1.10.	Adición de cemento a la mezcladora.....	48
Foto 1.11.	Adición de agua en la mezcla.....	48
Foto 1.12.	Revisión de humedad en la mezcla.....	48
Foto 1.13.	Muestra de la mezcla antes de ser utilizada.....	48
Foto 1.14.	Vaciado de la mezcla.....	48
Foto 1.15.	Máquina bloquera con mezcla para elaborar tabicones.....	48
Foto 1.16.	Máquina bloquera en operación.....	48
Foto 1.17.	Obtención de tabicones húmedos.....	49
Foto 1.18.	Muestra de tabicones lista para secado a temperatura ambiente.....	49
Foto 2.1.	Especificaciones de la balanza analítica.....	65
Foto 2.2.	Especificaciones de agitador.....	66
Foto 2.3.	Especificaciones de moldes para fabricación de especímenes.....	66
Foto 2.4.	Agregado de mezcla lodo-material cementante a molde.....	67
Foto 2.5.	Especímenes retirados del molde para secado.....	67
Foto 2.6.	Fabricación de ladrillos pequeños y grandes a base de lodo.....	68
Foto 2.7.	Retirado de ladrillos de los moldes.....	68
Foto 2.8.	Especificaciones de mesa de fluidez.....	69
Foto 2.9.	Medición de fluidez de la mezcla.....	70
Foto 2.10.	Medición del volumen del espécimen.....	70
Foto 2.11.	Pesado de especímenes.....	70
Foto 2.12.	Especificaciones de la prensa hidráulica.....	71
Foto 2.13.	Medición del volumen de especímenes.....	71
Foto 3.1.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-cemento en estado fresco.....	101
Foto 3.2.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-cemento en estado de consolidación.....	101
Foto 3.3.	Ladrillos grandes mezcla lodo-cemento en estado fresco.....	102
Foto 3.4.	Ladrillos grandes mezcla lodo-cemento en estado de consolidación.....	102
Foto 3.5.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-cal en estado de consolidación.....	103
Foto 3.6.	Ladrillos grandes mezcla lodo-cal en estado de consolidación.....	103
Foto 3.7.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-cal en estado de consolidación.....	103
Foto 3.8.	Ladrillos grandes mezcla lodo-cal en estado de consolidación.....	103
Foto 3.9.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-yeso-cemento en estado consolidado...104	
Foto 3.10.	Ladrillos grandes mezcla lodo-yeso-cemento en estado consolidado....104	
Foto 3.11.	Ladrillos pequeños mezcla lodo-yeso-cemento en estado consolidado...104	
Foto 3.12.	Ladrillos grandes mezcla lodo-yeso-cemento en estado consolidado.....105	
Foto E1.	Tanque de recepción de aguas crudas (TRAC).....	133
Foto E2.	Canales parshall de la planta potabilizadora en estudio.....	133
Foto E3.	Sección de floculación de la planta potabilizadora en estudio.....	133
Foto E4.	Sección de sedimentación de la planta potabilizadora en estudio.....	133
Foto E5.	Sistema clarivac de la planta potabilizadora en estudio.....	133
Foto E6.	Sección de filtración de la planta potabilizadora en estudio.....	133
Foto E7.	Espesador de la planta potabilizadora en estudio.....	134
Foto E8.	Cárcamo de bombeo de lodos espesados a presa de lodos.....	134
Foto E9.	Presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio.....	134
Foto E10.	Tarquina de la planta potabilizadora en estudio.....	134



## ABREVIATURAS

**ASTM:** American Society for Testing and Materials  
**AWWARF:** American Water Works Association Research Foundation  
**BQN:** Departamento de Normalización de Québec  
**BTEX:** Compuestos de benceno, tolueno, etilbenceno, xileno  
**CEE:** Comunidad Económica Europea  
**Cemex:** Cementos mexicanos  
**CNA:** Comisión Nacional del Agua  
**COT:** Carbono Orgánico Total  
**CXS:** Contracción por Secado  
**DDT:** Dicloro-Difenil-Tricloroetano  
**DQO:** Demanda Química de Oxígeno  
**DWAF:** Department of Water Affairs and Forestry, Sudáfrica  
**DRx:** Difracción de Rayos X  
**EMA:** Entidad Mexicana de Acreditación AC  
**EPA:** Environmental Protection Agency  
**FWR:** Foundation for Water Research  
**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática  
**IMCYC:** Instituto Mexicano del Cemento y Concreto  
**MENV:** Ministerio del Medio Ambiente de Québec  
**MRF:** Materiales residuales Fertilizantes  
**NMP:** Número más probable  
**NOM:** Norma Oficial Mexicana  
**ONNCCE:** Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC  
**PAC:** Policloruro de aluminio  
**PCB's:** Policlorobencenos  
**PVC:** Policloruro de Vinilo  
**RC:** Resistencia a la compresión  
**SEMARNAT:** Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
**SST:** Sólidos Suspendidos Totales  
**ST:** Sólidos Totales  
**TRAC:** Tanque de Recepción de Agua Cruda  
**TRALF:** Tanque de Recepción de Agua de Lavado de Filtros  
**UFC:** Unidades Formadoras de Colonias  
**WRc:** Water Research Center



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar la factibilidad de aplicar lodos de plantas potabilizadoras para la elaboración de productos de la construcción. Este trabajo se compone de 4 capítulos principales:

En el capítulo I se establece el marco teórico, legal y principales opciones de aprovechamiento de lodos. Dentro de la información más importante resalta:

1. La alta producción de lodos generados durante los procesos de coagulación-floculación de agua superficial, en plantas potabilizadoras. Estudios realizados en Francia reportan una producción de 63,800 ton/año (base seca) de lodo por  $1.2E9$  m<sup>3</sup>/año de agua tratada. En España se generan 120,000 ton/año de materia seca de este residuo, a través de la potabilización de  $1.35E9$  m<sup>3</sup>/año de agua superficial. A nivel internacional, España y Francia son considerados como dos de los mayores productores de lodo en la Unión Europea. En México, no se tienen datos sobre producción de lodos, sin embargo, se considera que puede ser significativa, tomando en cuenta que el flujo de agua tratada anualmente es poco más del doble, respecto al agua tratada en España y Francia. Debido a lo anterior es necesario encontrar una opción para valorar estos residuos, disminuyendo como consecuencia, su impacto por descarga en el ambiente.
2. Los estudios de caracterización de lodos de plantas potabilizadoras muestran que estos residuos presentan altos contenidos de; aluminio (98.9%), Potasio (0.39%), Sodio (0.3%) y Hierro (0.2%). Sin embargo, según la NOM-052-SEMARNAT-1993 los lodos de plantas potabilizadoras no son clasificados como residuos peligrosos.
3. Estudios de valoración o aprovechamiento de lodos permitieron identificar seis principales aplicaciones en el aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento. Sin embargo, debido a la composición química del residuo las opciones que presentan una mayor factibilidad son: a) elaboración de materiales de construcción, b) elaboración de cerámicos, c) aplicación en suelos. De estas tres últimas, la que más destaca, es la de materiales de construcción, ya que es la opción que requiere menos acondicionamiento de la materia prima y presenta menos costos de producción, debido a que no necesita aplicar un proceso de calcinación o de estabilización como es el caso de las otras dos opciones.

En el capítulo II se describe la metodología del estudio experimental, la cual se compone de tres etapas: en la primera etapa del estudio se realizó un muestreo y caracterización de los lodos de una planta potabilizadora. En la segunda etapa se realizaron pruebas de elaboración y caracterización de especímenes a base de diferentes formulaciones de mezclas binarias y ternarias. Finalmente, en la tercera etapa se elaboraron con las mejores formulaciones, tabicones y ladrillos. A los especímenes se determinó la resistencia a la compresión (RC) y la contracción por secado (CXS) para evaluar la viabilidad para fabricar morteros y concreto de relleno.

El capítulo III presenta los resultados obtenidos en cada una de las tres etapas del estudio. Como resultados más importantes, destacan los siguientes: las mezclas lodo-cemento y lodo-mortero (90-10%) y la mezcla lodo-cal-cemento (90-5-5%) cumplieron con los valores de RC propuestos para la fabricación de morteros y concretos de relleno (CIC, 2002). Los resultados obtenidos para tabicones y ladrillos fueron menos alentadores. Finalmente, el capítulo IV presenta las conclusiones y recomendaciones sobre este estudio.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que el lodo es un material que posee una aceptable viabilidad técnica para ser utilizado en este tipo de materiales.



## INTRODUCCIÓN

La potabilización de agua es la aplicación de una serie de procesos de tratamiento para producir agua que no contenga contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no cause efectos nocivos al ser humano. Las fuentes de aguas superficiales son, por lo general, más turbias que las aguas subterráneas y contienen un mayor número de sólidos suspendidos y bacterias (Schultz y Okun, 1990), por lo que es necesario aplicar coagulantes para remover los contaminantes en suspensión, generando como resultado residuos o lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En muchos países, incluyendo México, los lodos residuales generados en la potabilización de agua, están englobados dentro de un término general como 'lodos', por lo que su regulación está asociada a la de los lodos del tratamiento de las aguas residuales, lodos estabilizados o biosólidos y lodos generados en el desazolve de alcantarillas. Por este motivo es importante realizar estudios de caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos del proceso de potabilización para determinar su calidad y de este modo, clasificarlos para una adecuada disposición final o para determinar el potencial de aprovechamiento de este tipo de residuos (Titshall y Hughes, 2005).

Los lodos generados en el tratamiento de potabilización de agua están compuestos principalmente por hidróxidos precipitados del tratamiento con productos químicos que se adicionan como agentes coagulantes y por material suspendido de la fuente de agua cruda (Elliott, *et al.*, 1990). Los lodos son considerados residuos y por tal motivo deben recibir un tratamiento de secado y/o deshidratado para disminuir su contenido de agua y su volumen, además de ser estabilizados mediante procesos físicos, químicos o biológicos para reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente o para su aprovechamiento o disposición final (EPA, 1995).

El proceso de potabilización en plantas de tratamiento de aguas superficiales genera una cantidad de lodos del orden del 5% del volumen total de agua tratada. Particularmente, en países como España, en los que la obtención de agua potable para consumo humano proviene en más del 80% de los casos, de la potabilización de aguas superficiales, se producen anualmente una cantidad elevada de esos residuos (120,000 toneladas de materia seca de lodo, con un caudal de agua tratada de  $1.35E9$  m<sup>3</sup>/año en más de 200 plantas de potabilización en España). Comúnmente estos lodos pueden ser descargados en cuencas fluviales o en vertederos destinados a tal efecto, una vez deshidratados (Armenter, *et al.*, 2002), o también pueden ser ocasionalmente utilizados en suelos agrícolas, forestales o como mejoradores de suelos (Adler, 2002). En Francia, se producen anualmente 63,800 toneladas de lodos (materia seca) de plantas potabilizadoras, con un caudal de agua tratada de  $1.21E9$  m<sup>3</sup>/año en más de 380 plantas de potabilización de agua. Siendo estos países, dos de los mayores productores de lodos de la Unión Europea.



A nivel internacional, en los últimos 15 a 20 años, instituciones de Gobierno, organismos operadores y grupos académicos han puesto mayor atención a las operaciones implicadas en el manejo y disposición del lodo producido por el tratamiento de agua. La atención se ha enfocado principalmente en los estándares requeridos para la disposición última, que tradicionalmente consistía en descargar los lodos en cuerpos de aguas o en suelos (AWWARF, 1969). Recientemente, en muchas partes del mundo, debido a las preocupaciones ambientales sobre la descarga directa a los cuerpos de agua, los lodos han sido dispuestos en rellenos sanitarios, buscando así la forma de evitar riesgos ambientales o sociales. Sin embargo esta alternativa ha encarecido los costos de producción de agua potable y ha generado preocupaciones por la posible infiltración de lixiviados al subsuelo (FWR, 1994).

En el caso de España, las legislaciones ambientales no permiten el vertido de los lodos de las estaciones de tratamiento a cuerpos de agua de tipo natural con concentraciones de sólidos en suspensión superiores a los 80 mg/L (R.D. 849/86), y es por ello que se hace necesario investigar otras posibles alternativas que se pueden plantear desde las perspectivas económica, industrial, de seguridad, social y ambiental más razonables.

La demanda de agua potable en México ha aumentado significativamente y las fuentes de abastecimiento presentan niveles más altos de contaminación (CNA, 1997). Esto ha ocasionado que, para que las plantas de tratamiento produzcan agua potable con la calidad requerida por la normatividad, se utilicen mejores tecnologías para reducir al mínimo los contaminantes del agua y como consecuencia, se genere una cantidad mayor de lodos (Armenter, *et al.*, 2002). Esta tendencia, además de las limitaciones ambientales en materia de descarga de lodos y el alza de los costos por el transporte y manejo de los mismos a los sitios de disposición, deben de llevar a buscar alternativas técnica y económicamente viables para la utilización de los lodos de modo que representen un beneficio económico y ambiental.

En México, no se tienen datos sobre producción de lodos, sin embargo, se considera que puede ser significativa, tomando en cuenta que se reportan 307 plantas potabilizadoras que utilizan el proceso de coagulación-floculación, para tratar un flujo de  $2.8 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año (CNA, 2004).

A nivel mundial, la búsqueda de un desarrollo sustentable y la preocupación por el medio ambiente han provocado que, además de buscar aplicaciones para estos residuos, éstas representen un beneficio de tipo ambiental, económico y social.

En la literatura se han encontrado una gran variedad de aplicaciones para el aprovechamiento de lodos provenientes de diferentes fuentes. Para el caso de los lodos de las plantas de tratamiento de agua se ha observado que, dependiendo de su composición y estructura, pueden ser utilizados como materiales de reciclaje en actividades de manufactura de materiales de construcción y cerámicos (Armenter, *et al.*, 2002; Elías, 2000, Onaka, 2000, Anderson, 2003; Huang y Pan, 2001; Ferreira y Olhero, 2002; Tay, *et al.*, 2002; Goldbold, 2003; Goncalves, *et al.*, 2004). Otras aplicaciones consideradas son como materia prima para obtención de alúmina activada para la preparación de adsorbentes y catalizadores (Yusunov y Khudaiberganova, 1984 y Bosch, 2002), y para aplicación en suelo agrícola, forestal y erosionado (Gallimore, *et al.*, 1999; Dayton y Basta, 2001; Adler, 2002; MENV, 2003; Titshall y Hughes, 2005).





Con base en lo descrito en párrafos anteriores, los objetivos que se plantearon en este estudio denominado “Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras en materiales cementantes para elaborar productos de la construcción”, se presentan a continuación:

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar la viabilidad de utilizar los lodos de plantas potabilizadoras para la elaboración de materiales de construcción.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar las propiedades fisicoquímicas de los lodos producidos en una planta potabilizadora mediante un programa de muestreo y caracterización.
2. Determinar las mejores formulaciones de lodos para producir ladrillos y morteros, con base en la resistencia a la compresión y contracción por secado de especímenes elaborados con estos residuos combinados con materiales de la construcción.
3. Estimar la viabilidad técnica y económica de la opción propuesta, con base en las mejores formulaciones de lodos para producir ladrillos y morteros.
4. Proponer formulaciones para aplicación de lodos en concretos de relleno, con base en las pruebas de laboratorio realizadas.



## Capítulo 1. Estudio bibliográfico

### 1.1 Generalidades de lodos fisicoquímicos

Las actividades involucradas en la operación de las plantas potabilizadoras y de tratamiento de aguas residuales generan en menor o mayor grado diferentes formas de lodos, que en caso de no ofrecer una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen (Arteaga y Cusidó-Fabregas, 1998).

#### 1.1.1. Definición

La NOM-004-SEMARNAT-2002 define a los lodos en general, como sólidos con un contenido variable de humedad, proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

Particularmente, los lodos químicos son los sólidos generados en los procesos de tratamiento de agua por la acción de un agente químico al combinarse con las impurezas del agua (RAS, 2000). Por ejemplo el ablandamiento de aguas duras mediante el proceso cal-carbonato produce lodos químicos a través de la precipitación química, ya que el  $\text{Ca}^{2+}$  precipita como  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  como  $\text{Mg(OH)}_2$  (Fair, *et al.*, 1999).

Goldbold, *et al.*, (2003) define los lodos fisicoquímicos como los sólidos producidos durante el tratamiento de potabilización de agua mediante los procesos de coagulación-floculación y sedimentación, utilizando agentes químicos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico. Estos lodos están compuestos por las impurezas removidas y precipitadas del agua así como por los residuos de los agentes químicos utilizados.

Existen otro tipo de residuos también considerados como lodos, se trata de los sólidos removidos durante las operaciones de limpieza de diferentes unidades de proceso, como es el caso de filtros y sedimentadores. Estos lodos contienen una cantidad mayor de agua y presentan menor consistencia (RAS, 2000).

En base en lo mencionado anteriormente, los lodos generados por los procesos de tratamiento de agua deben clasificarse en los siguientes grupos (RAS, 2000):

- Residuos por el retrolavado de los filtros.
- Lodos del proceso de coagulación con aluminio o hierro.
- Precipitados de hierro y manganeso.
- Lodos del proceso de ablandamiento.



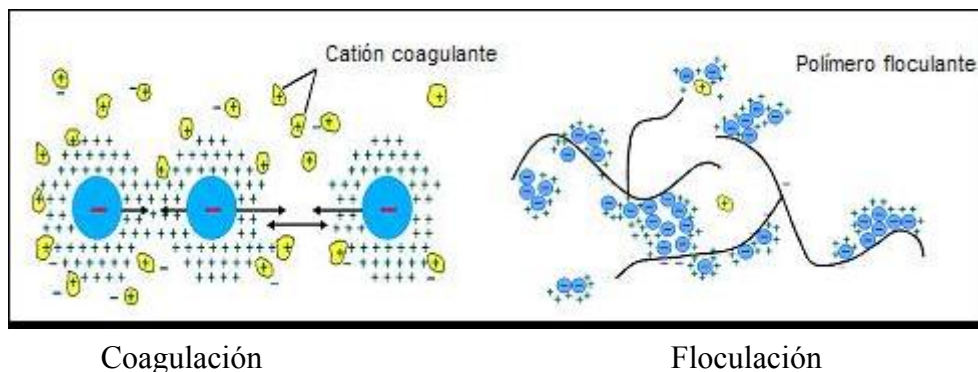
## 1.1.2 Procesos de producción

De acuerdo a estadísticas en una planta potabilizadora, los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales, mientras que los lodos de los filtros integran entre el 30 y el 40%. Sin embargo, en las plantas que remueven hierro y manganeso, los filtros retienen la mayoría de los sólidos: 50 a 90% (RAS, 2000).

Se considera que el principal proceso generador de lodos fisicoquímicos es la coagulación-floculación, seguido de un proceso de sedimentación donde se acumulan los lodos producidos. La descripción de dichos procesos se muestra a continuación:

### Coagulación y Floculación

Se entiende por coagulación a la desestabilización de las partículas coloidales mediante procesos de naturaleza física y química, que permiten su precipitación, mientras que la floculación es el proceso de agitación suave y continua que induce a la formación de conglomerados sedimentables de partículas coloidales al establecerse puentes químicos, haciendo propicia la atracción eléctrica entre las partículas. Estos procesos se representan en la figura 1.1.



**Figura 1.1. Esquema del proceso de coagulación-floculación**

La coagulación y la floculación son procesos cuyo objetivo es la remoción de sólidos suspendidos y partículas coloidales orgánicas y/o inorgánicas presentes en el agua. Esto se ve reflejado en la reducción de turbidez, color y materia orgánica a límites que pueden ser tolerados. Mediante la coagulación-floculación se remueve del 80 al 90% de la materia suspendida, del 40 al 70% de la DBO, del 30 al 60% de DQO y del 80 al 90% de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes en el agua (Benefield, *et al.*, 1982).

La coagulación se lleva a cabo en un sistema de mezclado rápido para dispersar el coagulante uniformemente en toda la masa de agua. 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 (Schultz y Okun, 1990).

La adición de sales coagulantes como sulfato de aluminio, sulfato férrico o cloruro férrico, produce cationes poliméricos tales como  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$  y  $[Fe_3(OH)_4]^{5+}$  cuyas cargas positivas neutralizan las cargas negativas de los coloides, permitiendo que las partículas se unan formando aglomerados pequeños denominados flóculos (Benefield, *et al.*, 1982).



Los coagulantes comúnmente usados son (Cheremisinoff, 1995):

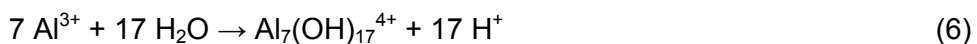
- Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ).
- Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ).
- Sulfato férrico ( $\text{Fe}[\text{SO}_4]_3$ ).
- Mezclas de sulfato férrico y cloro.

El coagulante utilizado va a depender de las características del agua a tratar y para determinar el más indicado y la dosis requerida es necesario realizar pruebas de jarras. Un factor importante para elegir el coagulante es el pH, por ejemplo, para el sulfato de aluminio, (Arboleda, 2000) determinó que el pH óptimo se encuentra en el intervalo de 5.5 –6.5. Otro factor a considerar es la alcalinidad, tomando en cuenta que 1 mg/L de sulfato de aluminio reacciona con 0.5 mg/L de alcalinidad natural. En caso de no cumplir con la alcalinidad suficiente se recomienda adicionar carbonato de sodio o cal.

Algunas de las reacciones de coagulación son (Múgica, 1996):

Reacción	Intervalo de pH	
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaSO}_4 + 6 \text{CO}_2$	5.5-8	(1)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaSO}_4$	9-11	(2)
$2 \text{FeCl}_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaCl}_2 + 6 \text{CO}_2$	8.5-11	(3)

En el caso particular del sulfato de aluminio, esta sal se disuelve rápidamente en el agua y los iones sulfato se dispersan por toda la solución como  $\text{SO}_4^-$ , mientras que los iones aluminio reaccionan con el agua o se hidrolizan. El ion aluminio en su forma simple presenta tres cargas positivas y está rodeado por seis moléculas de agua; por lo que puede representarse como  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  o simplemente como  $\text{Al}^{3+}$ . Las reacciones que se llevan a cabo con los iones aluminio son las siguientes (Sanks, 1980):



Los iones  $\text{AlOH}^{2+}$  y  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  mostrados en las reacciones 4 y 5 son monómeros que contienen un solo átomo de aluminio y debido a que sus cargas son menores a +3, son más efectivos como coagulantes para coloides negativos ya que son rápidamente absorbidos en la superficie de muchos sólidos. Los iones  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$  son similares a los polímeros, ya que contienen muchos átomos de aluminio. Estos iones probablemente son absorbidos con más fuerza en coagulantes negativos y son muy buenos coagulantes.

El compuesto  $\text{Al}(\text{OH})_3$  es un sólido, amorfo, precipitado gelatinoso de hidróxido de aluminio y es el principal componente del lodo de los sedimentadores (Sanks, 1980).



### 1.1.3 Caracterización de lodos

Los lodos pueden caracterizarse en dos grandes grupos: características fisicoquímicas y características microbiológicas. En los párrafos siguientes se describen estos grupos y los parámetros que integran a cada uno aplicables a los lodos (Fair, *et al.*, 1999).

#### Características físicas y químicas de los lodos

Las características físicas son aquellas que pueden detectarse sensorialmente y pueden medir la condición del lodo. Algunas pueden cuantificarse analíticamente con pruebas de laboratorio. Dentro de este grupo pueden mencionarse parámetros como color, olor, temperatura, % humedad y contenido de sólidos.

Las características químicas son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden provocar efectos nocivos para el contacto humano, dependiendo del tipo de disposición final o rehúso que se le quiera dar a los lodos. Entre estas características se pueden mencionar parámetros como pH, materia orgánica (medida como DBO, DQO, y COT), contenido de metales pesados y no pesados, además de nutrientes como nitrógeno y fósforo.

#### Características microbiológicas

Las características microbiológicas son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Los parámetros microbiológicos que se encuentran regulados para el aprovechamiento de lodos y biosólidos son básicamente coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de helmintos. La NOM-004-SEMARNAT-2002 define estos parámetros, establece los límites máximos permisibles y las técnicas analíticas para la cuantificación de patógenos y parásitos en lodos y biosólidos. La caracterización microbiológica de los lodos va a depender de la composición del agua tratada y de la eficacia de remoción de los diferentes procesos de tratamiento. En el anexo A se presenta una descripción de los parámetros de ambos grupos.

En la tabla 1.1 se observa la caracterización típica de lodos producidos con coagulantes con sales de hierro y con sales de aluminio, en comparación con las características reportadas para lodos generados durante los procesos de tratamiento de agua con coagulantes de aluminio en Francia y Taiwán.

Como puede observarse en esta tabla, la composición de los lodos residuales va a depender del agua de suministro y del coagulante utilizado. Si se analizan los datos presentados de dos diferentes tipos de lodo, producidos en plantas de tratamiento de agua con procesos similares, en Francia y en Taiwán, puede observarse que la mayoría de los parámetros coinciden con lo reportado por Dillion para un tratamiento típico con sulfato de aluminio. Existen algunas diferencias en la composición, sobre todo en el porcentaje de aluminio, esto debido a que la dosis de coagulante utilizado está en función de las características del agua a tratar y de la turbiedad del agua cruda.

No se encontraron referencias sobre la concentración de materia orgánica como DBO, DQO o COT. Por otra parte, considerando que el proceso de coagulación puede remover macromoléculas orgánicas y partículas del agua, además de microcontaminantes orgánicos tóxicos como PCB's y DDT; la composición de los lodos puede incluir alguno de estos compuestos en mayor o menor medida y dependiendo su concentración pueden otorgarle características de riesgo (Sanks, 1980).



Tabla 1.1. Composición típica de los lodos con contenido de hierro y aluminio producidos en el tratamiento de agua (adaptada de Dillion, 1997).

Parámetro	Tratamiento con sales de Aluminio	Tratamiento con sales de Hierro	Tratamiento con sales de Aluminio en Francia (Adler, 2002)	Tratamiento con sales de Aluminio en Taiwán (Pan, et al., 2004)
<b>Características fisicoquímicas</b>				
% de humedad	99-73	98-82.4	-	-
Sólidos suspendidos totales (% p/p)	0.1-27	1.85-17.6	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (% de St)	10-35	-	25	13-15
Sólidos suspendidos fijos (% de St)	75-99	-	75	70-85
pH	5.5-7.5	-	-	-
<b>Materia orgánica</b>				
DBO (mg/L)	30-6000	92-329	-	-
DQO (mg/L)	500-27000	9110-68900	-	-
<b>Metales</b>				
Aluminio (% de St)	4-11	4.5-10.5	10	24
Hierro (% de St)	6.5	19-38	< 1	6
Manganeso (% de St)	<0.005-5	0.06-0.81		
Calcio (% de St)			6	< 1
Magnesio (% de St)			1.5	1.5
<b>Metales pesados</b>				
Arsénico (% de St)	<0.04	0.001-0.002	-	-
Cadmio (% de St)	<0.005	<0.0001-0.0006	< 6 g/T de St	-
Cromo (% de St)	-	<0.0002-0.0125	20 g/T de St	-
Cobre (% de St)	-	0.003-0.0087	30 g/T de St	-
Plomo (% de St)	-	0.0013-0.0084	-	-
Mercurio (% de St)	-	<0.00005-0.00006	< 0.5 g/T de St	-
Níquel (% de St)	-	0.0018-0.0125	40 g/T de St	-
Zinc (% de St)	-	0.086	120 g/T de St	-
<b>Nutrientos</b>				
NTK (mg N / L)	0.7-1200	186-1440	0.6	-
Fosfatos (mg P / L)	0.3-300	0.34-6.22	0.5	-
<b>Patógenos</b>				
Conteo total de placas (no. mL <sup>-1</sup> )	30-30000	-	-	-

Notas:

- Valores no reportados.  
St= sólidos totales.

P/p= peso /peso.  
NTK= Nitrógeno Total Kjeldahl.



En Francia, el Instituto Pasteur (2002), realizó el análisis de los lodos tomados de los sedimentadores de una planta de tratamiento de agua. El resultado muestra la presencia de trazas de compuestos orgánicos como PCB's, fluoranteno y benzopireno. Estos resultados se presentan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Trazas de compuestos orgánicos (Comisión de Distribución del agua AGHTM, Francia).

(en mg/kg de PS)	PCB total	Fluoranteno	Benzo (a) Pyreno	Benzo (a) Fluoranteno
Valor medio (Instituto Pasteur)	<0.210	0.296	0.079	0.151
Límite permitido (1998)	0.8	5	2	2.5

**Notas:**

**PS= Peso seco**

El valor obtenido de estos compuestos en la muestra está por debajo del límite permitido por el acuerdo publicado el 8 de enero de 1998, en Francia para disposición y aprovechamiento de lodos. Por este motivo se considera que este lodo puede ser reutilizado para fines agrícolas, relleno en suelo, vertido en ríos o para ser aprovechado en alguna actividad industrial (Adler, 2002).

La tabla 1.3 muestra el análisis de los lodos deshidratados generados en el tratamiento con sulfato de aluminio y cal en dos plantas de Sudáfrica, Midmar y Midvaal. También se presentan los valores de los lodos deshidratados de dos plantas en Taiwán, Zhi-Thán y Feng-Shang, al norte y sur, respectivamente. Estos valores no pueden ser comparados, ya que el agua cruda es diferente en cada planta y los químicos utilizados para el tratamiento son diferentes, sin embargo, es importante mencionar que el contenido de aluminio en las dos plantas de Sudáfrica y en la del norte de Taiwán es muy similar (22 a 24%) y presentan alto contenido de sílice (aprox. 50%). Las características de estos lodos son similares a las de las arcillas, por lo que pueden considerarse como materiales susceptibles a ser utilizados como sustituto o complemento de éstas, en la fabricación de diversos materiales, dependiendo de las características requeridas (Pan, *et al.*, 2004).



Tabla 1.3. Análisis de fluorescencia de rayos X de los residuos de tratamiento de agua con sales de aluminio de 2 plantas en Sudáfrica y en Taiwán (Titshall y Hughes, 2005 y Pan, *et al.*, 2004).

Planta	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	PxC
(%)												
Midmar	54.57	22.60	11.95	1.53	1.92	4.20	0.15	1.47	0.86	0.24	99.49	23.91
Midvaal	53.07	22.36	14.24	0.41	1.83	4.45	0.33	1.89	0.74	0.47	99.79	27.70
Zhi-Thau	51	24	6	-	1.5	< 1	0.5	3	-	-	-	15
Feng Shang	14	36	2	-	<0.5	3	< 1	1	-	-	-	38
(mg/kg)												
Midmar	4.00	39.0	161.0	44.0	53.0	37.0	84.0	720	71.0	17.0	154.0	-
Midvaal	-	32.0	246.6	53.2	118	26.0	142.1	2402	66.2	5.0	187.8	0.2

- No disponible.

PxC= Pérdida por calcinación





#### 1.1.4 Legislación

Actualmente la legislación ambiental aplicable en materia de lodos está enfocada básicamente a la disposición final y aprovechamiento de los lodos estabilizados, mejor conocidos como biosólidos. Estas regulaciones marcan como objetivos principales los tratamientos indicados para la estabilización de los lodos para cumplir con los límites de contaminantes, principalmente patógenos y metales, con el fin de disponerlos adecuadamente o utilizarlos como mejoradores de suelos agrícolas o en otras actividades que representen un beneficio sin causar riesgos a la salud ni al medio ambiente.

Las legislaciones nacional e internacional, clasifican a los lodos o biosólidos de acuerdo a sus características, su aplicación y disposición final. Con esta base y dependiendo del tipo de suelo, o método de disposición, se proponen límites de contaminantes para asegurar un beneficio y evitar daños al suelo o al ecosistema.

En los siguientes apartados se mencionan las principales regulaciones enfocadas a la aplicación de lodos que actualmente están vigentes en países como México, Estados Unidos, Australia, Argentina y la CEE (Comunidad Económica Europea). En ellas se aprecia que a nivel mundial existen muchas similitudes en cuanto a los usos que se les da a los lodos y en los límites de contaminantes propuestos.

##### Nivel nacional

En México se ha considerado que los lodos de acuerdo a sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002, o en su caso, se dispongan de forma definitiva como residuos no peligrosos para atenuar sus efectos contaminantes hacia el medio ambiente y proteger a la población en general. Esta norma establece las especificaciones y los límites permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Además, clasifica a los biosólidos en tipo excelente y bueno, en función de su contenido de metales pesados; y en clase A, B y C dependiendo de su contenido de patógenos y parásitos.

Esta norma determina que para que los biosólidos puedan ser aprovechados deben de controlar la atracción a vectores como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transmitir agentes infecciosos, además de cumplir con las especificaciones de las tablas 1.4 a 1.6.



Tabla 1.4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico (As)	41	75
Cadmio (Cd)	39	85
Cromo (Cr)	1200	3000
Cobre (Cu)	1500	4300
Plomo (Pb)	300	840
Mercurio (Hg)	17	57
Níquel (Ni)	420	420
Zinc (Zn)	2800	7500

Tabla 1.5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes Fecales (NMP/g en base seca)	<i>Salmonella sp.</i> (NMP/g en base seca)	Huevos de helmintos /g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2000000	Menor de 300	Menor de 35

**Notas:**

**a= Huevos de helmintos viables**

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla 1.6 y su contenido de humedad debe ser de hasta del 85%.

Tabla 1.6. Aprovechamiento de biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase B y C
Excelente o Bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o Bueno	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

Para la disposición final de lodos y biosólidos se deberá cumplir con la constancia de "no peligrosidad" de los mismos, en términos del trámite SEMARNAT-07-007 y con las especificaciones para lodos clase C.

Los sitios de disposición final serán los que autorice la autoridad competente y los lodos que cumplan con lo establecido en esta norma podrán ser almacenados hasta por un periodo de dos años, evitando infiltraciones al subsuelo.



## Nivel internacional

### Estados Unidos

En 1993, la EPA (Environmental Protection Agency) publicó los estándares para el uso y la disposición del lodo de aguas residuales en el apartado 503, título 40 del Código Federal de Regulaciones. Esta regulación fue desarrollada para proteger la salud pública y el ambiente de los efectos nocivos de agentes contaminantes que pudieron estar presentes en los biosólidos de las aguas residuales.

Los tres puntos principales del apartado 503 están referidos a las prácticas convenientes para la eliminación de patógenos, concentraciones específicas de metales, y reducción de la atracción de vectores.

Para este propósito, los biosólidos se clasificaron en dos categorías de acuerdo a su grado de tratamiento como calidad excepcional y calidad no-excepcional.

Esta norma también clasifica a los biosólidos como clase A o B, dependiendo de la concentración de organismos patógenos presentes en el material, y describe procesos específicos para reducir los patógenos a estos niveles.

La tabla 1.7 presenta los límites permisibles de patógenos para los biosólidos clase A y la tabla 1.8 presenta los límites permisibles de patógenos para los biosólidos clase B.

Tabla 1.7. Criterios microbiológicos para biosólidos Clase A (EPA/503/5).

Parámetro	Concentración límite
Coliformes fecales	< 1000 NMP/g en base seca de ST
Huevos de Helmintos	1 Huevo de helminto /4g en base seca de ST
<i>Salmonella sp</i>	3 NMP/ 4g en base seca de ST

Tabla 1.8. Criterios microbiológicos para biosólidos Clase B (EPA/503/5).

Parámetro	Concentración límite
Coliformes fecales	Media geométrica de 7 muestras menor o igual a $2 \times 10^6$ NMP o UFC/g en base seca de ST
Huevos de Helmintos	15/g
<i>Salmonella sp</i>	$10^3$ /g

**Notas:** NMP: número más probable, UFC: unidades formadoras de colonias, ST: sólidos totales, ND: dato no disponible

Los biosólidos de la clase A contienen niveles minuciosos de patógenos. Para alcanzar la certificación de la clase A, los biosólidos deben ser sometidos a un proceso de estabilización mediante procesos térmicos, digestión o aumento de pH, para reducir el contenido de patógenos por debajo de los niveles permisibles. Los biosólidos de la clase A pueden ser utilizados en actividades relacionadas con contacto humano como en el uso en céspedes y jardines al público, los biosólidos clase B tienen estándares menos rigurosos en relación con el tratamiento y contenido de bacterias y patógenos. Los requisitos de la clase B aseguran que los patógenos se hayan reducido hasta niveles que protegen la salud pública y el ambiente e incluyen ciertas restricciones para su aplicación en suelos agrícola con diferentes tipos de cultivos, suelos para pastura de animales y para el contacto público.



## Comunidad Económica Europea

La Comunidad Económica Europea (CEE) promovió en 1986 una directiva relativa a la protección del medio ambiente, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradoras aplicados en agricultura. Esta directiva fue modificada en 1991 y en 2003 por la directiva 91/692/CEE y por el reglamento (CE) n° 807/2003.

Esta directiva tiene por objeto regular la utilización de los lodos de plantas depuradoras en agricultura, de modo que eviten efectos nocivos en los suelos, en la vegetación, en los animales y en el ser humano, al mismo tiempo que se estimula su utilización correcta. Actualmente no hay legislación de la Comunidad Europea referida específicamente a los lodos producidos por el tratamiento de agua potable, pero esta clase de lodos está englobada dentro de los lodos de esta regulación.

Esta Norma determina que los lodos residuales producidos del tratamiento de aguas residuales domésticas, residuales urbanas o de composición similar, podrán utilizarse en agricultura siempre y cuando se cumplan las condiciones de estabilización y contenido de metales pesados regulados en este documento.

Los lodos tratados o estabilizados podrán utilizarse en pastos o cultivos hortícolas, tomando en cuenta el pH del suelo y las necesidades de nutrición de las plantas, sin perjudicar la calidad del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas.

Los valores regulados para el contenido de metales pesados para suelos con fines agrícolas se muestran en la tabla 1.9.

Tabla 1.9. Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura (86/278/CEE).

Parámetro	Valores límite (mg/kg de materia seca)
Cadmio	20 a 40
Cobre	1000 a 1750
Níquel	300 a 400
Plomo	750 a 1200
Zinc	2500 a 4000
Mercurio	16 a 25
Cromo <sup>(a)</sup>	-

<sup>(a)</sup> No es posible en esta fase fijar los valores límite para el cromo. El Consejo de Estados miembros fijará estos valores.

Respecto al cobre, al zinc y al cromo, cuando haya quedado demostrado satisfactoriamente para la autoridad competente del Estado miembro que tales metales no están presentes o sólo están presentes en cantidad despreciable en las aguas residuales traídas por la planta depuradora, los Estados miembros decidirán sobre los análisis que haya que efectuar.

Los valores límite de concentración de metales presentados en esta directiva, son más bajos a los límites especificados en las directivas de algunos de los países miembros. En Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Países Bajos y Suecia, los límites para metales pesados son más estrictos, mientras que en Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Portugal y España, los límites son prácticamente los mismos de esta directiva.



Por otro lado, las regulaciones de Francia, Italia y Luxemburgo limitan el contenido de patógenos, y las de Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Alemania y Suecia incluyen valores límite para el contenido de contaminantes de tipo orgánico, no incluidos en la directiva 86/278/CCE.

### Australia

La Principal legislación aplicable a lodos producidos en el tratamiento de agua en Australia es la ley elaborada en 1993, de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Este documento, en la sección 25, provee las pautas generales para el uso de los lodos generados por el tratamiento de aguas municipales, en particular para aplicación en suelo.

El uso del lodo está restringido de la forma siguiente:

- Los lodos no serán usados en cultivos para el consumo humano directo.
- Lodos con un nivel de cobre mayor que 750 mg/kg no se aplicarán a suelo agrícola.
- Cualquier sitio que reciba los lodos deberá asegurar un manejo correcto para reducir al mínimo cualquier impacto adverso potencial en el ambiente (incluyendo salud humana y animal).
- La EPA será reportada sobre cualquier información relevante a las consecuencias para el medio ambiente por la aplicación de lodos.
- Los lodos no deben aplicarse a menos de 50 m de áreas de vivienda o escuelas.
- Los lodos no deben aplicarse a menos de 100 m de una corriente de agua al aire libre, o de modo que sea un riesgo de contaminación de aguas subterráneas o superficiales.

Los lodos podrán aplicarse en suelos agrícolas, siempre y cuando no excedan los niveles de contaminantes (equivalente a grado B de biosólidos) mostrados en la tabla 1.10.

Tabla 1.10. Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura (EPA, 1993, Australia).

<b>Parámetro</b>	<b>Valores límite (mg/kg)</b>
Arsénico	20
Cadmio	11
Cobre	750
Níquel	145
Plomo	300
Zinc	1400
Mercurio	9



## Argentina

Con fecha 22/11/2001, el Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente de la Nación, a través de la Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental, aprobó la Resolución 97/01, a fin de reglamentar el manejo sustentable de lodos generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. Esta normativa que llena un espacio importante en las reglamentaciones ambientales argentinas permite un manejo racional de los lodos generados en las plantas de tratamiento de líquidos residuales. En particular, fija criterios y límites claros para el reúso agrícola de lodos, los cuales son concordantes con los adoptados por la Unión Europea y los Estados Unidos.

La Resolución 97/01, brinda lineamientos para regular el tratamiento, la utilización, la disposición final y el control de calidad de los lodos resultantes de las operaciones unitarias realizadas en plantas de tratamiento de efluentes domésticos, mixtos domésticos-industriales, industriales, agroindustriales y/o especiales, a fin de asegurar su gestión ambientalmente sustentable.

La Norma incluye definiciones de los términos más utilizados y la metodología establecida para el muestreo, caracterización y clasificación de los lodos. Se establecen dos categorías según superen o no el valor límite fijado para los parámetros contemplados:

- Categoría A: Lodos que cumplen con la totalidad de los valores límite establecidos para los parámetros contemplados en la tabla 1.11.
- Categoría B: Lodos en los que alguno de los parámetros supera el valor límite establecido en la tabla 1.11. Estos lodos quedan excluidos de esta norma y deben ser tratados de acuerdo a la normativa específica.

Como formas de uso y disposición final de los lodos se establecen las siguientes alternativas posibles.

Como formas de uso:

- Agrícola / Ganadero.
- Forestal.
- Recuperación de suelos degradados.
- Restauración del paisaje.
- Elaboración de abonos y enmiendas.
- Otros usos.

Para disposición final:

- Relleno sanitario en celdas separadas.
- Incorporación a relleno sanitario.
- Cobertura final de rellenos sanitarios.
- Tratamiento biológico en suelo (Landfarming).
- Termodestrucción.



La aptitud de uso y disposición final se establece de acuerdo con el tipo de lodo.

Tipo A.1: Aptos para todos los usos sin restricciones de tipo sanitario.

Tipo A.2: Aptos para todos los usos con las restricciones sanitarias establecidas.

Tipo A.3: No tienen aptitud de uso, a excepción de los usos incluidos en el punto otros usos, en tanto se asegure la estabilización adecuada de los contaminantes. Son aptos para las formas de disposición final: relleno sanitario en celdas separadas; incorporación a relleno sanitario y cobertura final de rellenos sanitarios.

Tipo A.4: No tienen aptitud de uso y pueden ser destinados a disposición final para la alternativa de tratamiento biológico en suelo (landfarming).

Tipo A.5: No tienen aptitud de uso y pueden ser destinados a disposición final para la alternativa de relleno sanitario en celdas separadas; incorporación a relleno sanitario y termodestrucción, siempre y cuando cumplan los requerimientos exigidos para esta práctica.

El Artículo 18 de esta regulación establece las restricciones para el caso de lodos que se apliquen como mejoradores de suelo, y se indica su prohibición para:

- Suelos con una permeabilidad mayor a  $10^{-3}$  cm/seg.
- Suelos con pH inferior a 6.
- Sitios donde se verifiquen procesos de afloramiento del nivel freático o de revenimiento de origen natural o derivados de actividades antropogénicas.
- Áreas cubiertas con nieve o congeladas.
- Zonas de captación de agua potable.
- Áreas ubicadas a menos de 15 metros de la ribera de cursos de agua superficiales o por debajo de la cota máxima de anegamiento para un período mínimo de 10 años de tiempo de recurrencia.
- Áreas con pendientes superiores al 15% a excepción de las correspondientes a los sitios sujetos a recuperación del paisaje y al manejo de cuencas, para los que se considera en cada caso la extensión comprometida en el proceso.
- Períodos con registro de precipitaciones extremas o intensas.
- Áreas vecinas a centros poblados o con acceso público masivo.
- Contenido de elementos traza en el suelo que supere en alguno de los parámetros los valores límite.
- Contenido de contaminantes en los lodos que supere en alguno de los parámetros los valores límite.

Por otra parte, también se establece que la cantidad de lodo aplicado al suelo, así como la oportunidad y modalidad de aplicación se calcularán considerando:

- Valor fertilizante del lodo.
- Tipo de cultivo y necesidades de los cultivos en nutrientes esenciales.
- Requerimientos de los suelos a ser mejorados y/o de los sitios a restaurar.
- Niveles de contaminantes en los lodos.
- Niveles de contaminantes presentes en el suelo previo a la aplicación de lodos.
- Características edáficas de los suelos receptores.



Los valores límite de los parámetros contaminantes contenidos en los lodos para aplicación en suelo agrícola (lodos categoría A) se presentan en la tabla 1.11.

Tabla 1.11. Condiciones para tratamiento biológico en suelos (R 97/01, según niveles guía de calidad de suelo para uso agrícola).

<b>Parámetro (*)</b>	<b>Nivel guía uso agrícola (mg / kg peso seco)</b>
Cadmio (total)	3
Cobalto	40
Cromo (total)	750
Cromo ( + 6)	8
Mercurio (total)	0,8
Níquel (total)	150
Plata (total)	20
Plomo (total)	375
Vanadio	200

**(\*) Los parámetros indicados se refieren a metales pesados y no son excluyentes de otros requerimientos que determinen la autoridad competente o disposiciones locales para este tipo de tratamiento.**

#### Sudáfrica

En Sudáfrica, en términos de la Ley Nacional del Agua (NWA, Act 36, 1998), los lodos residuales generados en la potabilización de agua, están dentro de un término general como 'residuos'. Se consideran como residuos, todos los materiales sólidos o suspendidos, disueltos o transportados en agua (incluyendo sedimentos), los cuales son descargados o depositados en suelo o en cuerpos de agua y que por su composición pueden causar contaminación. Por tal motivo, su regulación está relacionada con las encaminadas a minimizar el impacto ambiental hacia cuerpos de agua. Sin embargo, debido a las preocupaciones ambientales sobre la descarga directa a los cuerpos de agua, los lodos han sido dispuestos en rellenos sanitarios, buscando así la forma de evitar riesgos ambientales o sociales (Titshall y Hughes, 2005).

A últimas fechas se ha aplicado la utilización de los lodos en suelo agrícola, por lo que el Departamento de Recursos de Agua y Forestales ha presentado normativas para la disposición de lodo en suelo agrícola (DWAF, 1998). Las pautas actuales para la disposición de la tierra y la utilización agrícola del lodo de las aguas residuales, entre otros criterios, fijan los límites permitidos para las concentraciones de metales pesados en lodo, que son aceptables para el uso sin restricción de la región agrícola (limitado al uso de 8 ton/ha/año). En la tabla 1.12 se presenta un resumen de éstos valores, así como la cantidad de lodo que puede ser aplicado por hectárea de suelo.

El acuerdo TT 85/97 sobre la utilización y disposición de lodo residual clasifica a los lodos en tres tipos, A, B o C, en orden decreciente de acuerdo a su potencial de generación de malos olores, de emisiones y de transmisión de organismos patógenos al ambiente.





Lodos Tipo A: son inestables, con mal olor y con generación de emisiones contaminantes (químicos y biológico-infecciosos), además de un alto contenido de patógenos. En esta clasificación están los lodos crudos, lodos de digestión, de tanques sépticos y de lagunas de oxidación.

Lodos Tipo B: están estabilizados, con bajo nivel de olor y de generación de emisiones contaminantes y un insignificante contenido de patógenos. Por ejemplo, lodos de digestión anaerobia, lodos activados y humus de tanques.

Lodos Tipo C: están estabilizados, con nivel de olor mínimo y sin generación de emisiones contaminantes y un reducido contenido de patógenos. A este grupo pertenecen los lodos pasteurizados, lodos con tratamiento térmico, estabilizados con cal, lodos de composta y lodos irradiados.

Tabla 1.12. Resumen de niveles permitidos de algunos metales para un riesgo ambiental aceptable y para disposición de los mismos aplicados en suelo (Titshall y Hughes, 2005).

Elemento	Riesgo ambiental aceptable (mg/L)	Aplicación de lodos (g/ha-m)
Cd	0.031	47
Co	6.9	10 454
Cr	4.7	7121
Cu	0.1	151
Fe	9	13 636
Mn	0.3	454
Ni	1.14	1727
Pb	0.1	151
Zn	0.7	1061
(DWAF, 1998). Departamento de Recursos de Agua y Forestales		

### Canadá

Actualmente, la utilización de biosólidos en Québec se encuentra regulada por:

- Estándares canadienses (CAN/BQN) para biosólidos pelletizados,
- Criterio provisional para el uso benéfico de materiales residuales fertilizantes y,
- Ley de Fertilizantes Canadienses.

Los estándares canadienses fueron desarrollados en 2002 por el Departamento de Normalización de Québec (BQN, por sus siglas en francés) con el propósito de certificar la producción de residuos sólidos en el tratamiento de aguas municipales.

La estandarización de biosólidos en Québec se encuentra en proceso de certificación, pero estos estándares recomiendan que el total de aluminio y hierro,  $Al^{3+} + 0.5 Fe^{3+}$ , en pellets de biosólidos para aplicación de lodo no debe exceder de 100,000 mg/kg de sólido seco. Los biosólidos pelletizados con más de 75,000 mg/kg de  $Al^{3+} + 0.5 Fe^{3+}$ , no deben ser aplicados en suelo con saturación de fósforo < 5% para evitar riesgo de reducir nutrientes a los cultivos. En contraste, biosólidos con menos de 75,000 mg/kg de  $Al^{3+} + 0.5 Fe^{3+}$ , no deben ser aplicados en suelo con saturación de fósforo > 10% (>15% para vegetales) para evitar riesgo de contaminación de agua.



La aplicación de biosólidos en suelo también debe de seguir los criterios sobre Materiales Residuales Fertilizantes (MRF). Existen dos categorías para estos materiales. Clase C1, que contienen bajas concentraciones de contaminantes y presentan mínimas restricciones para su aplicación y clase C2, los cuales contienen mayor concentración de contaminantes y presentan ciertas restricciones para su uso, la tabla 1.13 muestra los valores límite de concentración de sólidos, hierro y aluminio en lodos destinados como materiales fertilizantes.

Tabla 1.13. Valores límite de concentración de sólidos, hierro y aluminio en los lodos destinados como materiales fertilizantes (CAN/BQN).

Parámetros	Valores límite MRF C1	Valores límite MRF C2
Sólidos	NA	22 mg sólido seco /ha/5 años
$Al^{3+}+0.5 Fe^{3+}$	$\leq 25000$ mg/kg sólido seco	*25000 a 50000 mg/kg sólido seco

Notas:

$Al^{3+}+0.5 Fe^{3+}$  se refiere a que 0.5 Fe es químicamente equivalente a Al, ya que el peso molecular del hierro es dos veces el del aluminio.

NA. No Aplica

\* El pH del suelo antes de aplicar el MRFC2 debe ser  $\geq 6$  para agricultura y  $\geq 5$  par otros usos.

### 1.1.5 Prácticas de Disposición Final

Recientemente, en muchas partes del mundo, debido a las preocupaciones ambientales por la descarga directa al suelo o a los cuerpos de agua, la disposición de los lodos residuales se ha realizado en rellenos sanitarios. Estos rellenos son construidos bajo estándares que limitan el contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos y que controlan el escurrimiento de lixiviados hacia suelo y agua subterránea (FWR, 1994).

La Directiva Europea de regulación de rellenos sanitarios presenta tres tipos de sitios, para materiales: Inertes o tipo I, no peligrosos o tipo II y peligrosos. Las características de peligrosidad van a depender de lo reportado por la Agencia Ambiental Europea (2002).

Todos los materiales que no se consideren inertes y que vayan a ser dispuestos en rellenos sanitarios deben de someterse a una prueba de elusión para determinar la concentración de contaminantes que pudieran presentarse en los lixiviados (Goldbold, *et al.*, 2003). Los valores límite para aceptación de residuos en rellenos sanitarios están basados en la composición orgánica (carbono orgánico total, PCB's totales y compuestos BTEX) y por la elusión de varios componentes inorgánicos (metales, aniones e índice de fenol) presentados en la Norma Europea EN 12457-3. Estos valores se muestran en la tabla 1.14.



Tabla 1.14 Valores límite de contaminantes en lixiviados para disposición en rellenos sanitarios de materiales no peligrosos (EN 12457-3, 2002).

Parámetro	Valor límite (mg/Kg)	
	L/S = 21 Kg <sup>-1</sup>	L/S = 101 Kg <sup>-1</sup>
As (Arsénico)	0.1	0.5
Ba (Bario)	7	20
Cd (Cadmio)	0.03	0.04
Cr (Cromo) (total)	0.2	0.5
Cu (Cobre)	0.9	0.2
Hg (Mercurio)	0.003	0.01
Mo (Molibdeno)	0.3	0.5
Ni (Níquel)	0.2	0.4
Pb (Plomo)	0.2	0.5
Sb (Antimonio)	0.02	0.06
Se (Selenio)	0.06	0.1
Zn (Zinc)	2	4
Cloro (Cl)	550	800
Flúor (F)	4	10
SO <sub>4</sub> (Sulfatos)	560	1000
SDT (Sólidos Disueltos Totales)	2500	4000
Índice de Fenol	0.47	1
Carbono Orgánico Disuelto ( a pH 7)	240	500
COT (Carbono Orgánico Total)	≤3000	
BTEX	6	
Aceites Minerales C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub>	500	

L/S= relación líquido sólido

Además del relleno sanitario, en algunos países se sigue realizando la práctica de descarga en cuerpos de agua. Las disposiciones en esta materia se muestran a continuación:

En Europa, la Foundation Water Research (FWR) ha reportado las prácticas actuales y futuras en materia de disposición y uso de los lodos de plantas potabilizadoras en países como Francia, Alemania, Suiza y Países Bajos. Este reporte presenta las siguientes conclusiones:

- El control en las descargas de lodos a las aguas superficiales incluyen un límite de 30 mg/L para los sólidos suspendidos totales, excepto en Suiza donde el límite es 20 mg/L.
- La descarga de los lodos producidos por el tratamiento de agua a la alcantarilla se permite generalmente con el acuerdo de la autoridad correspondiente, pero con límites para ciertos parámetros que hacen necesario un pretratamiento del lodo.
- La disposición de los lodos producidos por el tratamiento de agua al terraplén o relleno está bajo revisión en Francia, ya que se trata de eliminar esta alternativa; en Alemania, el contenido orgánico debe ser menor al 1% como COT o del 3% como sólidos suspendidos volátiles para los terraplenes de la clase I y menos del 3% de COT o del 5% de sólidos suspendidos volátiles para los terraplenes de la



clase II, mientras que en los Países Bajos se deben controlar las características de los lixiviados, la densidad del lodo y el esfuerzo cortante.

- Algunas aguas subterráneas y aguas superficiales en los Países Bajos tienen niveles suficientemente altos del arsénico que causan que el lodo producido durante el tratamiento se clasifique como residuo químico.
- En España, las legislaciones medioambientales no permiten el vertido de los lodos de las plantas de tratamiento al medio acuático con concentraciones de sólidos en suspensión superiores a los 80 mg/L (Real Decreto, 849/86).

En México, la NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites de contaminantes contenidos en agua residual para descarga en ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras y humedales naturales. El límite de sólidos suspendidos totales para descarga en ríos, asegurando la protección de vida acuática, es de 60 mg/L, de 125 mg/L para ríos con uso público urbano y de 200 mg/L para descarga en ríos con uso en riego agrícola (promedios diarios).

### 1.1.6 Tratamiento y disposición final

#### Tratamiento

El agua es el principal componente de los lodos (90-95%) y el tratamiento de los mismos consiste en reducir su volumen a través de la eliminación del agua y el aumento en la concentración de sólidos para hacerlos más accesibles para su manejo y transporte (Múgica, 1996).

Para lograr este objetivo es necesaria una correcta operación en el manejo de lodos siguiendo una serie de pasos que van desde la evacuación del lodo del sedimentador hasta el transporte a su disposición final. El primer paso es distinguir el tipo de lodo y sus características de acuerdo a la siguiente lista (RAS, 2000):

- Lodos líquidos que involucran el agua de arrastre.
- Lodos concentrados a los que se les ha retirado, por sedimentación u otra operación similar, gran parte del agua de arrastre.
- Lodos solidificados que son los mismos concentrados pero que se les ha extraído aún más la humedad al grado de dejarlos manejables y transportables en estado semisólido en filtros prensa.

Se debe considerar que en total el flujo de lodos no debe ser mayor en promedio, del 5% del caudal total tratado, tomando en cuenta la siguiente estimación: los sedimentadores producen entre el 2 y el 4% del caudal y los filtros entre el 1 y 2 % del mismo. La concentración del lodo líquido debe permitir reducir su volumen del 3 al 25% como se observa en la tabla 1.15.

Tabla 1.15. Porcentaje de reducción del volumen de diferentes tipos de lodos.

Tipo	% de volumen a reducir
Lodos de sedimentación por coagulación con sulfato de aluminio	3.0-8.0
Lodos de sedimentación por coagulación con hierro	12-21
Lavado con coagulación con aluminio y cal	4.0 a 10
Lavado con coagulación por hierro y cal	5
Lavado con coagulación por hierro solo	5.0 a 9.0
Lodos de ablandamiento	15-25



La integración de procesos de tratamiento y disposición para lodos depende de las características fisicoquímicas, procedencia y cantidad de sólidos presentes en el lodo, así como de la forma de disposición final. Entre los principales componentes de los procesos de tratamiento de lodos fisicoquímicos se encuentran:

- Espesamiento.
- Deshidratación.
- Almacenamiento.
- Disposición final.

El espesamiento es un proceso que se emplea para aumentar el contenido de sólidos en los lodos por eliminación de parte de la fracción líquida. Es una operación necesaria para procesos de tratamiento posteriores a la misma. Los métodos más comunes para el espesamiento de lodos son el espesamiento por gravedad y por flotación.

### **Disposición final**

La disposición final del lodo del tratamiento de agua refiere dos técnicas:

1. Relleno sanitario.
2. Aplicación en suelo.

La determinación del tipo de método de disposición usado va a depender de las características de los lodos, la legislación aplicable y los costos.

## **1.2 Panorama general de opciones de aprovechamiento y utilización de lodos**

La utilización de nuevas y mejoradas tecnologías para el tratamiento de agua que tienen como objetivo proporcionar agua de acuerdo con la normatividad ambiental vigente a nivel nacional e internacional ha ocasionado que la cantidad de lodos de desecho producidos sea cada vez mayor. Asimismo, las limitaciones legales, la localización de la planta de tratamiento y el alza en los costos por manejo y disposición ha llevado a buscar alternativas técnica y económicamente viables para la utilización de los lodos de una forma segura (Armenter, *et al.*, 2002).

El aprovechamiento de los lodos implica su uso en cualquier actividad que represente un beneficio. El uso de lodos como mejoradores o acondicionadores de los suelos aplicados a terrenos agrícolas es una alternativa que ha tomado gran importancia, sin embargo, los lodos de plantas potabilizadoras contienen altas concentraciones de aluminio el cual tiene la propiedad de fijar el fósforo en el suelo, evitando que sea aprovechado por las plantas y ocasionando disminución en la producción agrícola, por lo que no es considerada como una opción viable (Dillion, 1997).

Se han abierto líneas de investigación enfocadas a la utilización de los lodos con altas concentraciones de aluminio aprovechando sus propiedades y características para ser incorporado como materia prima en la manufactura de diferentes materiales o para su aplicación en suelo. Las alternativas que principalmente se mencionan son (Armenter, *et al.*, 2002):



- Envío de los lodos a disposición controlada después de su deshidratación (60-70% de humedad).
- Utilización de los lodos como mejoradores o acondicionadores de suelo agrícola.
- Utilización de los lodos para la fabricación de material cerámico de construcción, según proceso de elaboración convencional (mezcla, extrusión, conformado, secado y cocción).
- Utilización de los lodos como agentes floculantes en el tratamiento de aguas residuales, para aprovechar su alto contenido en aluminio.
- Utilización de los lodos para la producción de granulado cerámico mediante procesos de secado.
- Utilización de los lodos con alto contenido de alúmina para producir materiales adsorbentes o bases de soporte para catalizadores.

Las ventajas que se desprenden de estas alternativas son (Arteaga y Cusidó Fabregas, 1998):

- Valorización de los lodos generados en las plantas de tratamiento al ser incluidos como materia prima en procesos industriales.
- Reducción de espacios destinados al almacenamiento de lodos, así como el ahorro en el manejo y transporte de los mismos.
- Preservación de espacios destinados a relleno de lodos.
- Obtención de un producto con importante valor añadido.

### **1.2.1 Tendencias de aprovechamiento en diferentes países**

En la actualidad se han encontrado gran variedad de aplicaciones para el aprovechamiento de lodos provenientes de diferentes fuentes. Particularmente, para el caso de los lodos de las plantas de tratamiento de agua se ha observado que, con base en las necesidades de cada lugar, se sigue una tendencia hacia una línea de investigación en particular.

Por ejemplo, en países europeos como Reino Unido, España y Portugal se han reportado casos de utilización de los lodos producidos en plantas potabilizadoras para producir básicamente materiales cerámicos, cemento y ladrillos. Estas técnicas incluyen el uso del lodo deshidratado, secado y en algunos casos de lodo incinerado.

En Francia se consideran como principales opciones la aplicación en suelos agrícolas y el vertido en suelo para ser reincorporado como medio natural. La aplicación de lodos como materia prima para elaboración de cemento no se considera muy viable debido a que el contenido de materia orgánica presente en el lodo puede afectar las características del producto final (Adler, 2002).

La producción, tratamiento y la disposición de los lodos producidos por el tratamiento de agua se está repasando a nivel planta en Alemania; el objetivo es evitar la producción del lodo en lo posible y fomentar la utilización y la disposición segura de



estos residuos. Los métodos potenciales para reducir el volumen de lodos producidos incluyen la adopción de las técnicas tales como filtración de membrana que evitan adición de coagulantes químicos.

En Alemania y los Países Bajos se realizan investigaciones para la aplicación de los lodos. El lodo puede tener usos benéficos en el tratamiento de aguas residuales, incluyendo la supresión de la formación del sulfuro del hidrógeno y el retiro de fosfatos de la solución. También existe el interés en la aplicación de lodo en agricultura o silvicultura, aunque existen desventajas potenciales en la fijación de fósforo y lixiviación de contaminantes en el suelo (WRC, 1984).

La utilización de los lodos producidos por el tratamiento de agua se ha expandido; en el caso de los lodos férricos en la industria del cemento y del ladrillo, para los lodos de ablandamiento como acondicionador del suelo, alimento para pollos y material de relleno.

En Estados Unidos y Canadá los estudios se han enfocado en mayor grado a la recuperación de metales de los lodos y a la aplicación de lodos deshidratados como mejoradores de suelo en zonas agrícolas y para restauración de áreas erosionadas (Dayton y Basta, 2001; Meunier, *et al.*, 2002; MENV, 2003).

En Australia Occidental, los lodos producidos en las plantas de potabilización de agua son aplicados en suelos forestales como amortiguadores de fuego. El aluminio del lodo no permite el crecimiento de hierbas indeseadas que a la larga pudieran contribuir a los incendios forestales (water-corporation, Australia).

En Japón se ha estudiado la efectividad de recircular el lodo de las plantas potabilizadoras que utilizan policloruro de aluminio (PAC) como coagulante, mediante un proceso térmico y activación con ácido clorhídrico con la finalidad de recuperar el PAC y reutilizarlo en la coagulación (Ebie, *et al.*, 2000).

En México se realizó un estudio sobre la estabilización de residuos con arsénico mediante el proceso de fijación química y solidificación, empleando cemento como el principal agente en la estabilización de residuos peligrosos a través de los procesos ya mencionados y empleando la tecnología de fabricación de tabicones para estabilizar los residuos. Obteniendo como resultado que es factible el uso de la tecnología de fijación química y solidificación, a través de la fabricación de tabicones para el tratamiento de residuos con arsénico.

Estas tendencias se presentan resumidas en la tabla 1.16.



Tabla 1.16. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países.

Tipo de aplicación	País	Referencia
Elaboración de cemento	Singapur	Tay y Show, (1991) y Tay, <i>et al.</i> , (2002), utilizaron lodo deshidratado mezclado con cal y arcillas para producir cemento. El máximo porcentaje de lodo utilizado para mezclar con arcilla y obtener materiales de construcción de buena calidad es de 40% en peso.
	Japón	Onaka, (2000), reportó que el lodo seco y fragmentado puede utilizarse como materia prima en la producción del cemento Pórtland sin producir mal olor ni emisiones de polvo.
	Taiwán	Pan, <i>et al.</i> , (2004), elaboraron clinker de cemento a partir de los lodos deshidratados producidos en la planta de tratamiento Zhi-Tan, localizada al norte de Taiwán.
	España	Cano, <i>et al.</i> , (2000), estudió la obtención de un material llamado PAVAL, producido en los procesos de reciclaje del aluminio. Este material está compuesto básicamente por óxido de aluminio y puede ser utilizado en la producción de concreto y morteros. Los lodos de las plantas potabilizadoras contienen altas concentraciones de óxidos de aluminio y menos impurezas que el PAVAL, por lo que podrían emplearse para el mismo fin.
	Reino Unido	Goldbold, <i>et al.</i> , (2003), determinaron que los lodos fisicoquímicos con mayor contenido de aluminio y altas concentraciones de sólidos presentan un potencial mayor para la elaboración de cemento, mientras que aquellos que contienen grandes cantidades de hierro son mejores en la elaboración de ladrillos.
	Portugal	Goncalves, <i>et al.</i> , (2004), presentaron un estudio sobre la incorporación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable en Portugal, como aditivo en la elaboración de cemento de tipo mortero. Los lodos están compuestos principalmente por hidróxido de calcio, óxidos de aluminio, sílice, óxidos de hierro y aproximadamente 6% de materia orgánica. Este estudio reporta que los lodos secados a temperaturas entre 105°C y 700 °C pueden ser mezclados con el cemento tradicional para la elaboración del mortero.
	Colombia	Un grupo de investigación de la Universidad del Valle en Cali, utilizó lodos de las plantas de tratamiento de agua para evaluar su potencial como cementante. El lodo fue calcinado, molido y mezclado con cal, dando como resultado un cemento con la calidad del fabricado tradicionalmente (Salazar, A. 2003).





Tabla 1.16. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países (continuación).

Tipo de aplicación	País	Referencia
<b>Elaboración de ladrillos</b>	Reino Unido	Anderson, (2003), realizó un estudio sobre la viabilidad de obtener ladrillos con un alto contenido de ceniza incinerada del lodo de aguas residuales tratadas.
	Reino Unido	Un estudio llevado a cabo por WRc (Dillion, <i>et al.</i> , 1997) muestra el potencial que resulta al incorporar lodos provenientes de coagulantes de sales de aluminio y sales férricas en procesos de manufactura de cemento y ladrillo. Se menciona que como materia prima, las compañías productoras de estos materiales podrían utilizar alrededor de 1000 – 10000 toneladas por año de lodos (base seca).
	España	Elías, (2000), reportó que el lodo de las estaciones depuradoras de aguas residuales es el mejor ejemplo para la fabricación de matrices cerámicas porosas, por ejemplo, la fabricación del Ecobrick.
	Taiwán	Huang y Pan, (2001), evaluaron el efecto de secado de lodos de potabilizadoras a diferentes temperaturas para elaborar ladrillo. Los resultados mostraron que, debido a que el lodo posee bajas concentraciones de materia orgánica, un secado a 105°C es suficiente para ser incorporado como materia prima en la fabricación de ladrillos, sin necesidad de calcinación.
<b>Elaboración de cerámicos</b>	España	Armenter, <i>et al.</i> , (2000), presentaron un estudio sobre la incorporación de una fase de secado por atomización, de los lodos previamente espesados y deshidratados de la planta de tratamiento de Sant Joan Despí, en donde el producto seco obtenido es un polvo cerámico con una humedad entre el 3 y el 5% y un 13% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> que puede ser comercializado para la elaboración de cerámica de calidad.
	Portugal	Ferreira y Olhero, (2002), recuperaron los lodos ricos en aluminio (24 % de Al) de las unidades de tratamiento de agua de plantas industriales de anodizado para considerarlos como materia prima de cerámicos de alta alúmina. El tratamiento de recuperación consiste en la calcinación y lavado de las sales solubles, seguido de la remoción de sulfatos por precipitación como BaSO <sub>4</sub> . Los lodos calcinados y lavados pueden ser fácilmente dispersados y usados para producir cerámicos de alta alúmina.
<b>Aplicación en suelo</b>	Francia	En Francia se consideran como principales opciones la aplicación en suelos agrícolas y el vertido en suelo para ser reincorporado como medio natural (Adler, 2002).



Tabla 1.16. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países (continuación).

Tipo de aplicación	País	Referencia
Aplicación en suelo	Australia	Los lodos producidos en las plantas de potabilización de agua fueron aplicados alrededor de las plantaciones de pino como amortiguadores de fuego. El aluminio en el lodo no permite el crecimiento de mala hierba y de vegetación, por consiguiente, minimiza el riesgo de incendios forestales y el uso de maquinaria para controlar el fuego (www.watercorporation.com.au).
	Canadá	El Ministerio de Medio Ambiente y la Dirección del Sector Agrícola de Québec reportan el uso benéfico en agricultura de biosólidos con contenido de aluminio. En este estudio se presentan los criterios y recomendaciones para la aplicación de estos materiales en suelo (MENV, 2003).
	Canadá	La recuperación de metales depositados en los lodos residuales de las plantas de tratamiento, mediante diferentes procesos es utilizada para remover contaminantes del suelo y posteriormente ser aplicado al suelo, como relleno de áreas erosionadas o dependiendo de su composición orgánica como mejoradores de suelo (Meunier, <i>et al.</i> , 2002).
	Sudáfrica	Titshall y Hughes, (2005), realizaron la caracterización fisicoquímica de los lodos producidos en 6 plantas potabilizadoras con la finalidad de determinar si cuentan con las características para ser aplicados en suelos agrícolas o en actividades de tipo industrial.
	Estados Unidos	Los lodos con contenido de hidróxidos de aluminio y de cal son aplicados a suelos con exceso de nutrientes. El aluminio absorbe el nitrógeno y fósforo disueltos en el suelo y previene la eutroficación y crecimiento de hierbas no deseadas. (Gallimore, <i>et al.</i> , 1999).  Dayton y Basta, (2001), estudiaron las propiedades de los lodos de plantas potabilizadoras para ser aplicados como sustituto de suelo en cultivos de tomate. Los resultados mostraron que el lodo debe de contener los niveles de nutrientes adecuados y niveles bajos de fototoxicidad (NO <sub>3</sub> -N), además de presentar alta densidad.
Como adsorbente	España	Bosch F., (2002), presenta un proyecto piloto, a escala semi-industrial de valorización de lodos de aluminio para ser utilizados como adsorbente en la filtración de aguas contaminadas por boro y flúor.
Como catalizador	Rusia	Yunusov y Khudaiberganova, (1984), utilizaron el lodo recuperado de las plantas de tratamiento de agua en la manufactura del catalizador de aluminosilicato AshNTs-3, utilizado en refinerías.



Tabla 1.16. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países (continuación).

Tipo de aplicación	País	Referencia
Como coagulante	España	J. M. Bielza, (2002), realizó un estudio patentado para aprovechar los lodos de anodizado como agentes de floculación de aguas residuales y de encolado en la industria papelera. Otra posibilidad es el tratamiento de estos lodos para la obtención de productos comerciales, como sulfato o hidróxido de aluminio.
	Japón	Se ha estudiado la efectividad de recircular el lodo de las plantas potabilizadoras que utilizan policloruro de aluminio (PAC) como coagulante, mediante un proceso térmico y activación con ácido clorhídrico con la finalidad de recuperar el PAC y reutilizarlo en la coagulación (Ebie, <i>et al.</i> , 2000).
Otras aplicaciones	Rusia	Yunusov y Khudaiberganova, (1984), evaluaron como alternativa viable la utilización de los lodos del tratamiento de agua como agente químico en el tratamiento de macroemulsión de algunos residuos y de este modo reducir la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ .

De acuerdo a las tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países, el tipo de aplicación más empleado es materiales de construcción (elaboración de cemento y ladrillos) debido principalmente a la composición de los lodos.

### 1.2.2 Estudio de casos

A continuación se describen con mayor detalle los proyectos mencionados en la tabla 1.16.

#### Elaboración de productos cementantes

Tomando en cuenta que el lodo fisicoquímico de las plantas potabilizadoras es virtualmente no peligroso y la composición química es similar a la de la arcilla utilizada en la producción de cemento y material para construcción, Tay y Show (1991) utilizaron lodo deshidratado mezclado con cal y arcilla para producir cemento. Estos autores encontraron que el máximo porcentaje de lodo utilizado para mezclar con arcilla y obtener materiales de construcción de buena calidad es de 40% en peso. Onaka (2000) reportó que el lodo seco y fragmentado puede utilizarse como materia prima y combustible en la producción del cemento Portland sin producir mal olor ni emisiones de polvo.

Pan, *et al.*, (2004) elaboraron clinker de cemento a partir de los lodos producidos en la planta de tratamiento Zhi-Tan, localizada al norte de Taiwán. Los lodos utilizados son deshidratados en filtros prensa y almacenados. Estos lodos se analizaron mediante espectroscopia por fluorescencia de Rayos X y se comprobó que su composición química era similar a la de la arcilla común utilizada en la elaboración de cemento. Este estudio determinó que al agregar el lodo mezclado con arcilla en diferentes proporciones (0, 25, 50, 75 y 100%), se obtuvieron buenos resultados en la dureza, resistencia y consistencia del material.



Un estudio llevado a cabo por WRc (Dillion, *et al.*, 1996) muestra el potencial que resulta al incorporar lodos provenientes de coagulantes de sales de aluminio y sales férricas en varios procesos de manufactura en el Reino Unido tales como cemento, ladrillos, hierro y acero, cerámica y materiales refractarios. El estudio mostró un especial interés comercial en el uso de estos lodos fisicoquímicos en la manufactura de cemento y ladrillo, ya que como materia prima, las compañías productoras de estos productos podrían utilizar alrededor de 1000 – 10000 toneladas por año de estos lodos (base seca).

(Goncalves, *et al.*, 2004) presentó un estudio sobre la incorporación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable en Portugal, como aditivo en la elaboración de cemento de tipo mortero. Los lodos están compuestos principalmente por 38.3 % de hidróxido de calcio, 26% de óxidos de aluminio, 22.3% de sílice, 4.7% de óxidos de hierro y cerca del 6% de materia orgánica. Este estudio reporta que la caracterización de estos lodos es apta, de acuerdo a la ley portuguesa DL no. 152/2002 para ser depositados en rellenos sanitarios.

El lodo fue sometido a procesos de secado y calcinación a 105°C, 450 °C y 700°C donde se observó que la composición mineralógica es principalmente calcita y minerales de arcillas.

El mortero tradicional fue preparado con una mezcla de cemento:arena:agua en proporción 1:3:0.5. Para este estudio se sustituyó 20% de la masa por el lodo húmedo (75% de humedad) y por lodo seco a temperaturas entre 105°C y a 700°C. Los resultados obtenidos mostraron que al adicionar el lodo húmedo se inhibe el endurecimiento del mortero, por lo que no es recomendable para su aplicación; mientras que el uso de lodos sometidos a temperaturas mayores a 450°C incrementan el tiempo de fraguado, pero disminuyen la resistencia mecánica (Goncalves, *et al.*, 2004).

(Cano, *et al.*, 2000) estudió la obtención de un material llamado PAVAL que es producido en los procesos de reciclaje del aluminio. Este material está compuesto básicamente por óxido de aluminio y puede ser utilizado en la producción de concreto y morteros. El PAVAL puede contener algunas impurezas, como el amoníaco lo cual es un impedimento para ser utilizado en la elaboración de ladrillos refractarios, cerámicos y abrasivos. Los lodos de las plantas potabilizadoras contienen altas concentraciones de óxido de aluminio y menor cantidad de impurezas que el PAVAL, por lo que se pueden aprovechar las similitudes de estos materiales y buscar la aplicación de los lodos para el mismo fin que el PAVAL.

Estudios realizados en Colombia enfocados al diseño y elaboración de materiales de construcción ecológicos, encontraron que las cenizas volcánicas y los residuos sólidos industriales orgánicos podían ser utilizados en la producción de cementos. Bajo esta premisa, un grupo de investigadores de la Universidad del Valle y de la Corporación Construir, tomaron lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales con el objeto de evaluar su potencial como cementante. Se han desarrollado tres tecnologías para el uso de los lodos, dependiendo de su composición potencial como material cementante o por su capacidad de lixiviar o emitir sustancias contaminantes. Las tres tecnologías son:

- Conglomeración por reacciones de hidrólisis.
- Conglomeración por reacciones silico calcáreas o activación alcalina.
- Conglomeración por catálisis de la reacción de carbonatación de la cal mediante CO<sub>2</sub> en estado supercrítico.

Para utilizar la primera tecnología, es necesario definir la capacidad como conglomerante. Ello se inicia evaluando la microestructura del lodo (DRX). Si el



material posee una estructura con base en sílice y aluminio, se estudia la activación térmica entre 600 y 850°C. Así podrá trabajarse con base en la reacción de hidrólisis similar a la de los cementos Pórtland.

La segunda tecnología, plantea atacar la sílice del material utilizando hidróxido de calcio. La reacción se acelera con sustancias como el sulfato de sodio, el cloruro de calcio, en proporciones menores al 5%.

Para trabajar los lodos con la última tecnología, estos se secan y se les elimina la materia orgánica, a una temperatura no mayor a 300°C.

En todos los casos, lo que se produce es un nuevo material de alta resistencia y con una característica importante como es la impermeabilidad, lo cual permite que los metales pesados o sustancias lixiviables queden “encapsuladas” y no salgan al contacto con el agua (Salazar A., 2003).

En Francia, la aplicación de lodos como materia prima para elaboración de materiales de construcción no se considera muy viable debido a que el contenido de materia orgánica presente en el lodo puede afectar las características del producto final (Adler, 2002).

#### Elaboración de ladrillos

El proceso de incineración de los lodos producidos en el tratamiento de agua es una opción ampliamente usada en Europa. Con este proceso, 75m<sup>3</sup> del lodo líquido puede reducirse aproximadamente a 1m<sup>3</sup> de ceniza incinerada. Diez incineradores con tecnología de estrato fluidificado están en operación en varias partes del Reino Unido y actualmente entre todos producen cerca de 90,000 toneladas de cenizas por año. La ceniza de lodos se puede describir como polvo estéril, inodoro y de flujo libre y a pesar de que se ha reducido en gran parte su volumen del estado original, la ceniza resultante también presenta problemas de la disposición. Cuando la ceniza se consigna al llenado de terraplenes, los metales presentes se disuelven fácilmente en la solución acuosa y pueden alcanzar niveles de hasta 2-3 veces más por encima del contenido normal en el suelo (EPA, 1979). Por tal motivo estos residuos pueden clasificarse como peligrosos y que deben ser consignados a sitios apropiadamente señalados del terraplén, equipados especialmente para ocuparse de dichos materiales. Esto es una solución costosa y ambientalmente insatisfactoria de la disposición para este subproducto. Sobre esta base, Anderson (2003) y Dillion (1997) han presentado estudios sobre la viabilidad de obtener ladrillos con un alto contenido de ceniza incinerada del lodo de aguas residuales tratadas en plantas del Reino Unido.

En el estudio realizado por Anderson, se utilizaron diferentes porcentajes de lodo incinerado mezclado con arcilla en porcentajes de 5 a 30% en peso. Estos porcentajes variaron dependiendo de la naturaleza de las materias primas utilizadas en la fabricación de ladrillos. Los productos experimentales fueron enviados a las fábricas para cocer en hornos junto a ladrillos normales y los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Goldbold, *et al.*, (2003), hace un análisis sobre diferentes clases de residuos generados en el tratamiento de agua y la viabilidad de cada uno de ellos para producir materiales de construcción como cemento y ladrillos. Como resultado de este estudio menciona que los lodos fisicoquímicos con mayor contenido de aluminio y altas concentraciones de sólidos presentan un potencial mayor para la elaboración de cemento. Mientras que el uso del lodo del coagulante con mayor concentración de hierro es considerado más factible como materia prima en la elaboración de ladrillos.



Elías, (2000) reporta que el lodo generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales puede utilizarse para la fabricación de matrices cerámicas porosas, por ejemplo, la fabricación del ecobrick. Este lodo contiene un 70% de humedad y la parte seca esta compuesta por una fracción orgánica y otra inorgánica que depende del proceso de tratamiento al que fue sometida. Este autor menciona que el uso directo del lodo en la industria cerámica de la fabricación de ecobricks, presenta ciertos problemas técnicos, para evitarlos, los lodos se mezclan con residuos forestales que absorben parte de la humedad, provocando que la amalgama sea menos plástica y se pueda mezclar directamente con arcilla.

Durante la cocción los compuestos orgánicos del lodo (celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc.) se destruyen y en su lugar se crean poros cerrados que dan lugar a propiedades térmicas. Los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales pesados, etc.), quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y por tanto inertizados. El proceso también se puede llevar a cabo a partir de lodo deshidratado.

Esta tecnología es extrapolable a un sinnfín de residuos de características similares. Si su composición es mayoritariamente orgánica dará lugar a materiales porosos. Si el lodo es inorgánico el resultado será un material con propiedades similares a la propia arcilla.

### Elaboración de cerámicos

Desde 1995, la Planta de Tratamiento de Sant Joan Despí en Barcelona ha incorporado una fase de secado de los lodos previamente espesados y deshidratados, mediante un proceso de atomización en donde el producto seco obtenido es un polvo cerámico con una humedad entre el 3 y el 5% y puede ser comercializado en el mercado de elaboración de cerámica de calidad.

El polvo cerámico obtenido tiene textura de flóculos de aspecto esférico y color café claro, de fácil manipulación y dosificación. Los análisis realizados al producto presentan las siguientes características:

- Sequedad final: 93-95%.
- Granulometría: entre 50 y 150  $\mu\text{m}$ .
- Composición principal:

SiO <sub>2</sub>	50 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 %
CaO	14 %
Materia orgánica	10 %
K <sub>2</sub> O	3 %

Como aspectos negativos, cabe mencionar la presencia de residuos carbonosos de gran tamaño (300  $\mu\text{m}$ ), en una concentración de 1% aproximadamente; y también la posible variabilidad estacional en la composición del producto. La composición granulométrica en cuanto a las fracciones de arcilla, limo y arena, no es todo lo equilibrada que cabría para la obtención de pastas cerámicas compactas. También hay que tener en cuenta que la práctica totalidad del polvo presenta un diámetro de grano por debajo de las 200  $\mu\text{m}$ , tamaño excesivamente fino, que puede favorecer la oclusión de aire y dificultar la expulsión de éste en el molde durante el proceso de prensado.

Las aplicaciones potenciales del producto atomizado se encuentran en la cerámica de vía seca o de revestimiento, donde puede ser utilizado como base para la aplicación de piezas alicatadas (Armenter, *et al.*, 2000).



En Portugal, Ferreira y Olhero (2002) recuperaron los lodos ricos en aluminio (24 % de Al) producidos en las unidades de tratamiento de agua de plantas industriales de aislantes anódicos con el propósito de considerarlos como materia prima para cerámicos de alta alúmina. Estos residuos industriales usualmente contienen cantidades significativas de sales solubles como sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca) y sulfatos de aluminio que constituyen un problema para un reciclado directo. La remoción de estas sales a través de lavado es inefectiva debido a su consistencia parecida a un gel. El tratamiento de recuperación consiste en la calcinación y lavado de las sales solubles, seguido de la remoción de sulfatos por precipitación como  $\text{BaSO}_4$ , adicionando una solución de  $\text{BaCl}_2$ . Los polvos lavados pueden ser fácilmente dispersados y usados para producir cerámicos de alta alúmina.

### Aplicación en suelos

La aplicación de los lodos residuales recuperados de las plantas de tratamiento como mejoradores de suelo es una alternativa viable siempre y cuando cumplan con los límites en el contenido de nitrógeno, fósforo, calcio, metales pesados y agentes patógenos. Adler (2002), presenta un estudio acerca de los lodos recuperados de sedimentadores en Francia y considera que una de las principales aplicaciones puede ser en suelos agrícolas y el vertido en suelo para ser reincorporado como medio natural.

En Canadá se han recuperado los metales depositados en los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales, mediante diferentes procesos como la precipitación selectiva, precipitación con cal y procesos de oxidación. Los lodos libres de metales son aplicados al suelo, para rellenar áreas erosionadas o dependiendo de su composición orgánica como mejoradores de suelo. Esta es una opción que podría estudiarse para los lodos de las plantas potabilizadoras (Meunier, *et al.*, 2002).

En Estados Unidos, el uso excesivo de abonos y fertilizantes de tipo orgánico han ocasionado que el suelo presente exceso de nutrientes en cuanto a requerimientos de nitrógeno y fósforo, esto ocasiona problemas de eutroficación y crecimiento de hierbas no deseadas. Existen fertilizantes de bajo costo que incrementan la concentración de fósforo y nitrógeno y son aplicados frecuentemente a los campos de cultivo y de pastoreo. Algunas prácticas de manejo en la agricultura recomiendan mezclar estos fertilizantes con calcio, aluminio o hierro para reducir la cantidad de estos nutrientes.

La mezcla con aluminio puede reducir el fósforo soluble de 90 a 10 mg de P/L, mientras que el tratamiento con  $\text{FeSO}_4$  reduce de 90 a 20 mg de P/L. Gallimore, *et al.*, (1999), realizaron un estudio en Oklahoma, USA., para determinar la habilidad de los lodos con contenido de hidróxidos de aluminio y de cal para ser aplicados a suelos con exceso de nutrientes y evaluar el impacto asociado con este uso.

Dayton y Basta (2001) estudiaron las propiedades de diecisiete muestras de lodos de plantas potabilizadoras para ser aplicados como sustituto de suelo en cultivos de tomate. Los resultados mostraron que las propiedades físicas del lodo son adecuadas para el crecimiento de cultivos, siempre y cuando el lodo contenga los niveles de nutrientes adecuados y niveles bajos de fototoxicidad ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), además de presentar alta densidad.

En Australia Occidental los lodos producidos en las plantas de potabilización de agua son aplicados alrededor de las plantaciones de pino como amortiguadores de fuego. El aluminio en el lodo no permite la fijación del fósforo en el mismo, inhibiendo el crecimiento de hierbas no deseadas y por consiguiente minimiza el riesgo de incendios forestales producidos en las temporadas calurosas en esta zona.



En Québec, Canadá, se ha investigado la aplicación de lodos del tratamiento de agua con contenido de hierro y aluminio. Estos residuos contienen óxidos amorfos que al ser aplicados en el suelo pueden contribuir a disminuir el exceso de nutrientes como el fósforo. En este estudio se presentan los criterios para la aplicación de estos lodos como materiales fertilizantes y se analizan los efectos en el suelo para un crecimiento adecuado de cultivos y para minimizar riesgos (MENV, 2003).

En Sudáfrica, Titshall y Hughes (2005), realizaron la caracterización fisicoquímica de los lodos producidos en 6 plantas potabilizadoras con la finalidad de determinar si cuentan con las características para ser aplicados en suelos agrícolas o en actividades de tipo industrial.

En Alemania y los Países Bajos existe el interés en la aplicación de lodo en agricultura o silvicultura, aunque existen desventajas potenciales en la fijación de fósforo y lixiviación de contaminantes en el suelo. El potencial para la utilización de lodos de ablandamiento es alto. En Países Bajos la pelletización ha permitido su utilización como acondicionador del suelo y alimentación de pollo (WRF, 1994).

#### Elaboración de adsorbentes

Bosch (2002) presenta un proyecto piloto a escala semi-industrial que tiene como objetivo la valorización de las arenas de fundición y los lodos de aluminio generados en empresas de anodizado. La valorización consiste en la utilización de estos residuos como soporte sólido para la filtración de aguas contaminadas con boro y flúor. Para el desarrollo de este proyecto se utiliza la técnica de adsorción directa de los contaminantes sobre los residuos valorizados.

#### Elaboración de catalizadores

Yunusov y Khudaiberganova (1984) utilizaron el lodo recuperado de las plantas de tratamiento de agua en la manufactura del catalizador de aluminosilicato AshNTs-3, utilizado en refinerías. Los lodos utilizados fueron obtenidos de un tratamiento con sulfato de aluminio y poliacrilamida y fueron deshidratados en filtros a presión. El contenido de estos lodos analizado por Rayos X, muestra que el principal componente de estos lodos es la sílice en forma de cuarzo y después de analizar su densidad, superficie de contacto, actividad de la mezcla con respecto a diferentes óxidos y la fuerza de compresión se llegó al resultado de que el lodo es técnicamente viable para ser reutilizado como catalizador.

#### Recuperación como coagulante

En Japón se ha estudiado la recirculación de lodo de las plantas potabilizadoras que utilizan policloruro de aluminio (PAC) como coagulante, mediante un proceso térmico y activación con ácido clorhídrico con la finalidad de recuperar el PAC y reutilizarlo en la coagulación (Ebie, *et al.*, 2000). Los resultados indicaron que el PAC reciclado está compuesto por dos clases de complejos de aluminio a pH=3 y mostró buenas propiedades como coagulante en un rango de pH de 3 - 4.

En España, los lodos de neutralización son los principales contaminantes que se producen en las plantas de anodizado. Estos lodos se producen en la etapa de neutralización de las corrientes ácidas y básicas que se producen en los diferentes tratamientos. Un estudio patentado por J. M. Bielza (2002), ha comprobado la utilidad de estos residuos como agentes de floculación de aguas residuales y de encolado en la industria papelera. Además plantea otra posibilidad en el tratamiento de estos lodos para la obtención de productos comerciales, como sulfato o hidróxido de aluminio. Asimismo, para minimizar la producción de lodos, se ha estudiado la modificación del





proceso de neutralización y el aprovechamiento de las corrientes alcalinas para la obtención de zeolitas de uso en detergentes. El proceso e instalación para un tratamiento integrado del concentrado residual de las soluciones que resultan de la anodización del aluminio, emplea sosa cáustica en el proceso de decapado y ácido sulfúrico en el baño de anodización, reduciéndose la generación de lodos.

En Alemania y los Países Bajos se han puesto en marcha planes para disminuir la producción de lodo y se han realizado investigaciones para la aplicación de los lodos en el tratamiento de aguas residuales, como coagulante químico y para la supresión de la formación del sulfuro del hidrógeno y el retiro de fosfatos de la solución (WRC, 1984).

#### Otras aplicaciones

Yunusov y Khudaiberganova (1984) mencionan como alternativa viable la utilización de los lodos del tratamiento de agua como agente químico en el tratamiento de macroemulsiones de algunos residuos y para reducir la dosis del coagulante  $Al_2(SO_4)_3$ .

### **1.3 Generalidades de materiales cementantes para elaborar productos de la construcción**

La industria de la construcción en México registra un crecimiento acumulado de más de 9% en los últimos cuatro años y se considera que las condiciones favorables para el sector de la construcción seguirán presentes los próximos años, debido al déficit en infraestructura y vivienda que persiste en nuestro país (INEGI, 2005). Este crecimiento se ve reflejado en un incremento de la demanda de materiales como: ladrillos diversos, varilla corrugada, estructuras metálicas, yeso, tubos y láminas de hierro y acero, cemento, ladrillos refractarios, perfiles de aluminio, tubos de PVC y concreto premezclado. Particularmente la industria del cemento y el concreto, que en los últimos 10 años ha aumentado su actividad más de 100%, espera que la industria del concreto premezclado, produzca en el 2005 entre 20 y 22 millones de metros cúbicos (IMCYC, 2005).

Algunos materiales usados en la construcción como es el caso del cemento y los ladrillos, tienen como base para su fabricación la arcilla y compuestos con contenido de óxidos de aluminio, razón por la cual son de interés en este estudio. A continuación se mencionan las principales características de estos materiales.

#### **1.3.1 Definición y tipos**

Existen diferentes materiales utilizados en el ramo de la construcción. Para este estudio son de particular interés los materiales cementantes para elaborar ladrillos y tabicones, los cuales se definen a continuación:

##### Materiales cementantes

Son aglomerantes que tienen las propiedades de adherencia y cohesión requeridas para unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida continua, de resistencia y durabilidad adecuadas (A. Neville, 1983).



Existen tres tipos de materiales cementantes que son:

- Grises: también llamados Pórtland.

Los cementos grises son conglomerantes hidráulicos que amasados con agua fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergidos en agua. Los tipos de cemento de acuerdo a sus componentes son: el cemento Pórtland ordinario (CPO), cemento Pórtland puzolánico (CPP), cemento Pórtland compuesto (CPC)

- Blancos: también llamados Pórtland blancos.

Es una variedad de cemento que se fabrica prácticamente con materias primas que no contengan hierro u otros materiales que le proporcionen color. Sus ingredientes básicos son la piedra caliza, base de todos los cementos, el caolín (una arcilla blanca que contiene mucha alúmina) y yeso. Los tipos de cementos blancos según el porcentaje de adición son: cemento Pórtland normal (CPN), cemento Pórtland fillerizado (CPF), cemento Pórtland compuesto (CPC), cemento Pórtland puzolánico (CPP).

- Morteros: también llamado cemento de albañilería.

La Norma N-CMT-2-01-004/02 define a los morteros como mezclas plásticas aglomerantes que resultan de combinar arena y agua con uno o dos materiales cementantes, que pueden ser cemento Pórtland, cemento Pórtland y cal, cemento Pórtland y cemento de albañilería (cementante premezclado que contiene cemento Pórtland, cal y aditivos plastificadores).

Existen tres tipos de morteros:

- El primero se compone de una mezcla de cemento y arena,
- El mortero de cal,
- El mortero mixto.

Existen diferentes tipos de materiales para la construcción elaborados a base de materiales cementantes, entre ellos se encuentran:

#### Ladrillos y tabicones

Adobe: se define el adobe como un ladrillo macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos.

Adobe estabilizado: adobe en el que se han incorporado otros materiales (cemento, cal, etc.) con el fin de mejorar sus condiciones de resistencia a la compresión y estabilidad ante la presencia de humedad.

Tabicón: la norma NMX-C-404-1997-ONNCCE define tabicón como un componente para uso estructural de forma rectangular fabricado de concreto u otros materiales.

Existen cuatro tipos de tabicones en base a su composición:

- Grava-cemento.
- Arena-cemento.
- Tepojal-cemento.
- Otros.



Concreto: es la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.

Los concretos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Concreto de alto comportamiento.
- Concreto arquitectónico.
- Concreto por su peso volumétrico.
- Concreto por su resistencia.
- Concreto por su consistencia.
- Concreto por su estructura.

### 1.3.2 Procesos de fabricación de productos elaborados con materiales cementantes

#### Adobes

El proceso de producción de adobes o ladrillos de arcilla sin hornear inicia con la selección correcta del suelo, un suelo que no debe contener arcilla pura, si no también arena en un intervalo de 40 a 60%. Se mezcla el suelo con agua y se deja por tres días para lograr la fermentación adecuada y entonces se fabrican algunos adobes para pruebas. En la mayoría de los casos se añade fibra natural (paja) para obtener mejores resultados. Si los adobes se fisuran después de 24 horas, es necesario añadir arena, pero si no resisten el peso de un hombre después de 21 días, se debe añadir arcilla. En cualquier caso la prueba práctica debe llevarse a cabo para indicar la mezcla idónea ([www.ecosur.org](http://www.ecosur.org)).

Cuando se haya encontrado una mezcla apropiada se comienza la producción del adobe utilizando moldes de madera o metal, se recomienda que estos sean cuadrados para condiciones sísmicas en un tamaño de 30x30x8 cm o 40x40x8 cm ([www.ecosur.org](http://www.ecosur.org)).

Las siguientes fotos muestran el procedimiento de elaboración de ladrillos (adobes).



Foto 1.1 Molde para fabricar adobes



Foto 1.2 Relleno del molde para fabricar adobe



Foto 1.3 Forma de preparar el pisón



Foto 1.4 Apisonar la mezcla



Foto 1.5 Desarmar el molde



Foto 1.6 Retirar el adobe del molde



Foto 1.7 Obtención del adobe tradicional

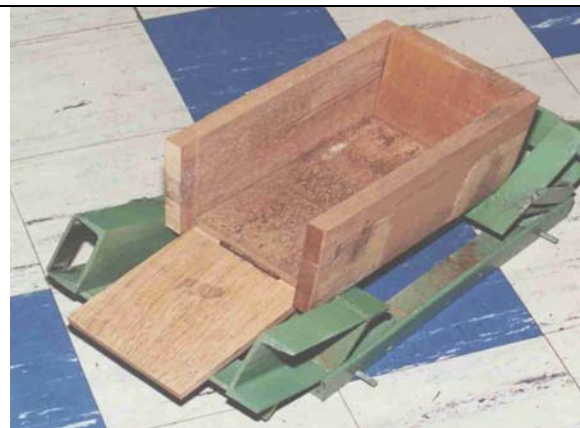


Foto 1.8 Sistema Vene-Ram para adobes

### Tabicones

El proceso de producción de tabicones a base de tepojal inicia con la adición de tepojal, cemento y agua en proporciones previamente determinadas a una máquina revolvedora, poco tiempo después del mezclado es retirada la mezcla de la máquina revolvedora para efectuar el relleno de moldes de la maquina bloquera. Posteriormente, por acción manual se opera la máquina bloquera para la fabricación de tabicones. Finalmente, se retiran de los moldes los tabicones fabricados y su secado es a temperatura ambiente.

Las siguientes fotos muestran el procedimiento de elaboración de tabicones.



Foto 1.9 Agregado de tepojal y lodo en la mezcladora



Foto 1.10 Adición de cemento



Foto 1.11 Adición de agua en la mezcla



Foto 1.12 Revisión de humedad en la mezcla



Foto 1.13 Muestra de la mezcla antes de utilizarla



Foto 1.14 Vaciado de la mezcla



Foto 1.15 Máquina bloquera llena de mezcla



Foto 1.16 Máquina bloquera en operación



Foto 1.17 Obtención de tabicones húmedos



Foto 1.18 Muestra de tabicones lista para secado a temperatura ambiente

El anexo B muestra los procesos de producción de algunos materiales cementantes.

### 1.3.3 Factores de influencia de los procesos de fabricación de productos elaborados con materiales cementantes

En los procesos de producción de los materiales de construcción deben de considerarse algunos factores de importancia para obtener productos de calidad. Entre estos factores se encuentran principalmente la composición de la materia prima (arcillas), cantidad de agua de mezclado, tamaño de partícula triturada, temperatura de calcinación y secado (Cemex).

La arcilla es un mineral procedente de la descomposición de rocas que contienen feldespato, por ejemplo granito, originada en un proceso natural. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina cuya fórmula es  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Se caracteriza por adquirir plasticidad al mezclarla con agua y un tamaño de partícula extremadamente pequeña (inferior a 0.002 mm) y superficie lisa (es.wikipedia.org).

Para que los lodos residuales puedan ser considerados como materia prima en la elaboración de materiales de construcción deben de poseer características similares a las empleadas en la fabricación de éstos. Es muy importante considerar la cantidad de agua contenida en el lodo, las concentraciones de hierro o aluminio, la presencia de contaminantes específicos y la consistencia del lodo, calidad y cantidad (Goldbold, *et al.*, 2003).

Salazar (2003), observó que para obtener un cementante de buena calidad es necesario encontrar el punto de calcinación y de activación de los lodos para que reaccionen químicamente con la cal y establecer el grado de finura, ya que el tamaño de partícula determina la calidad de la reacción.

La tabla 1.17 muestra la composición mineral realizada mediante espectrometría de Rayos X a muestras de lodos deshidratados de dos plantas de tratamiento de agua, una en Taiwán y otra en Sudáfrica en comparación con la arcilla normal que se utiliza en la producción de cemento.



Tabla 1.17. Comparación de la composición mineral de la arcilla y de los lodos producidos en dos plantas de tratamiento, una en Taiwán y otra en Sudáfrica (Pan, *et al.*, 2004; Titshall y Hughes, 2005).

Parámetro	Planta Zhi-Tan (norte de Taiwán)	Planta Midvaal (Sudáfrica)	Arcilla
SiO <sub>2</sub> (%)	51	53	58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	24	22	12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6	14	4
CaO (%)	< 1	4.5	10
MgO (%)	1.5	1.8	1.5
SO <sub>3</sub> (%)	< 0.5	ND	< 0.5
Na <sub>2</sub> O (%)	0.5	0.3	2
K <sub>2</sub> O (%)	3	1.9	2.5

De acuerdo a estos datos, las muestras de las dos plantas contienen más del 50% de SiO<sub>2</sub>, casi el mismo porcentaje que la arcilla común y más del 20% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que se encuentra dos veces por encima del valor de la arcilla. La planta de Sudáfrica presenta una mayor concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO, en comparación a las otras dos muestras, mientras que la de Taiwán, presenta valores de CaO por debajo de los de la arcilla. Estos resultados reflejan que a pesar de las diferencias, ambas muestras de lodos pueden ser utilizadas en la producción de materiales de construcción (Pan, *et al.*, 2004).

Por otra parte, Goldbold, *et al.*, (2003), menciona que los lodos fisicoquímicos con mayor contenido de aluminio y altas concentraciones de sólidos presentan un potencial mayor para la elaboración de cemento. Mientras que el uso del lodo del coagulante con mayor concentración de hierro es considerado más factible como materia prima en la elaboración de ladrillos tal y como se muestra en la tabla 1.18.

Tabla 1.18. Aplicaciones de lodo fisicoquímico en materiales de construcción (Goldbold, *et al.*, 2003).

Aplicación	Ventajas	Desventajas
Producción de Cemento	Alto contenido de aluminio en lodos Altas concentraciones de sólidos	Excesivo contenido de agua puede producir efecto de escurrimiento Emisiones con mal olor
Producción de Ladrillos	Alto contenido de hierro (coagulantes férricos) Contenido de materia orgánica reduce el costo de cocido	El contenido de azufre puede restringir la proporción de lodo adicionado en una mezcla

Las características de los suelos que tienen mayor influencia en la resistencia de la albañilería de adobe son aquellas relacionadas con el proceso de contracción por secado o con la resistencia seca del material. Por lo que las principales características de los suelos para mejorar la calidad del adobe son:

Arcilla: el componente más importante del suelo; provee la resistencia seca y origina la contracción por secado del suelo.

Control de la microfisuración debida a la contracción por secado: requerido para obtener albañilería de adobe fuerte.



Aditivos: paja y en una mejor proporción arena gruesa son aditivos que controlan la microfisuración durante la contracción por secado y por ende, mejoran la resistencia de la albañilería de adobe.

Para la elaboración de tabicones los factores de influencia en el proceso de producción es el tipo y cantidad de materia prima (cemento y tepojal) y el agua. Para obtener buenos resultados, la elaboración de tabicones debe cumplir con los requisitos de la NMX-C-441-ONNCCE-2005.

Los factores de influencia en la producción de morteros y concretos son:

Cemento: su función es proporcionar resistencia a la mezcla, por lo que debe cumplir con los requisitos especificados en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004.

Cal hidratada: cuando se emplea cal en el mortero, esta (a diferencia del cemento) endurece muy lentamente al reaccionar con el anhídrido carbónico del ambiente, en un proceso llamado carbonatación el cual es beneficioso para el mortero por dos razones: las fisuras se sellan a lo largo del tiempo al formarse cristales de carbonato de calcio que proveen una resistencia adicional a la del cemento y al endurecer lentamente favorecen la retentividad de la mezcla. Por lo que en la elaboración de morteros se podrá usar cal hidratada que cumpla con los requisitos especificados en la norma NMX-C-003-1996-ONNCCE.

Agua de mezclado: el agua que se utiliza para la mezcla debe ser potable, libre de partículas orgánicas y sustancias deletéreas (aceites, ácidos, etc.), por lo tanto, el agua debe cumplir con las especificaciones de la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Agregados: son piedras y arenas de diferentes tamaños que se obtienen de las canteras y representan aproximadamente del 60 al 75% del volumen total del concreto, por lo tanto, los agregados deben cumplir con las especificaciones de la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004 para morteros y concretos.

Aditivos: son sustancias sólidas o líquidas, que se pueden agregar a la mezcla de concreto antes o durante el mezclado, se utilizan ya sea para mejorar la durabilidad del concreto endurecido o para reducir el contenido de agua, también aumentan el tiempo de fraguado.

### **1.3.4 Características de productos fabricados con materiales cementantes**

#### Ladrillos y tabicones

Desde la más remota antigüedad, se conoce el uso de dos clases de tabiques o ladrillos: el de pasta de arcilla, formado más o menos con una mezcla de arena y paja, que en nuestro país se conoce como adobe y el tabique cocido a fuego.

Hoy en día, el desarrollo de nuevas tecnologías para construir viviendas ha tenido un avance exitoso, provocando que materiales tradicionales que se emplean en la construcción de viviendas sean desplazados; tal es el caso del adobe tradicional, por los inconvenientes que presenta en cuanto a sus condiciones físico-mecánicas, y principalmente por el espacio que ocupa en la construcción de muros, además de la desventaja que presenta por su baja resistencia a la compresión, a la erosión y al contacto con el agua. Esto ha despertado el interés por desarrollar investigaciones encaminadas al mejoramiento del adobe ([www.uadec.mx](http://www.uadec.mx)).





La idea de desarrollar un material a partir de tierra estabilizada tiene como finalidad competir con materiales como el block de concreto y el ladrillo blando (coacha) en cuanto a su resistencia a la compresión, y es más comfortable en épocas de frío o calor, además, es un material agradable que puede ser utilizado sin recubrimiento al exterior ([www.uadec.mx](http://www.uadec.mx)).

El adobe tecnificado es el resultado de una investigación donde se utiliza tierra estabilizada con cemento Pórtland y cal hidratada, por lo que presenta características físico-mecánicas superiores al adobe tradicional y compite con el ladrillo blando y con el block.

En cuanto a los estabilizadores que se utilizan para la fabricación del adobe tecnificado, la tierra sin cocción es susceptible de presentar variaciones de volumen. En caso de modificar la proporción en el ciclo de humectación y de secamiento, surge un hinchamiento y una contracción de la tierra capaz de crear deformaciones graves en la masa del material. Con el fin de limitar las variaciones del volumen, es necesario incorporarle sustancias estabilizadoras que permitan mejorar la estabilización de la tierra y su comportamiento ([www.uadec.mx](http://www.uadec.mx)).

Estabilizadores con cemento: Consiste en agregar a la tierra cemento Pórtland que permite aglutinarla (cubriendo las partículas) y facilita el manejo adecuado en la fabricación del adobe tecnificado. Con este estabilizador el adobe no requiere de cocción, pero debe tener un secado lento y a la sombra para obtener resultados favorables como resistencia a la compresión.

Para la elaboración de adobes, la gradación del suelo (proceso para determinar la proporción en que participan los granos del suelo, en función de sus tamaños) debe aproximarse a los siguientes porcentajes:

- Arcilla 10-20%
- Limo 15-25%
- Arena 55-70%

No se deben utilizar suelos orgánicos, estos intervalos de arcilla, limo y arena pueden variar cuando se fabriquen adobes estabilizados. El adobe debe ser macizo y sólo se permite que tenga perforaciones perpendiculares a su cara de asiento, cara mayor, que no representen más del 12% del área bruta de esta cara. El adobe deberá estar libre de materias extrañas, grietas, rajaduras u otros defectos que puedan degradar su resistencia o durabilidad (norma técnica de edificación E.080 adobe, 1999).

Los adobes podrán ser de planta cuadrada o rectangular y en el caso de encuentros con ángulos diferentes de 90°, de formas especiales.

Sus dimensiones deberán ajustarse a las siguientes proporciones:

- Para adobes rectangulares el largo sea aproximadamente el doble del ancho.
- La relación entre el largo y la altura deben ser del orden de 4:1.
- En lo posible la altura debe ser mayor a 8 cm.

Por otra parte la normatividad en México, no les confiere a las estructuras de adobe un valor estructural, generalmente los reglamentos de construcción estatales se basan en el reglamento de construcción del Distrito Federal, dentro de las normas técnicas complementarias de dicho reglamento en el apartado que se refiere a muros de mampostería, el adobe no se encuentra incluido.



La Norma NMX-C-404-1997-ONNCCE clasifica a los ladrillos y tabicones en tres tipos de acuerdo a los materiales con que se realizan. La tabla 1.19 muestra la clasificación de éstos.

Tabla 1.19. Clasificación de ladrillos y tabicones.

<b>Tipo de pieza</b>	<b>Materiales</b>	<b>Forma</b>
Ladrillos Macizo, hueco y multiperforado	Silicio calcáreo Barro extruido Arcilla recocido Otros	Rectangular Rectangular Rectangular Otros
Tabicón	Grava-cemento Arena-cemento Tepojal-cemento Otros	Rectangular Rectangular Rectangular Otros

La Norma NMX-C-404-1997-ONNCCE menciona las especificaciones y tolerancia en las dimensiones de ladrillos y tabicones que a continuación se describen:

Pieza maciza: es aquella cuya área neta es igual o mayor al 75% de su área total.

Pieza hueca: es aquella cuya área neta es menor al 75% de su área total, pero mayor al 40%.

Dimensiones para ladrillos: las dimensiones nominales mínimas deben cumplir con las siguientes medidas; 5 cm alto, 10 cm ancho y 19 cm largo con una tolerancia de  $\pm 4\%$ , sin incluir la junta de albañilería.

Dimensiones para tabicones: las dimensiones nominales mínimas de las piezas deben cumplir con las siguientes medidas; alto 6 cm, ancho 10 cm y largo 24 cm, incluyendo la junta de albañilería. La tolerancia en las dimensiones de la pieza no debe ser mayor a  $\pm 3$  mm en la altura y  $\pm 2$  mm en el largo y en el ancho.

La tabla 1.20 muestra la resistencia a la compresión de ladrillos y tabicones por la Norma NMX-C-404-1997-ONNCCE.

Tabla 1.20. Resistencia a la compresión de ladrillos y tabicones.

<b>Tipo de pieza</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
Ladrillo recocido	60
Ladrillo extruido	60 (hueco horizontal) 100 (hueco vertical)
tabicones	100

Existe una gran variedad de ladrillos y de acuerdo a su composición, forma, tamaño y color son utilizados para usos específicos. En la tabla 1.21 se presentan los más utilizados:



Tabla 1.21. Tipos de ladrillos fabricados en México.

Tipo de ladrillo	Características
Refractarios	Son fabricados con arcilla que contenga un alto porcentaje de alúmina y un bajo porcentaje de óxidos. Resisten temperaturas hasta de 1580°C.
Perforados	Sus agujeros representan aproximadamente un 25% de huecos, son buenos aislantes y su tamaño mayor permite una puesta en obra más rápida.
Huecos	Son mucho más ligeros y de mayores dimensiones, permiten la realización de paredes a la compresión. Estos se unen con mortero de cemento cuando se trata de obras expuestas a la intemperie o con yeso, si se trata de tabiques interiores.
Tipo aislante o utilizados en mampostería	No pueden soportar pesos excesivos, son amasados con sustancias combustibles que luego se consumen en los hornos, con lo que se obtiene un material poroso.
ladrillo prensado	Es más compacto y resistente. Se hacen de masa fina y se dejan vitrificar un poco durante la cocción. Se utilizan para revestimientos de fachadas.

### Mortero

El mortero, también llamado cemento de albañilería, es un cemento Pórtland mezclado con materiales inertes finamente molidos. En otras palabras, es cemento con arena y agua; y lo que lo distingue del concreto armado es la ausencia de agregados gruesos (las gravas).

Características de los tipos de morteros:

El primero se compone de una mezcla de cemento y arena, su principal ventaja respecto a otros tipos de argamasa es su gran resistencia y la rapidez con la que se seca y endurece. Sin embargo, como es poco flexible, es fácil que se resquebraje.

El mortero de cal, en el que se amasa este producto con arena, tiene la gran ventaja de que es fácil de aplicar, es flexible y untuoso. No obstante, es menos resistente e impermeable que el mortero de cemento.

Asimismo, existe un mortero mixto compuesto por cemento, cal y arena que aúna las cualidades de los anteriores. Si en la masa se pone más cemento que cal será más resistente y si la cantidad de cal es mayor será más flexible.

Los morteros y concretos de relleno que se emplean en elementos estructurales de mampostería para rellenar celdas de piezas huecas deberán cumplir con los siguientes requisitos:

- Su resistencia a la compresión será por lo menos de 125 kg/cm<sup>2</sup>.
- El tamaño máximo del agregado no excederá de 10 mm.
- Se empleará la mínima cantidad de agua que permita que la mezcla sea lo suficientemente fluida para rellenar las celdas.

La tabla 1.22 muestra las partes en volumen de los diferentes tipos de morteros por la Norma N-CMT-2-01-004/02.



Tabla 1.22. Resistencia a la compresión y composición de los tipos de mortero (Norma N-CMT-2-01-004/02).

Tipo	Partes de cemento Pórtland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena	Resistencia nominal en compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
I	1	-	0 a ¼	No menos a 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	125
	1	0 a ½	-		75
II	1	-	¼ a ½		40
	1	½ a 1	-		
III	1	-	½ a 1 ¼		

Nota: Partes en volumen; medido en estado seco y suelto.

### 1.3.5 Aplicaciones

#### Ladrillos y tabicones

Ladrillos:

Los adobes se utilizan principalmente para la construcción de paredes, muros, edificaciones, viviendas.

De acuerdo al censo de población y vivienda 2000, en México existen 4,271,388 viviendas elaboradas con adobe, de las cuales el 9.05% (386,650 viviendas) se encuentran en el Estado de México (INEGI, 2000).

Tabicón:

Es un material ideal para construir bodegas, casas y muros con un menor costo en mano de obra y juntas de cemento logrando un avance más rápido.

De acuerdo al censo de población y vivienda 2000, en México existen 16,968,348 viviendas elaboradas con ladrillo, tabique, tabicón, block, piedra, cemento y concreto, de las cuales el 29.19% (4,952,510 viviendas) se encuentran en el Estado de México (INEGI, 2000).

#### Morteros y concretos de relleno

El mortero es un producto diseñado para trabajos de albañilería, cumple ampliamente con todas las especificaciones de calidad establecidas en la Norma Mexicana NMX-C-21-1981.

El mortero está diseñado para trabajos en donde no se requieren elevadas resistencias a la compresión sino tan solo a propiedades ligantes y/o aglutinantes.

Los morteros tipo I y concretos de relleno se emplean principalmente en elementos estructurales de mampostería para rellenar celdas de piezas huecas.

Los morteros tipo II y III se emplean principalmente para pegado de bloques y ladrillos, cimentaciones de mampostería, aplanados, pisos y firmes.



Los morteros de cal se emplean principalmente para revestimientos, entre las principales técnicas de revestimiento se encuentran:

**Enfoscado:** capa de mortero que se coloca sobre el paramento con el fin de regularizar la superficie y protegerlo. En definitiva, es la primera capa de recubrimiento que se coloca sobre el soporte.

**Revoque o revoco:** se denomina a la capa de terminación o segunda capa que va sobre el enfoscado ya endurecido.

**Fratasado:** tratamiento que se da al revoco para conseguir una superficie regular, esto es plana y uniforme, para dar la terminación de pintura, estucado o esgrafiado.

**Estuco:** pasta coloreada hecha con cal, arena de mármol blanco y pigmentos que se coloca con un fin ornamental a la par que protege el paramento.

**Esgrafiado:** consiste en la superposición de capas de revoque con distinto color, una vez colocadas se elimina parte de una o más capas de acuerdo con un dibujo o diseño, con lo que resultan figuras en relieve y policromía.

La tabla 1.23 muestra el volumen y valor de producción nacional de los materiales de construcción en estudio.

Tabla 1.23. Volumen y valor de producción de materiales de construcción (INEGI, 2004).

<b>Producto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor (miles pesos)</b>
Ladrillo natural	305,199 Pzas.	519,662
Bloques comunes	255,479 Pzas.	963,527
Mortero	1,937,238 Toneladas	1,492,995
Concreto hidráulico premezclado común	7,935,077 m <sup>3</sup>	6,723,615
Concreto hidráulico premezclado de alta resistencia	834,522 m <sup>3</sup>	788,048



## Capítulo 2. Metodología de las pruebas de laboratorio para elaborar productos de la construcción

La metodología empleada para la elaboración de materiales de construcción inicia con un plan de muestreo de lodos en la planta en estudio, es decir, definir los puntos más adecuados de muestreo para obtener mezclas compuestas representativas confiables de lodos producidos en la planta. Posteriormente, se realizó una caracterización de lodos, con la finalidad de determinar la calidad y el potencial de aprovechamiento de los mismos. Finalmente, se realizaron especímenes de mezclas de cementantes con lodos a diferentes composiciones, con base en sus características y formulaciones recomendadas, se elaboraron ladrillos y tabicones.

### 2.1 Materiales y reactivos

Los materiales y reactivos empleados para las pruebas de elaboración de especímenes (cubos de 5 cm por lado), ladrillos y tabicones son los siguientes:

a. Cemento Pórtland Compuesto marca TOLTECA (CEMEX)

Los cementos son conglomerantes hidráulicos que amasados con agua fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergidos en agua.

El cemento Pórtland es el material comercial de mayor uso en la industria de la construcción y es definido como el “material que proviene de la pulverización del producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizas que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio e hierro en cantidades convenientemente calculadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar y agua, así como otros materiales que no excedan del 1% en peso del total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento” ([www.conafovi.gob.mx](http://www.conafovi.gob.mx)).

El cemento puede clasificarse de acuerdo a su tipo (A), resistencia mecánica a la compresión (B) y características especiales de durabilidad ante agentes agresivos (C) y debe de cumplir con las especificaciones de calidad mencionadas en la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999.

Los anexos C y D muestran las características y aplicaciones de cementos Pórtland.

b. Cal Hidratada marca CALIDRA.

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas, constituido principalmente de óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La cal es uno de los pocos productos que ha resistido con éxito la prueba del tiempo, ya que por siglos no solo se ha usado en la construcción, agricultura y alimentación, sino que conforme ha ido avanzando la ciencia y la tecnología, se han descubierto nuevas aplicaciones químicas y físicas de este material.

Los anexos C y D muestran las características y aplicaciones de las cales.



c. Yeso marca EL TIGRE

El yeso, el aglomerante más antiguo de que se tiene noticia, es un material natural que al molerse y deshidratarse forma un polvo, que al volverse a combinar con agua, se convierte en una pasta moldeable que fragua con el tiempo.

Los anexos C y D muestran las características y aplicaciones del cemento Pórtland, cales y yeso.

d. Arena Andesita (malla 8)

Es la roca intermedia entre la riolita y el basalto, la asociación riolita-andesita-basalto sugiere que estas rocas son producto de la cristalización normal de un magma originalmente homogéneo, o que las andesitas pueden resultar de la solidificación del basalto por material silico de la corteza. La andesita suele utilizarse como material de construcción.

e. Arena de río (malla 8): empleada para elaborar mezcla ternaria.

f. Agua destilada: empleada para elaborar mezclas.

g. Aceite desmoldante: se emplea principalmente para evitar que la mezcla se adhiera a las paredes del molde.

## 2.1.1 Lodo

### 2.1.1.1 Descripción general de la planta potabilizadora en estudio

La planta potabilizadora en estudio fue diseñada para tratar un caudal de 24 m<sup>3</sup>/s, mediante seis módulos de potabilización con una capacidad cada uno de 4 m<sup>3</sup>/s. Actualmente se encuentran construidos cinco módulos, denominados como "B", "C", "D", "E" y "F", de los cuales cada módulo está dividido en cuatro secciones y diariamente se realiza mantenimiento a una sección. Cada módulo de potabilización está constituido por cuatro tanques de floculación cuatro tanques de sedimentación y ocho filtros.

El proceso de potabilización de la planta inicia con la recepción de agua cruda en un tanque de homogeneización denominado TRAC (Tanque de Recepción de Agua Cruda). El agua cruda es enviada a la caja de distribución de los canales Parshall en donde se realiza una precloración y se adiciona el sulfato de aluminio líquido, seguido el proceso de coagulación-floculación para la remoción de sólidos suspendidos y coloides, aprovechando el resalto hidráulico y la caja de transición de cambio de régimen de canal a tubería para obtener una buena dilución y, por lo tanto, la coagulación. La adición de los químicos se realiza con un sistema de dosificación, que regula la cantidad de químico adicionado en función de la calidad del agua y del caudal a procesar.

El agua proveniente del sistema de mezcla rápida pasa al tanque de floculación hidráulica en donde, mediante agitación lenta, se propicia la formación de flóculos.

Posteriormente, el agua pasa al tanque de sedimentación. Los primeros 10 metros de largo del tanque, no se cuenta con placas ni con equipo de extracción de lodos, siendo ésta un área donde se sedimentan gran cantidad de lodos; los 40 metros restantes cuentan con módulos de placas de plástico y con un equipo para la extracción de los lodos denominado Clarivac. El agua sedimentada pasa a un sistema de filtración para posteriormente ser bombeada a la red de distribución.



El Clarivac realiza un recorrido a todo lo largo del sedimentador, en ambos sentidos, extrayendo mediante un cabezal que trabaja al vacío, los lodos del fondo del sedimentador, depositándolos en el canal para lodos que se localiza en la lateral del tanque de sedimentación. Al final de cada canal recolector de lodos se cuenta con una tubería y una válvula que controlan su descarga hacia un cabezal colector de lodos procedentes de los módulos en operación. Los lodos recolectados son enviados por medio de una tubería hasta dos cajas de distribución de lodos, desde donde son distribuidos a cuatro concentradores o espesadores de lodos denominados:

- Espesadores Norte 1 y 2.
- Espesadores Sur 1 y 2.

Los lodos producidos son espesados en los concentradores o espesadores y es purgado periódicamente en una caja de recolección de lodos. Posteriormente, son transferidos a un cárcamo de bombeo, el cárcamo de transferencia de lodos cuenta con cuatro bombas centrífugas y la descarga de estas bombas es enviada a una laguna de almacenamiento denominada presa de lodos, actualmente se encuentra saturada por lo que ha sido necesario elevar los bordos para seguir recibiendo lodo de los espesadores y en un futuro próximo será necesario elevar también los canales de alimentación a la presa. Para evitar el desborde, los lodos se envían desde esta presa a otros estanques formados con bordos de tierra denominados “tarquinas”, donde se disponen finalmente los lodos, evaporando el agua del sobrenadante. A la fecha se cuenta con dos “tarquinas” en operación y el proyecto de una tercera.

El agua (sobrenadante) de cada espesador es recolectada en las canaletas de recolección de sobrenadante. De ahí se transfiere a las fosas de recuperación de agua de retrolavado de filtros denominado TRALF y se descarga en una caja de transferencia de agua recuperada, desde donde se distribuye nuevamente a la caja de distribución de los canales Parshall.

Parte de la fase líquida de la presa se extrae mediante un sifón que descarga en un pequeño cárcamo de bombeo que cuenta con una bomba de retorno. El agua de la presa es enviada, por bombeo a la caja de recuperación de agua del sobrenadante de los espesadores.

En el anexo E se muestra un reporte fotográfico del tren de tratamiento de la planta potabilizadora en estudio.





### 2.1.1.2 Muestreo

El muestreo de lodos de la planta potabilizadora en estudio se realizó en dos épocas: estiaje (Junio 2005) y lluvias (Agosto 2005) en los siguientes sitios:

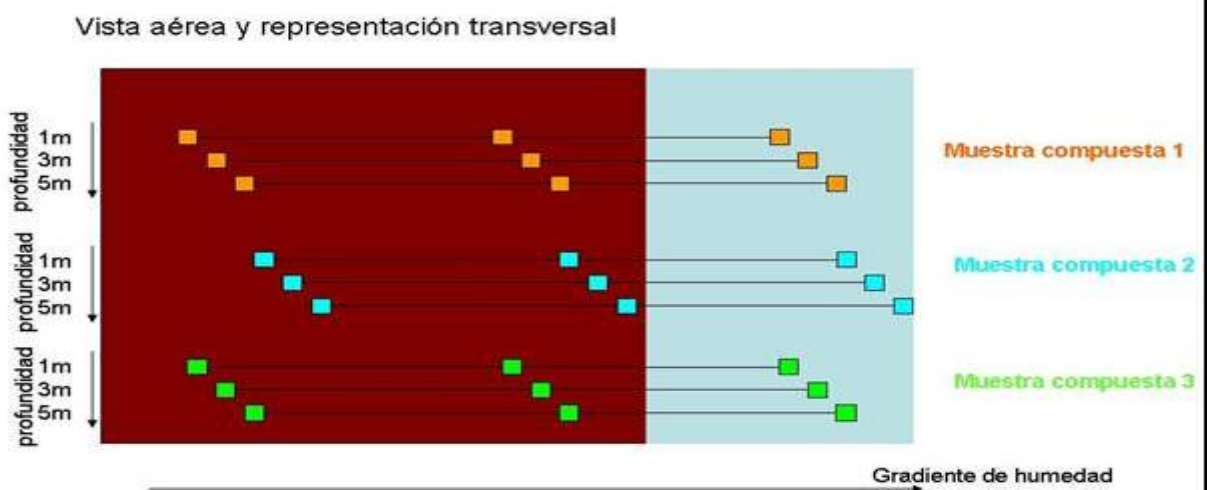
- a) Lodos depositados en la planta en estudio: Presa de lodos, tarquinas,
- b) Lodos generados en la planta en estudio: Los resultantes del lavado de dos sedimentadores y los de dos espesadores de lodos.

El lodo contenido en las tarquinas y la presa presenta gran heterogeneidad en sus propiedades físicas, químicas y biológicas a lo largo de su profundidad, en particular en su estado líquido y sólido. Considerando lo anterior, se coleccionarán muestras por columnas usando muestreadores de 3 pulgadas de diámetro y 6 metros de altura adaptados con un sistema de mariposa.

#### Primer período de muestreo: época de estiaje

En el primer período de muestreo o época de estiaje, se llevó a cabo un programa de muestreo en los sedimentadores, espesadores y, además, el muestreo en la presa y tarquinas de lodos.

En el muestreo realizado en el área de tarquinas, se obtuvieron tres muestras de la zona oriente de la tarquina 2 (punto norte, centro y sur), tres muestras de la zona centro (punto norte, centro y sur) y tres muestras de la zona poniente (punto norte, centro y sur). Con estas muestras se obtuvieron tres mezclas compuestas (oriente, centro y poniente) y posteriormente obtuvimos un muestreo de la tarquina 1, con tres muestras de la zona sur, tres muestras de la zona centro y tres muestras de la zona norte de la tarquina. En cada punto se muestreó con la columna de profundidad total (superficie-fondo). La figura 2.1 muestra la representación esquemática de los muestreos realizados en las tarquinas.



**Figura 2.1. Representación esquemática de los muestreos realizados en las tarquinas.**



El muestreo realizado en la presa de lodos se efectuó tomando muestras de tres puntos específicos de la presa.

Por otra parte, se realizaron tres muestreos en los espesadores norte y sur, con base en el programa propuesto en el plan de muestreo (Tabla 2.1).

En el tren de tratamiento, la toma de muestras se ubicó en la línea de purga de lodos (caja colectora de purga de lodos de espesadores).

Tabla 2.1. Muestras colectadas en los espesadores de la planta potabilizadora en estudio.

<b>MUESTREO 1</b>	<b>MUESTREO 2</b>	<b>MUESTREO 3</b>
Día 1, Primera purga, espesador norte 1: muestreo A1. Día 1, Primera purga, espesador norte 2: muestreo A2.	Día 2, Primera purga, espesador sur 1: muestreo B1. Día 2, Primera purga, espesador sur 2: muestreo B2.	Día 3, Primera purga, espesador norte 1: muestreo C1. Día 3, Primera purga, espesador norte 2: muestreo C2. Día 3, Primera purga, espesador sur 1: muestreo C3. Día 3, Primera purga, espesador sur 2: muestreo C4.

Con el fin de obtener 3 muestras compuestas representativas, cada muestra compuesta estuvo constituida de la manera siguiente: A1+A2, B1+B2 y C1+C2+C3+C4, en volúmenes iguales.

En el caso del sedimentador se tomaron tres muestras de dos tipos:

Tipo 1: para caracterización fisicoquímica y microbiológica y,

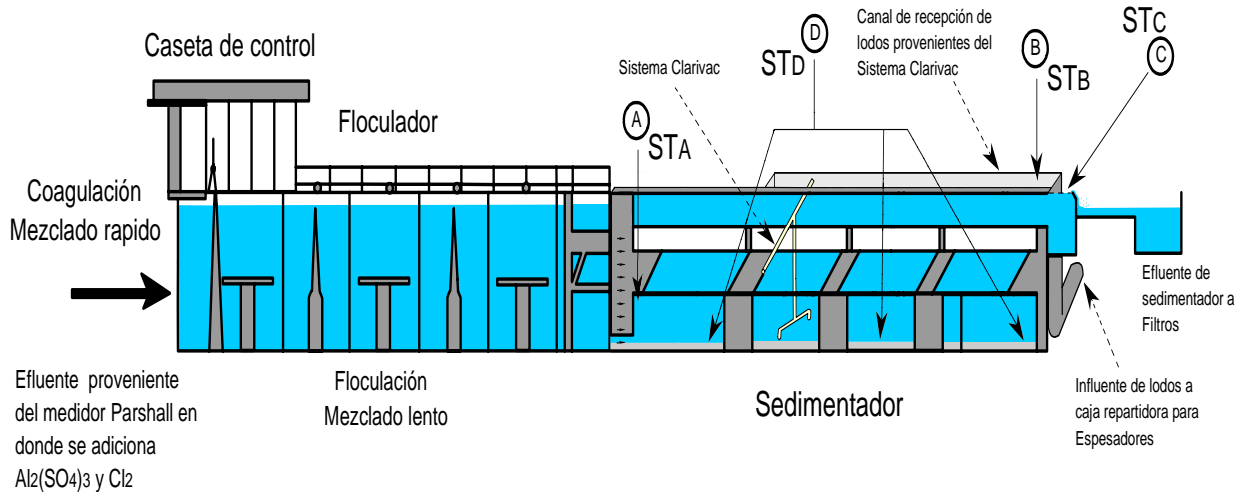
Tipo 2: para realizar un balance de materia que permita estimar la cantidad de lodos que se producen.

Para el primer caso, los puntos que se muestrearon en el fondo del sedimentador son tres: inicio de sedimentador sin CLARIVAC, en medio de la zona del CLARIVAC y antes de la salida del sedimentador. Estas tres muestras formaron una mezcla compuesta, de tres sedimentadores tomados al azar o en función del programa de lavado de sedimentadores que aplica la planta en estudio.

Para el segundo caso, se tomaron tres muestras por día del influente y del efluente de cuatro sedimentadores, de la descarga o efluente del CLARIVAC correspondiente de ese sedimentador, y de la caja de purga de espesadores. La figura 2.2 ilustra los puntos de muestreo en el sedimentador.



- A: Efluente del floculador o Influyente al sedimentador
- B: Efluente del Clarivac
- C: Efluente del sedimentador (agua clarificada)
- D: Acumulación de lodos en el fondo del sedimentador



**Figura 2.2. Puntos de muestreo para realizar el balance de materia en la etapa de sedimentación de la planta en estudio.**

Posteriormente, se llevó a cabo el muestreo en las cuatro etapas del lavado del sedimentador E1: vaciado, lavado hidráulico, lavado mecánico y enjuague. Se tomaron cuatro puntos de muestreo: zona de influente (I); zona denominada “Muerta” (M), donde el sedimentador no cuenta con el sistema CLARIVAC (C) para la succión de lodos; zona de CLARIVAC, localizada en la parte media del sedimentador con el sistema de succión de lodos y la zona de efluente de sedimentador (E).

En la etapa de vaciado se tomaron 7 muestras a intervalos de 15 minutos; en la zona de lavado hidráulico se tomaron 5 muestras a intervalos de 4 minutos y la toma de muestras en la etapa de lavado mecánico y enjuague fue cada 6 minutos. Se tomaron muestras simples y se formó una mezcla compuesta de las cuatro etapas de lavado. En la tabla 2.2 se describen los puntos de muestreo en el sedimentador.



Tabla 2.2. Relación de muestras tomadas en las cuatro etapas de lavado de los sedimentadores.

ETAPA A: VACIADO DE SEDIMENTADOR			ETAPA B: LAVADO HIDRÁULICO		
No.	Tiempo de muestreo (min)	No. de identificación de las muestras	No.	Tiempo de muestreo (min)	No. de identificación de las muestras
1	0	SIV1, SMV1, SCM1, SEV1	1	0	SIH1, SMH1, SCH1, SEH1
2	15	SIV2, SMV2, SCM2, SEV2	2	4	SIH2, SMH2, SCH2, SEH2
3	30	SIV3, SMV3, SCM3, SEV3	3	8	SIH3, SMH3, SCH3, SEH3
4	45	SIV4, SMV4, SCM4, SEV4	4	12	SIH4, SMH4, SCH4, SEH4
5	60	SIV5, SMV5, SCM5, SEV5	5	15	SIH5, SMH5, SCH5, SEH5
6	75	SIV6, SMV6, SCM6, SEV6			
7	90	SIV7, SMV7, SCM7, SEV7			
ETAPA C: LAVADO MECÁNICO			ETAPA D: ENJUAGUE		
No.	Tiempo de muestreo (min)	No. de identificación de las muestras	No.	Tiempo de muestreo (min)	No. de identificación de las muestras
1	0	SIM1, SMM1, SCM1, SEM1	1	0	SIE1, SME1, SCE1, SEE1
2	6	SIM2, SMM2, SCM2, SEM2	2	6	SIE2, SME2, SCE2, SEE2
3	12	SIM3, SMM3, SCM3, SEM3	3	12	SIE3, SME3, SCE3, SEE3
4	18	SIM4, SMM4, SCM4, SEM4	4	18	SIE4, SME4, SCE4, SEE4
5	24	SIM5, SMM5, SCM5, SEM5	5	24	SIE5, SME5, SCE5, SEE5
6	30	SIM6, SMM6, SCM6, SEM6	6	30	SIE6, SME6, SCE6, SEE6



### Segundo período de muestreo: época de lluvias

El segundo período de muestreo se realizó en época de lluvias (Agosto de 2005), se colectaron muestras de espesadores y sedimentadores. Este segundo muestreo permitió: a) Determinar la generación de lodos en la etapa de sedimentación y b) Obtener el contenido de óxidos y de coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de helminto de los espesadores. Todo esto permitió determinar si existe una diferencia significativa de estos dos parámetros, en época de estiaje y de lluvias, y su impacto sobre las opciones de valoración a evaluar para los lodos. En el caso del sedimentador se tomaron tres muestras de dos tipos: 1) Para caracterización y 2) Para estimar la generación de lodos mediante un balance de materia que permitió estimar la cantidad de lodos que se producen. Para el primer caso, se tomaron tres muestras correspondientes al influente, al efluente y de la descarga o efluente del CLARIVAC de cuatro sedimentadores (C3, D3, E3 y F3). Los puntos que se muestrearon en el fondo del sedimentador son tres: antes de salir de la zona sin CLARIVAC, en medio de la zona del CLARIVAC y antes de la salida del sedimentador E1. Estas tres muestras se utilizaron para formar una muestra compuesta, de sedimentadores. Para el segundo caso, se tomaron tres del influente y del efluente de cuatro sedimentadores (C, D, E y F), y de la descarga o efluente del CLARIVAC correspondiente a cada sedimentador. Los puntos que se muestrearon en el fondo del sedimentador son: antes de salir de la zona sin CLARIVAC, en medio de la zona del CLARIVAC y antes de la salida del sedimentador E1. Estas tres muestras se utilizaron para formar una muestra compuesta. La figura 2.2 ilustra los puntos de muestreo en el sedimentador.

En los espesadores se colectaron dos muestras simples, una del espesador norte y otra del sur, para formar una muestra compuesta.

#### **2.1.1.3 Caracterización de lodos**

La caracterización de las muestras colectadas de lodos, de tipo fisicoquímico (pH, textura, % humedad, metales, etc.) y microbiológico (coliformes fecales, *salmonella*, huevos de helminto), se realizó en un laboratorio acreditado ante la EMA y la determinación del contenido de óxidos se realizó en el Instituto de Geología, UNAM. La determinación de sólidos suspendidos totales se realizó en el Instituto de Ingeniería, UNAM, que permitió determinar, por una parte, el nivel de sólidos suspendidos en las descargas realizadas en el proceso de lavado de sedimentadores y, por otra parte, realizar el balance de materia para estimar la generación o producción de lodos en la etapa de sedimentación:

### **2.2 Sistemas y técnicas experimentales para la elaboración de productos a base de cementantes y lodo**

Las formulaciones para la elaboración de especímenes de mezclas de cementantes con lodo se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Formulaciones para elaborar especímenes de mezclas cementantes-lodo

Mezcla binaria	Composición (%)					
	100-0	90-10	75-25	40-60	25-75	0-100
Lodo	♣					
Lodo-cemento		♣	♣	♣	♣	♣
Lodo-cal		♣	♣	♣	♣	♣
Lodo-yeso		♣	♣	♣	♣	♣
Lodo-mortero		♣	♣	♣	♣	♣
Mezcla ternaria	Composición (%)					
	90-5-5	75-12.5-12.5	40-30-30	25-37.5-37.5		
Lodo-yeso-cemento	♣	♣	♣	♣		
Lodo-yeso-cal	♣	♣	♣	♣		
Lodo-cal-cemento	♣	♣	♣	♣		
Lodo-yeso-andesita			♣	♣		
Lodo-yeso-arena río			♣	♣		

A continuación se describen las técnicas y sistemas experimentales utilizados para elaborar los productos fabricados a partir de mezclas de materiales cementantes y lodo.

Elaboración de especímenes

A continuación se muestra el procedimiento de elaboración de especímenes:

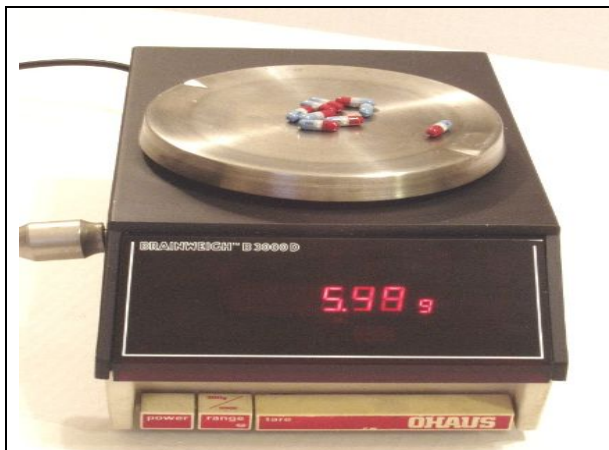


Foto 2.1 Balanza Analítica OHAUS Brainweigh B3000D.

Escala cambiable en dos funciones de peso:  
300 x 0.01 g – 3000 x 0.1 g.

1.- Pesado de una cantidad de lodo y una cantidad de material (cemento, cal, yeso, mortero, arena) para obtener una mezcla con porcentajes en masa conocidos en una balanza analítica.



Foto 2.2 Agitador SOILTEST, INC CT-345.

Capacidad: 4.73 L

Motor: 1/6 HP; 124 Watts.

Velocidad: baja, intermedia, alta (139, 285, 591 rpm).

Mezclado: acción planetaria.

Dimensiones: 263x311x432 mm.

Peso: 16.8 kg.

2.- Homogeneizado de la mezcla (en el caso de que la mezcla no se logre homogeneizar, agregar la cantidad de agua necesaria hasta lograr el objetivo).



Foto 2.3 Molde para cubos de cemento ELE INTERNATIONAL.

Bastidor de molde de latón duradero.

Construcción en bronce forjado con maquinado de precisión para mayor precisión y resistencia a la corrosión.

Molde para cubos se utiliza para formar muestras cúbicas de 50.8 mm (2") en tandas de tres para ensayos de resistencia a la compresión.

3.- Preparado de los moldes para fabricar especímenes agregando un poco de aceite desmoldante en las paredes del molde y posteriormente armarlos.



Foto 2.4 Agregado de mezcla lodo-material cementante a molde para la fabricación de especímenes.

4.- Agregado de una capa de muestra y apisonar 16 ocasiones, esto es, apisonar cuatro veces por cada lado del molde. Repetir este paso en tres ocasiones para rellenar el molde y con una espátula retirar el exceso de muestra de la parte superior del molde.



Foto 2.5 Especímenes retirados del molde para secado.

5.- Después de 24 horas se procede a retirar los especímenes de los moldes para colocarlos en un trozo de vidrio para su secado.



### Elaboración de ladrillos:



Foto 2.6 Fabricación de ladrillos pequeños y grandes a base de lodo

1.- Pesado de una cantidad de lodo y una cantidad de material (cemento, cal, yeso, mortero, arena) para obtener una mezcla con porcentajes en masa conocidos en una balanza analítica.

2.- Homogeneizado de la mezcla (en el caso de que la mezcla no se logre homogeneizar, agregar la cantidad de agua necesaria hasta lograr el objetivo).

3.- Preparado de los moldes para fabricar ladrillos agregando un poco de aceite desmoldante en las paredes del molde y posteriormente armarlos.

4.- Agregado de una capa de muestra y apisonado, esto es, apisonar las veces que sean necesarias por cada lado del molde. Repetir este paso en tres ocasiones para rellenar el molde y con una espátula retirar el exceso de muestra de la parte superior del molde.



Foto 2.7 Retirada de ladrillos de los moldes.

5.- Después de 24 horas se procede a retirar los ladrillos de los moldes para colocarlos en un trozo de plástico para su secado.

La elaboración de tabicones se realizó bajo el procedimiento mencionado en la sección 1.3.2.

### 2.3 Técnicas analíticas para pruebas de laboratorio

Existe un gran número de técnicas analíticas para determinar fluidez (prueba en estado fresco), resistencia a la compresión y contracción por secado (anexo F). En este estudio se utilizaron las mencionadas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Técnicas analíticas para determinar fluidez, resistencia a la compresión y contracción por secado.

Técnica	ASTM	Especificación
Prueba de Fluidez	C 230	Mesa de fluidez para uso en muestras de cemento hidráulico.
Resistencia a la compresión	C 109	Resistencia a la compresión de cemento mortero hidráulico (usando especímenes cubos de 2”).
Contracción por secado	C 157	Cambio de longitud de endurecimiento de cemento mortero hidráulico y concreto.

Estas técnicas se ilustran y describen a continuación:

#### Elaboración de prueba de fluidez:

- 1.- Pesado de una cantidad de lodo y una cantidad de material (cemento, cal, yeso, mortero, arena) para obtener una mezcla con porcentajes en masa conocidos en una balanza analítica.
- 2.- Homogeneizado de la mezcla (en el caso de que la mezcla no se logre homogeneizar, agregar la cantidad de agua necesaria hasta lograr el objetivo).



Foto 2.8 Mesa de Fluidez SOILTEST, INC CT-20-CP, Peso: 10 kg.

Mesa: Bronce fundido 10” diámetro.

Dimensiones: 10” diámetro x aprox. 10” altura.

Molde: Bronce, 69.8 mm diámetro interno superior, 101.6 mm diámetro interno inferior (base), 2” de altura.

3.- Centrar el molde en el plato de la mesa de fluidez, agregar una capa de mezcla en el molde y posteriormente apisonar circularmente para rellenar el molde. Repetir este paso las veces que sean necesarias hasta rellenar el molde completamente y con una espátula retirar el exceso de muestra de la parte superior del molde.

4.- Retirar el molde de la mesa de fluidez, quedando la muestra moldeada sobre la mesa de fluidez lista para la prueba.

5.- La prueba consiste en permitir que la muestra reciba 25 golpes en la mesa de fluidez.



Foto 2.9 Medición de fluidez de la mezcla.

6.- Elaboración de cuatro mediciones en forma de asterisco para conocer la fluidez de la muestra.

Elaboración de prueba de resistencia a la compresión:

1.- Procedimiento de elaboración de especímenes.

2.- Elaboración de una programación de pruebas de compresión de especímenes a 14, 21 y 28 días después de la fecha de elaboración de los mismos.



Foto 2.10 Medición del volumen del espécimen.

3.- Medición de área, altura y pesado de cada espécimen para conocer el volumen y la densidad de cada espécimen.



Foto 2.11 Pesado de especímenes.



Foto 2.12 Prensa Hidráulica SATEC Systems, INC.

Modelo 500WHVL.

Capacidad de carga: 500,000 lbs.

Rangos: 5000, 20000, 100000, 500000 lbs.

Medida tabla: 30" x 30".

Velocidad: 1.5 Ton/min.

4.- La prueba consiste en colocar el espécimen en una prensa hidráulica a una velocidad de 1.5 Ton/min, se comprime y se conoce la resistencia en kilogramos para cada espécimen.

#### Elaboración de prueba de contracción por secado:

##### 1.- Procedimiento de elaboración de especímenes.



Foto 2.13 Medición del volumen del espécimen

2.- La prueba consiste en conocer el área y la altura de cada espécimen (el espécimen debe estar totalmente seco para evitar mayor contracción en un posterior periodo de tiempo) para obtener el volumen del mismo, el volumen de los moldes se conoce con anterioridad por lo que por diferencia de volúmenes se obtiene la contracción por secado de cada espécimen.



## Capítulo 3. Resultados y discusión

### 1.1 Muestreo y caracterización de lodos

Los resultados generales de muestreo y caracterización de lodos de la planta potabilizadora en estudio se presentan a continuación:

#### 3.1.1 Caracterización de lodos

Con el fin de validar y poder interpretar los resultados de caracterización de lodos de la planta potabilizadora en estudio, se realizó un análisis estadístico (promedio, desviación estándar) a los datos obtenidos para los lodos colectados en época de estiaje y en época de lluvias. Los resultados obtenidos fueron comparados entre cada época y con respecto a caracterizaciones reportadas para lodos de otras plantas potabilizadoras.

En la tabla 3.1 se puede observar que los intervalos de parámetros fisicoquímicos en general, son similares entre los lodos generados (sedimentadores y espesadores) y los depositados (tarquinas y presa de lodos) en época de estiaje, ya que se tiene entre el 10-20% de diferencia entre los lodos generados y los lodos depositados, excepto para nitrógeno orgánico, nitritos y fosfatos obteniendo una diferencia significativa entre 60-70% mayor en lodos generados.

En el caso de los metales se obtuvo que el Mn, Ca y Na se encuentran en mayor concentración (57, 74 y 30% respectivamente) en lodos generados y el Al, Fe, Mg y K se encuentran en mayor concentración (7, 27, 40 y 25% respectivamente) en lodos depositados.

Para metales pesados los parámetros fisicoquímicos tienen un intervalo de diferencia del 5-35% entre lodos generados y lodos depositados, excepto el zinc que obtuvo una diferencia del 44% en lodos depositados.

Los resultados obtenidos para caracterización microbiológica muestran que existe una variabilidad muy significativa en los parámetros contenidos, ya que para coliformes fecales se tiene una diferencia del 87% mayor en lodos generados y, para *Salmonella* y huevos de helminto se tiene una diferencia mayor (94% y 82% respectivamente) en lodos depositados.



Tabla 3.1. Parámetros estadísticos de las características de los lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora en estudio, en época de estiaje (junio 2005).

Parámetro	Lodos de sedimentadores y espesadores			Lodos de tarquinas y presa de lodos		
	Promedio	Desv. Estándar	Intervalos	Promedio	Desv. Estándar	Intervalos
	n = 6			n = 9		
<b>FÍSICOQUÍMICOS</b>						
pH (unidades de pH)	7.05	0.23	6.85-7.30	7.23	0.95	6.82 - 9.76
Textura: Arena (%)	56.16	5.46	50.24 - 60.80	46.83	3.83	36.80 - 48.80
Limo (%)	26.72	5.23	20-32	32.64	4.50	29.44-44.00
Arcilla (%)	17.12	2.34	13.76 - 19.20	20.20	2.45	16.20-23.20
Porosidad (%)	28.43	6.09	21.77-36.65	39.41	6.73	24.83-47.04
Humedad (%)	95.96	3.17	93.39-99.39	86.18	2.43	82.72-89.15
Densidad Real (g/mL)	1.50	0.13	1.36-1.68	1.80	0.19	1.42-2.04
Alcalinidad (% CaCO <sub>3</sub> )	10.39	0.86	9.21-11.85	8.51	0.24	8.08 - 8.73
Cloruros (mg/kg)	884.50	402.43	488-1394	721.44	178.04	495-933
Conductividad(µmhos/cm)	1,170.00	482.56	809-1880	623.78	96.75	505-798
Fluoruros (mg/kg)	0.11	0.01	<0.10 - 0.12	0.14	0.05	<0.10 - 0.23
N-amoniaco (mg/kg)	195.00	41.99	143 - 257	250.46	68.44	173 - 394
N-orgánico (mg/kg)	13,037.67	2223.19	9567-15765	5,194.78	1980.46	1,319 - 6272
Nitratos (mg/kg)	55.85	35.90	9.61-96.02	32.30	20.07	14.02 - 67.30
Nitritos (mg/kg)	3.39	1.64	1.715-5.244	1.29	0.49	0.83 - 1.862
Sulfatos (mg/kg)	3,617.20	2974.76	< 18 - 6,403	2,865.50	1132.59	< 18 - 3916
Fosfatos (mg/kg)	23.38	12.63	< 3.75 - 31.62	5.55		< 3.75 - 9.93
Carbono total (%)	10.02	1.48	7.81 - 12.07	5.54	0.28	4.92 - 5.84
<b>METALES</b>						
Aluminio (mg/kg)	82,336.33	6391.29	74,409 - 91255	88,392.22	5039.32	76391-93237
Hierro (mg/kg)	142.17	31.45	102 - 188	194.33	22.68	163-245
Manganeso (mg/kg)	40.58	14.10	22.43-65.18	17.15	2.20	14.32 - 21.28
Calcio (mg/kg)	22.83	13.36	7.986-42.784	5.81	6.37	< 0.17 - 19.59
Magnesio (mg/kg)	106.18	29.96	67.7 - 141.3	177.94	212.47	87.3-743
Potasio (mg/kg)	278.00	63.36	201- 348	372.89	52.29	313-477
Sodio (mg/kg)	314.53	86.26	220-470.6	222.09	42.64	161 - 294.7
<b>METALES PESADOS</b>						
Cobre (mg/kg)	11.36	2.47	8.69 - 14.0	13.94	0.66	13.12-15.06
Cromo (mg/kg)	< 2	< 2	< 2	2.86	0.53	2.21-3.58
Arsénico (mg/kg)	1.23	0.12	1.065-1.370	1.30	0.18	0.868 - 1.430
Cadmio (mg/kg)	0.21	0.25	< 0.010 - 0.565	0.17	0.07	< 0.01 - 0.203
Mercurio (mg/kg)	0.70	0.08	0.611 - 0.809	0.46	0.20	0.011 - 0.747
Níquel (mg/kg)	7.71	3.94	1.523 - 10.918	10.75	2.13	7.161-13.796
Plomo (mg/kg)	14.44	7.07	5.26-26.71	16.06	2.16	12.41-19.56
Titanio (mg/kg)	< 15		< 15	< 15		< 15
Zinc (mg/kg)	108.84	193.79	< 1 - 454.06	192.32	267.29	< 1 - 736.46
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>						
Coliformes fecales (NMP/g)	28,400.00	45981.52	2,000 - 110,000	3,666.67	1802.78	2000-7000
Salmonella sp. (NMP/g)	23.00	0.00	23.00	416.67	515.06	11-1100
Huevos de helminto (HH/2g)	0.60	0.89	0-2	3.44	1.01	2-5



En el caso de los parámetros microbiológicos determinados en las muestras de lodos de espesadores colectadas en época de estiaje (tabla 3.2) y en época de lluvias (tabla 3.3) se obtuvo una variabilidad muy significativa de los resultados para coliformes fecales obteniendo una diferencia del 80% mayor en época de estiaje. Debido a que existen múltiples factores que influyen en la cuantificación de estos parámetros, se considera necesario realizar un número más grande de muestreos para poder determinar los valores más adecuados que se pueden considerar como los más representativos de estos parámetros en los lodos de la planta potabilizadora en estudio.

La tabla 3.4 muestra una comparación de resultados de caracterización microbiológica del lodo de espesadores de la planta potabilizadora bajo estudio y la tabla 3.5 muestra una comparación de caracterización microbiológica de lodo de tarquinas y presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio con respecto a la normatividad nacional e internacional (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En particular, debido a que los estudios relacionados con la caracterización de lodos fisicoquímicos de plantas potabilizadoras son escasos, no existen criterios que permitan analizar esos valores. Sin embargo, el único estudio identificado en este proyecto (Goldbold, *et al.*, 2003) reporta un intervalo de coliformes totales de 30-30,000 NMP/mL lodo, el cual es muy amplio, lo cual permite suponer una gran variabilidad de datos, tal como se obtuvo en éste estudio.

Tabla 3.2. Parámetros estadísticos de las características microbiológicas de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, en época de estiaje (junio 2005).

Parámetro n = 3	promedio	desv. std	mediana	Media geométrica	intervalo	Desv. stand/ Prom.	Desv. stand/ mediana	Desv. stand/ Media geométrica
Coliformes fecales (NMP/g)	63,500	65760.93	63,500	43243.50	17000- 110000	1.03	1.03	1.52
<i>Salmonella</i> (NMP/g)	12	15.56	12	4.80	1-23	1.29	1.29	3.24
Huevos de helminto (HH/2g)	1.5	0.71	2	1.41	1-2	0.47	0.35	0.50

Tabla 3.3. Parámetros estadísticos de las características microbiológicas de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, en época de lluvias (agosto 2005).

Parámetro n = 2	promedio	desv. std	mediana	Media geométrica	intervalo	Desv. stand/ Prom.	Desv. stand/ mediana	Desv. stand/ Media geométrica
Coliformes fecales (NMP/g)	13,000	12727.92	13,000	9380.832	4000- 22000	0.98	0.98	1.35
<i>Salmonella</i> (NMP/g)	13	12.02	13	9.165	4-21	0.96	0.96	1.31
Huevos de helminto (HH/2g)	1.5	0.71	2	1.414	1-2	0.47	0.47	0.50

NMP= Número más probable.



Tabla 3.4. Comparación de resultados de caracterización microbiológica de lodo de espesadores de la planta potabilizadora en estudio con la normatividad nacional e internacional.

Parámetro	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos																	
	Planta potabilizadora en estudio		México			EEUU		CEE	Australia		Argentina		Sudáfrica					
			Clase			Clase			Clase		Clase		Clase					
	Estiaje	Lluvias	A	B	C	A	B		A	B	A	B	A	B	C			
<b>Coliformes fecales</b>	63,500 (NMP/g)	13,000 (NMP/g)	<1000 NMP/g base seca	<1000 NMP/g base seca	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP/g base seca	<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST	No existe legislación referida específicamente a lodos producidos por tratamiento de agua	<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST	<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST	Alto contenido					
<b>Huevos de helminto</b>	1.5 HH/2g	1.5 HH/2g	<1 huevos/g base seca	<10 huevos/g base seca	<35 huevos/g base seca	1 huevo/4 g base seca ST	15 huevos/g		1 huevo/4g base seca ST	15 huevos/g	1 huevo/4g base seca ST	15 huevos/g						
<b>Salmonella sp.</b>	12 (NMP/g)	13 (NMP/g)	<3 NMP/g base seca	<3 NMP/g base seca	<300 NMP/g base seca	3 NMP/4 g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g		3 NMP/4g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g	3 NMP/4 g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g						

CEE= Comunidad Económica Europea.

NMP= Número más probable.

UFC= Unidades formadoras de colonias.

ST= Sólidos totales.





Tabla 3.5. Comparación de resultados de caracterización microbiológica de lodo de tarquinas y presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio con la normatividad nacional e internacional.

Parámetro	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos													
	Planta potabilizadora en estudio	México			EEUU		CEE	Australia		Argentina		Sudáfrica		
		Clase			Clase		No existe legislación referida específicamente a lodos producidos por tratamiento de agua	Clase		Clase		Clase		
		Estiaje	A	B	C	A		B	A	B	A	B	A	B
<b>Coliformes fecales</b>	3,666.67 (NMP/g)	<1000 NMP/g base seca	<1000 NMP/g base seca	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP/g base seca	<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST		<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST	<1000 NMP/g base seca ST	≤ 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g base seca ST	Alto contenido		
<b>Huevos de helminto</b>	3.44 HH/2g	<1 huevos/g base seca	<10 huevos/g base seca	<35 huevos/g base seca	1 huevo/4 g base seca ST	15 huevos/g		1 huevo/4g base seca ST	15 huevos/g	1 huevo/4g base seca ST	15 huevos/g			
<b>Salmonella sp.</b>	416.67 (NMP/g)	<3 NMP/g base seca	<3 NMP/g base seca	<300 NMP/g base seca	3 NMP/4 g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g		3 NMP/4g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g	3 NMP/4 g base seca ST	10 <sup>3</sup> /g			

CEE= Comunidad Económica Europea.

NMP= Número más probable.

UFC= Unidades formadoras de colonias.

ST= Sólidos totales.



Los resultados de caracterización microbiológica de la tabla 3.4 muestran que los lodos provenientes de espesadores de la planta potabilizadora en estudio para legislación nacional pueden tener la clasificación C para coliformes fecales y *Salmonella*, excepto por huevos de helminto que obtiene una clasificación A. Internacionalmente, el lodo de espesadores obtiene una clasificación B para coliformes fecales y *Salmonella*, excepto clasificación A para huevos de helminto.

La tabla 3.5 muestra los resultados de caracterización microbiológica del lodo depositado (tarquinas y presa de lodos) obteniendo clasificación C para coliformes fecales y *Salmonella*, excepto clasificación B para huevos de helminto en el caso de normatividad nacional. Para normatividad internacional, el lodo depositado puede tener una clasificación B para todos los parámetros mencionados.

La tabla 3.6 muestra los resultados obtenidos del contenido de óxidos en muestras secas de lodos generados (sedimentadores y espesadores) y lodos depositados (tarquinas y presa de lodos) de la planta potabilizadora en estudio, en época de estiaje. Obteniendo que los principales óxidos contenidos en los lodos generados y depositados son  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  con aproximadamente el 33% del contenido total cada uno en lodos depositados, mientras que en lodos generados (obtienen el 20% de  $\text{SiO}_2$  con el 33% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en espesadores y el 33% de cada uno en sedimentadores), seguido del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con el 4% y el  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  con menos del 1% del contenido total cada uno en lodos generados y depositados.

La tabla 3.7 muestra los resultados obtenidos del contenido de óxidos de lodos de espesadores (muestras E4.1 a E4.4) y del fondo de sedimentadores (S4.1 a S4.3) de la planta potabilizadora en estudio, en época de lluvias. Obteniendo que los principales óxidos contenidos en los lodos generados son  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  con aproximadamente el 30% del contenido total cada uno, seguido del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con el 4.6% y el  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  con menos del 1% del contenido total cada uno.



Tabla 3.6. Contenido de óxidos en muestras secas de lodo generado y depositado de la planta potabilizadora en estudio (fecha de muestreo: 20 al 23 de junio de 2005), época de estiaje.

Clave	Descripción	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	P X C %	Suma %
T - 1.1	Muestra compuesta de punto 1 de Tarquina 1	35.288	0.541	29.636	4.977	0.281	0.799	0.973	0.668	0.504	0.381	24.52	98.57
T - 1.2	Muestra compuesta de punto 2 de Tarquina 1	32.631	0.447	31.979	4.571	0.342	0.59	0.678	0.368	0.409	0.424	25.91	98.35
T - 1.3	Muestra compuesta de punto 3 de Tarquina 1	33.5	0.484	31.895	4.954	0.297	0.593	0.658	0.402	0.431	0.424	26.13	99.77
T - 2.1	Muestra compuesta de punto 1 de Tarquina 2	33.981	0.461	32.562	4.987	0.355	0.598	0.627	0.425	0.45	0.392	25.58	100.42
T - 2.2	Muestra compuesta de punto 2 de Tarquina 2	33.237	0.453	32.019	4.632	0.357	0.596	0.599	0.381	0.427	0.356	26.27	99.33
T - 2.3	Muestra compuesta de punto 3 de Tarquina 2	31.924	0.446	30.566	4.692	0.264	0.55	0.523	0.373	0.421	0.346	28.83	98.94
P1	Muestra punto 1 de Presa de lodos	32.296	0.467	33.07	4.713	0.324	0.556	0.558	0.367	0.416	0.389	26.42	99.58
P2	Muestra punto 2 de Presa de lodos	32.052	0.463	34.054	4.64	0.338	0.581	0.576	0.399	0.415	0.413	26.22	100.18
P3	Muestra punto 3 de Presa de lodos	34.152	0.571	32.067	6.255	0.322	0.773	0.566	0.328	0.377	0.433	24.98	100.82
E1	Muestra de lodos de espesador Norte 1 y 2	19.093	0.189	35.314	3.293	0.756	0.4	0.565	0.207	0.215	0.7	38.43	99.16
E2	Muestra de Espesador Sur 1	19.581	0.197	31.154	3.626	0.891	0.466	0.676	0.217	0.235	0.779	41.35	99.17
E3	Muestra de Espesador Sur 1 y Norte 1	20.08	0.197	32.549	3.086	0.742	0.506	0.694	0.36	0.233	0.628	40.13	99.21
S1	Muestra de lodos de sedimentador E1	27.472	0.328	27.736	4.536	1.217	0.558	0.824	0.394	0.344	0.769	34.87	99.05
S2	Muestra de lodos de sedimentador D2	30.096	0.428	30.588	4.328	0.509	0.77	0.943	0.467	0.396	0.627	31.43	100.58
S3	Muestra de lodos de sedimentador D1	44.042	0.294	21.886	3.375	0.798	0.59	0.958	0.438	0.461	0.506	25.95	99.30

PXC= Pérdida por calcinación.



Tabla 3.7. Contenido de óxidos de lodos de espesadores (muestras E4.1 a E4.4) y de fondo de sedimentadores (S4.1 a S4.3) de la planta potabilizadora en estudio, época de lluvias (agosto de 2005).

Muestra	E4.1	E4.2	E4.3	E4.4	S4.1	S4.2	S4.3	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo	Intervalo
<b>Composición</b>													
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	29.45	31.1	28.95	29.23	30.57	31.22	24.49	29.29	2.30	29.45	31.22	24.49	24.49-31.22
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.296	0.349	0.313	0.317	0.42	0.442	0.28	0.35	0.06	0.317	0.442	0.28	0.28-0.442
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	32.22	30.43	33.73	33.47	29.57	29.64	34.59	31.95	2.07	32.22	34.59	29.57	29.57-34.59
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> t %</b>	4.46	4.71	4.29	4.34	5.34	5.2	4.13	4.64	0.47	4.46	5.34	4.13	4.13-5.34
<b>MnO %</b>	0.406	0.397	0.339	0.34	0.66	0.7	0.53	0.48	0.15	0.406	0.7	0.339	0.339-0.7
<b>MgO %</b>	0.51	0.51	0.484	0.473	0.57	0.555	0.439	0.51	0.05	0.51	0.57	0.439	0.439-0.57
<b>CaO %</b>	0.609	0.567	0.492	0.477	0.711	0.643	0.442	0.56	0.10	0.567	0.711	0.442	0.442-0.711
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.376	0.384	0.338	0.309	0.386	0.316	0.2	0.33	0.07	0.338	0.386	0.2	0.2-0.386
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.305	0.36	0.32	0.318	0.416	0.404	0.259	0.34	0.06	0.32	0.416	0.259	0.259-0.416
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.571	0.528	0.494	0.497	0.622	0.579	0.565	0.55	0.05	0.565	0.622	0.494	0.494-0.622
<b>P X C %</b>	30.8	30.2	30.2	30.4	31.18	30.7	34.2	31.10	1.41	30.7	34.2	30.2	30.2-34.2

PXC= Pérdida por calcinación.

E4.1= Muestra de Espesador Sur 1.

E4.2= Muestra de Espesador Sur 2.

E4.3= Muestra de Espesador Norte 1.

E4.4= Muestra de Espesador Norte 2.

S4.1 =Muestra de lodos de sedimentador E1 (Influyente).

S4.2 =Muestra de lodos de sedimentador E1 (Medio).

S4.3 =Muestra de lodos de sedimentador E1 (Efluyente).



Las tablas 3.8 y 3.9 presentan, respectivamente en época de estiaje y de lluvias, el contenido de óxidos y los parámetros estadísticos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio. De manera adicional, la tabla 3.10 presenta el contenido de óxidos de lodos almacenados (tarquinas y presa de lodos) en época de estiaje.

Tabla 3.8. Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje (junio de 2005).

n = 3	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Intervalos	Relación desv. std/promedio	Relación desv. std/mediana
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	19.58	0.49	19.58	19.09-20.08	0.03	0.03
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.19	0.005	0.20	0.19-0.20	0.02	0.02
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	33.01	2.12	32.55	31.15-35.31	0.06	0.07
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> %</b>	3.34	0.27	3.29	3.09-3.63	0.08	0.08
<b>MnO %</b>	0.80	0.08	0.76	0.74-0.89	0.10	0.11
<b>MgO %</b>	0.46	0.05	0.47	0.40-0.51	0.12	0.11
<b>CaO %</b>	0.65	0.07	0.68	0.57-0.69	0.11	0.10
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.26	0.09	0.22	0.21-0.36	0.33	0.39
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.23	0.01	0.23	0.22-0.24	0.05	0.05
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.70	0.08	0.70	0.63-0.78	0.11	0.11
<b>P X C %</b>	39.97	1.47	40.13	41.35	0.04	0.04

PXC= Pérdida por calcinación.

Tabla 3.9. Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, época de lluvias (agosto de 2005).

n = 4	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Intervalos	Relación desv. std/promedio	Relación desv. std/mediana
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	29.68	0.97	29.34	28.95-31.1	0.03	0.03
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.32	0.02	0.315	0.296-0.349	0.07	0.07
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	32.46	1.51	32.845	30.43-33.73	0.05	0.05
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> %</b>	4.45	0.19	4.4	4.29-4.71	0.04	0.04
<b>MnO %</b>	0.37	0.04	0.3685	0.339-0.406	0.10	0.10
<b>MgO %</b>	0.49	0.02	0.497	0.473-0.51	0.04	0.04
<b>CaO %</b>	0.54	0.06	0.5295	0.477-0.609	0.12	0.12
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.35	0.03	0.357	0.309-0.384	0.10	0.10
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.33	0.02	0.319	0.305-0.36	0.07	0.07
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.52	0.04	0.5125	0.494-0.571	0.07	0.07
<b>P X C %</b>	30.40	0.28	30.3	30.2-30.8	0.01	0.01

PXC= Pérdida por calcinación.

En primer lugar hay que resaltar la baja dispersión de los resultados obtenidos para las tres muestras colectadas en los espesadores. En efecto, en general, las desviaciones estándar para cada tipo de óxido presentan valores significativamente menores con respecto de los promedios y medianas; estos últimos parámetros presentan entre sí una diferencia menor al 1% lo cual también es un buen indicativo de la baja dispersión de resultados entre las muestras colectadas en los espesadores.



Sin embargo, a pesar de esto, los lodos de la planta potabilizadora en estudio presentan contenidos de óxidos muy similares a los reportados por Pan, *et al.*, (2004) para lodos deshidratados de una planta potabilizadora instalada en Taiwán. Lo anterior confirma de alguna manera la validez de los análisis de óxidos realizados para las muestras de lodos de la planta potabilizadora bajo estudio.

Tabla 3.10. Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de tarquinas y presa de lodos de la planta potabilizadora en estudio, época de estiaje (junio de 2005).

n = 9	Promedio	Desv. estándar	Mediana	Intervalos	Relación desv. std/promedio	Relación desv. std/mediana
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	33.23	1.12	33.24	31.92-35.29	0.03	0.03
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.48	0.04	0.46	0.45-0.57	0.08	0.08
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	31.98	1.29	32.02	29.64-34.05	0.04	0.04
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> %</b>	4.94	0.52	4.71	4.57-6.26	0.10	0.11
<b>MnO %</b>	0.32	0.03	0.32	0.26-0.36	0.09	0.09
<b>MgO %</b>	0.63	0.09	0.59	0.55-0.80	0.14	0.15
<b>CaO %</b>	0.64	0.13	0.60	0.52-0.97	0.20	0.21
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.41	0.10	0.38	0.33-0.67	0.24	0.26
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.43	0.03	0.42	0.38-0.50	0.06	0.07
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.40	0.03	0.39	0.35-0.43	0.07	0.07
<b>P X C %</b>	26.10	1.21	26.13	24.52-28.83	0.04	0.04

PXC= Pérdida por calcinación.

Lo anterior permite concluir que los resultados de las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 son estadísticamente aceptables. La comparación de estos resultados con respecto a lo reportado en otros estudios de caracterización de lodos fisicoquímicos de plantas potabilizadoras, como se muestra en la tabla 3.11 permite determinar que puede haber diferencias significativas, las cuales son atribuidas al proceso de producción de lodos (características del agua cruda tratada, tipo de coagulante, entre otros factores).



Tabla 3.11. Comparación del contenido de óxidos en lodos de la planta potabilizadora en estudio con respecto a valores reportados para otro tipo de lodos.

Composición	Lodos de espesadores planta potabilizadora en estudio (junio 2005) n=3				Titshall y Hughes, (2005), lodos de espesadores de potabilizadoras en Sudáfrica para aplicación en suelo n=6				Pan, et al., 2004, lodos deshidratados de potabilizadoras para elaboración de cemento en Taiwán n=3		
	Prom.	Desv. Estándar	Mediana	Intervalo	Prom.	Desv. Estándar	Mediana	Intervalo	Prom.	Desv. Estándar	Mediana
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	19.58	0.49	19.58	19.09-20.08	42.08	13.16	45.28	24.3-54.6	32.50	26.16	32.50
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.19	0.005	0.20	0.19-0.20	0.70	0.21	0.76	0.3-0.86			
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	33.01	2.12	32.55	31.15-35.31	18.40	7.92	20.07	8.7-29.1	30.00	8.49	30.00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t %</b>	3.34	0.27	3.29	3.09-3.63	21.21	18.45	13.10	4.8-53.8	4.00	2.83	4.00
<b>MnO %</b>	0.80	0.08	0.76	0.74-0.89	0.99	0.82	0.81	0.07-2.3			
<b>MgO %</b>	0.46	0.05	0.47	0.40-0.51	2.18	1.57	1.83	0.7-5.3	0.75	0.35	0.75
<b>CaO %</b>	0.65	0.07	0.68	0.57-0.69	11.65	20.38	3.78	1.55-53.2	1.54	2.07	1.54
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.26	0.09	0.22	0.21-0.36	0.40	0.17	0.43	0.15-0.61	0.55	0.49	0.55
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.23	0.01	0.23	0.22-0.24	1.66	0.79	1.67	0.8-2.98	2.00	1.41	2.00
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.70	0.08	0.70	0.63-0.78	0.28	0.15	0.31	0.09-0.47			
<b>P X C %</b>	39.97	1.47	40.13	38.43-41.35	35.42	12.19	32.32	23.91-55.28			

PXC= Pérdida por calcinación.



Una vez que se determinó la validez de estos resultados, se procedió a realizar una comparación del contenido de óxidos entre las muestras colectadas en los espesadores en época de estiaje y en época de lluvias y, entre los espesadores y los lodos almacenados para determinar si la diferencia entre cada una es significativa debido a que lo anterior tendría también un impacto sobre su aprovechamiento para elaborar materiales de construcción. La tabla 3.12 muestra la comparación de contenido de óxidos en lodo de espesadores en las diferentes épocas de muestreo.

Tabla 3.12. Parámetros estadísticos del contenido de óxidos de los lodos de espesadores de la planta potabilizadora en estudio, en época de estiaje (junio 2005) y de lluvias (agosto 2005).

Contenido	Lodos espesadores (época estiaje) n=3			Lodos espesadores (época lluvias) n=4		
	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Promedio	Desviación estándar	Mediana
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	19.58	0.49	19.58	29.68	0.97	29.34
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.19	0.005	0.20	0.32	0.02	0.32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	33.01	2.12	32.55	32.46	1.51	32.84
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> %</b>	3.34	0.27	3.29	4.45	0.19	4.4
<b>MnO %</b>	0.80	0.08	0.76	0.37	0.04	0.37
<b>MgO %</b>	0.46	0.05	0.47	0.49	0.02	0.49
<b>CaO %</b>	0.65	0.07	0.68	0.54	0.06	0.53
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.26	0.09	0.22	0.35	0.03	0.36
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.23	0.01	0.23	0.33	0.02	0.32
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.70	0.08	0.70	0.52	0.04	0.51
<b>P X C %</b>	39.97	1.47	40.13	30.40	0.28	30.3

PXC= Pérdida por calcinación.

Como se puede observar en la tabla 3.12 hay diferencias significativas (entre 25% y 100%) del contenido de óxidos en la mayoría de elementos, con excepción de aluminio y magnesio, para los lodos de espesadores colectados en época de estiaje, con respecto a los de la época de lluvias. Estas diferencias presentan dos tendencias, la primera en la que se observa un aumento del contenido de óxidos (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O) y la segunda en la que se observa una disminución de contenido (MnO, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y PXC).

El aumento y disminución de estos óxidos en época de lluvias, con respecto a la de estiaje, se debe a un mayor arrastre de material en suspensión, en particular de arenas, las cuales se constituyen de silicatos de sodio, de potasio, de hierro y de titanio.





La tabla 3.13 muestra una comparación de contenido metales de lodos generados y lodos almacenados de la planta en estudio con respecto a otros lodos utilizados para elaborar ladrillos y cementantes, en los resultados se observa que los lodos de otros estudios presentan diferencias significativas en comparación a los lodos de la planta potabilizadora en estudio, en cuanto al contenido de metales, debido a que los lodos de Singapur y Taiwán provienen de un tratamiento de agua residual, mientras que los lodos de la planta potabilizadora en estudio provienen de un proceso de potabilización. Los lodos de agua residual, al ser estabilizados e incinerados, eliminan la materia orgánica contenida en ellos y la composición se asemeja un poco a los lodos de planta potabilizadora. La composición de metales de los lodos de Singapur y Taiwán es mayor a la de la planta bajo estudio, a excepción del aluminio, esto se debe básicamente al tipo de agua y a la dosis de químicos utilizada. A pesar de que el contenido de metales pesados es mayor en los lodos provenientes del tratamiento de agua residual, Pan y Tseng, (2001), y Tay, et al., (2002), reportan que estos lodos han presentado las características fisicoquímicas adecuadas para la elaboración de materiales cementantes y para la fabricación de ladrillos.

La tabla 3.14 presenta el contenido de óxidos de los lodos de la planta potabilizadora en estudio en comparación con lodos generados en plantas de Taiwán que han sido utilizados para elaborar ladrillos y cemento. Las características observadas en ambas tablas hacen suponer que el lodo de la planta en estudio presenta las características adecuadas para elaborar el mismo tipo de productos.

La tabla 3.15 muestra una comparación de la composición de la tierra empleada para la elaboración de adobes con respecto a los lodos de la planta potabilizadora en estudio.



Tabla 3.13. Comparación del contenido de metales de lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora en estudio, respecto a otros lodos utilizados para fabricar ladrillos y cementantes.

PARÁMETROS	Lodo de planta potabilizadora bajo estudio (Ingen-UNAM, 2005)				Cenizas de lodo residual en Singapur para elaboración de ladrillos y cementantes		Cenizas de lodo residual para elaboración de ladrillos, cementos y tejas en Taiwán			
	Este estudio				(Tay, et al., 2002)		(Pan y Tseng, 2001)			
	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Intervalos	Promedio	Intervalos	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Intervalos
<b>METALES</b>	n = 15				n=2		n = 4			
Aluminio (mg/kg)	85,969.57	6,207.29	87,291.00	74,409 - 93,237	50,300.00	42,300-55,900				
Hierro (mg/kg)	173.47	36.70	181.00	102 - 245	80,600.00	80,000-81,300				
Manganeso (mg/kg)	26.52	14.66	19.39	14.32 - 65.18	1,100.00	800-1,500	482.50	37.75	480.00	440-530
Calcio (mg/kg)	13.11	12.92	8.81	< 0.170 - 42.784	29,200.00	25,000-31,000				
Magnesio (mg/kg)	149.24	165.66	107.00	67.7 - 140	7,900.00	7,700-7,900				
Potasio (mg/kg)	334.93	72.88	348.00	201- 477	6,100.00	5,800-6,400				
Sodio (mg/kg)	259.07	76.77	235.50	161 - 470.6	2,500.00	2,200-3,000				
<b>METALES PESADOS</b>										
Cobre (mg/kg)	12.91	2.04	13.82	8.69 - 15.06	18,800.00	18,400-19,300	952.50	295.00	1,100.00	510-1,100
Cromo (mg/kg)	2.86	0.53	2.89	< 2 - 3.58	3,000.00	2,800-3,200	467.50	226.03	565.00	130-610
Arsénico (mg/kg)	1.27	0.16	1.31	0.868 - 1.430			19.75	4.99	21.00	13-24
Cadmio (mg/kg)	0.19	0.16	0.20	< 0.010 - 0.565						
Mercurio (mg/kg)	0.55	0.20	0.58	0.011 - 0.809						
Níquel (mg/kg)	9.54	3.24	9.98	1.523 - 13.423	1,300.00	1,200-1,600	575.00	323.78	725.00	90-760
Plomo (mg/kg)	15.41	4.60	15.27	10.98 - 19.56	2,500.00	2,400-2,800	182.50	5.00	180.00	180-190
Titanio (mg/kg)	<15			< 15						
Zinc (mg/kg)	160.21	236.60	46.30	< 1 - 736.46	26,800.00	26,400-27,200	2,725.00	150.00	2,700.00	2,600-2,900



Tabla 3.14. Comparación de contenido de óxidos de lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora en estudio, respecto a otros utilizados para fabricar ladrillos y cementantes.

	Lodos frescos Planta Potabilizadora en estudio (2005)				Pan, <i>et al.</i> , (2004), lodos deshidratados de potabilizadoras para elaboración de cemento en Taiwán			Pan y Tseng, (2001), ceniza de lodo residual para elaboración de ladrillos y cemento en Taiwán			
Composición	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Intervalos	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Promedio	Desv. Estándar	Mediana	Intervalos
	n=15				n=3			n=4			
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	30.63	6.69	32.30	19.09-44.04	32.50	26.16	32.50	49.55	6.12	50.40	41.3-56.1
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.40	0.13	0.45	0.19-0.57							
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	31.14	3.12	31.98	21.8-35.3	30.00	8.49	30.00	14.00	2.01	13.75	12-16.5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t %</b>	4.44	0.82	4.63	3.1-6.3	4.00	2.83	4.00	7.75	0.70	7.70	7.1-8.5
<b>MnO %</b>	0.52	0.29	0.36	0.26-1.22							
<b>MgO %</b>	0.60	0.11	0.59	0.4-0.8	0.75	0.35	0.75	1.73	0.40	1.60	1.4-2.3
<b>CaO %</b>	0.69	0.16	0.66	0.5-0.97	1.54	2.07	1.54	2.78	1.69	2.00	1.8-5.3
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.39	0.11	0.38	0.21-0.67	0.55	0.49	0.55	0.30	0.04	0.32	0.23-0.32
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.38	0.09	0.42	0.22-0.78	2.00	1.41	2.00	1.80	0.18	1.80	1.6-2.0
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> %</b>	0.50	0.15	0.42	0.35-0.78				3.48	3.35	1.85	1.7-8.5



Tabla 3.15. Comparación de tierra para elaborar adobes con lodo de la planta potabilizadora en estudio.

Tierra	Composición tierra para elaborar adobes	Lodo espesadores-sedimentadores	Lodo de presa de lodos-tarquinas
Arcilla	10-20%	17.12%	20.2%
Limo	15-25%	26%	32.64%
Arena	55-70%	56.16%	46.83%

La composición del lodo de la planta potabilizadora en estudio es muy similar a la de la tierra para la elaboración de adobes, por lo que se emplearán lodos de tarquinas ya que el lodo de espesadores tiene un alto contenido de humedad.

### 3.1.2 Estimación de la producción de lodos

Los lodos generados en la etapa de sedimentación son de dos tipos: Los sedimentados que son succionados por el sistema Clarivac de cada sedimentador, para ser enviados a espesadores y los que se depositan o acumulan en el fondo de sedimentadores. Esta estimación se realizó mediante un balance de materia en sedimentadores.

Partiendo de la expresión general de balance materia (Ec. 3.1) para un reactor a régimen continuo (sin reacción química):

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación} \dots \text{ (Ec. 3.1)}$$

En términos de las corrientes de entrada y salida de un sedimentador de la planta en estudio (figura 3.1), la ecuación 3.1 se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Corriente 1} &= \text{Corriente 2} + \text{Corriente 3} + \text{Corriente 4} \dots \text{ (Ec. 3.2)} \\ \text{Influyente} &= \text{Efluente} + \text{Lodos acumulados} + \text{Lodos succionados por sistema} \\ &\quad \text{Clarivac} \end{aligned}$$

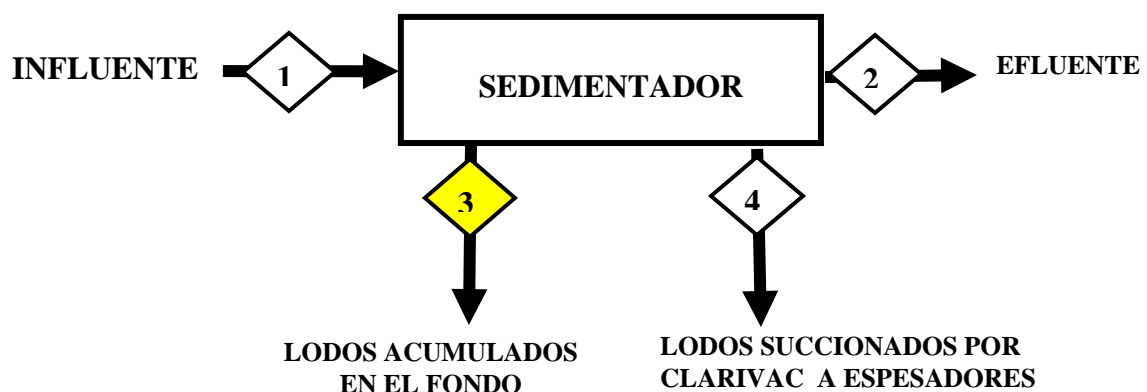


Figura 3.1 Diagrama de bloques utilizado para establecer el balance de materia en un sedimentador de la planta potabilizadora en estudio.



Incorporando a la Ec. 3.2 el contenido de Sólidos Suspendidos Totales (SST) presentes en cada corriente y, tomando como base de cálculo un mes (30 días), que es el tiempo transcurrido entre cada lavado de sedimentadores (dato proporcionado por personal de la planta potabilizadora en estudio), así como el número total de sedimentadores igual a 20, se tiene:

$$MSST_{SI} = MSST_{SE} + MSST_{LAS} + MSST_{LSS} \dots \text{ (Ec. 3.3)}$$

Donde:

$MSST_{SI}$  = Flujo másico de sólidos suspendidos totales del influente de sedimentadores, en kg/mes.

$MSST_{SE}$  = Flujo másico de sólidos suspendidos totales del efluente de sedimentadores, en kg/mes.

$MSST_{LAS}$  = Flujo másico de sólidos suspendidos totales de lodos acumulados en los sedimentadores, en kg/mes.

$MSST_{LSS}$  = Flujo másico de sólidos suspendidos totales de lodos succionados por Clarivac en los sedimentadores, en kg/mes.

Las corrientes 1, 2 y 4 se pueden calcular en la ecuación 3.3, en términos del flujo volumétrico total mensual tratado en la planta en estudio y el contenido de sólidos totales, de cada una:

$$MSST_{SI} = Q_{SI} \text{ (m}^3\text{/s)} * SST_{SI} \text{ (g/L)} * 1000 \text{ L/m}^3 * \text{kg/1000 g} * 86,400 \text{ s/día} * 30 \text{ días/mes} \\ = \text{(kg/mes)}$$

$$MSST_{SE} = Q_{SE} \text{ (m}^3\text{/s)} * SST_{SE} \text{ (g/L)} * 1000 \text{ L/m}^3 * \text{kg/1000 g} * 86,400 \text{ s/día} * 30 \\ \text{días/mes} = \text{(kg/mes)}$$

$$MSST_{LSS} = Q_{LSS} \text{ (m}^3\text{/s)} * SST_{LSS} \text{ (g/L)} * 1000 \text{ L/m}^3 * \text{kg/1000 g} * 86,400 \text{ s/día} * 30 \\ \text{días/mes} = \text{(kg/mes)}$$

Donde:

$Q_{SI}$  = Flujo volumétrico del influente de sedimentadores o tratado por la planta potabilizadora en estudio = **17.24 m<sup>3</sup>/s** (dato histórico promedio, en época de estiaje, del período de operación 2003-2005, proporcionado por personal de la planta en estudio).

$Q_{LSS}$  = Flujo volumétrico de lodos succionados por Clarivac en sedimentadores =  $0.0427 \text{ m}^3\text{/s Clarivac} * 20 \text{ Clarivacs} = \mathbf{0.854 \text{ m}^3\text{/s}}$  (dato promedio de tres mediciones realizadas por personal de la planta potabilizadora en estudio)

$Q_{SE}$  = Flujo volumétrico del efluente del sedimentador, en m<sup>3</sup>/s (dato a calcular a partir de los flujos de influente y lodos succionados por el Clarivac) =  $Q_{SI} - Q_{LAS} = 17.24 - 0.854 = \mathbf{16.386 \text{ m}^3\text{/s}}$

$SST_{SI}$  = Sólidos Suspendidos Totales en el influente de sedimentadores = **0.0235 g/L** (dato promedio calculado a partir de 24 análisis de muestras diferentes, realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM: tres muestras por día colectadas en cuatro sedimentadores, uno de los módulos C, D, E y F, en dos días de muestreo en época de estiaje, ver anexo G).

$SST_{SE}$  = Sólidos Suspendidos Totales en el efluente de sedimentadores = **0.0055 g/L** (dato promedio calculado a partir de 24 análisis de muestras diferentes, realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM: Tres muestras por día colectadas en cuatro sedimentadores, uno de los módulos C, D, E y F, en dos días de muestreo en época de estiaje, ver anexo G)



$SST_{LAS}$  = Sólidos Totales en lodos succionados por el sistema Clarivac de sedimentadores = **0.252 g/L** (dato promedio calculado a partir de 4 análisis realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM. En dos sedimentadores, uno del módulo D y otro del E en dos días de muestreo en época de estiaje)

Despejando el flujo másico de lodos acumulados de la Ec. 3.3 y substituyendo los valores correspondientes a cada término se tienen los siguientes resultados (tabla 3.16):

En la época de lluvias (agosto de 2005) se realizó un segundo muestreo para estimar la producción de lodos en la etapa de sedimentación de la planta potabilizadora en estudio. Se calcularon los valores promedio medidos (utilizando más del 90% de datos) de 12 muestras de influente, efluente y Clarivac (anexo G). Aplicando las mismas ecuaciones del balance de materia, en términos de sólidos suspendidos totales, se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 3.17):

Tabla 3.16. Balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la planta potabilizadora en estudio (acumulados en el sedimentador y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de estiaje (junio 2005).

DATOS	CLAVE	UNIDAD	VALOR	PORCENTAJE DE SÓLIDOS CON RESPECTO AL INFLUENTE (%)	PORCENTAJE DE SÓLIDOS CON RESPECTO A LA GENERACIÓN DE LODOS (%)
Flujo influente	$Q_{SI}$	$m^3/s$	17.240	100	-
Concentración promedio SST en influente	$SST_{SI}$	$kg/m^3$	0.0235		
Flujo másico SST en influente	$MSST_{SI}$	kg/mes	1,050,122.880		
Flujo efluente	$Q_{SE}$	$m^3/s$	16.386	22,24	-
Concentración promedio SST en efluente	$SST_{SE}$	$kg/m^3$	0.0055		
Flujo másico SST en efluente	$MSST_{SE}$	kg/mes	233,598.816		
Flujo Clarivac	$Q_{LSS}$	$m^3/s$	0.854	53.12	68.32
Concentración promedio SST en Clarivac	$SST_{LSS}$	$kg/m^3$	0.252		
Flujo másico SST en Clarivac	$MSST_{LSS}$	kg/mes	557,819.136		
Lodos acumulados en sedimentadores	$MSST_{LAS}$	kg/mes	258,704.928	24.64	31.68
			<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>



Los resultados de la tabla 3.16 muestran que, en temporada de estiaje, cerca del 25% del total de lodos generados se acumulan en el sedimentador, mientras que el 53 % es conducido hacia espesadores y un 22% de los sólidos sale en el efluente. Este último dato revela que la eficiencia de los sedimentadores está dentro de los valores recomendados (70-80%).

Tabla 3.17. Balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la planta potabilizadora en estudio (acumulados en el sedimentador y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de lluvias (agosto 2005).

DATOS	CLAVE	UNIDAD	VALOR	PORCENTAJE DE SÓLIDOS CON RESPECTO AL INFLUENTE (%)	PORCENTAJE DE SÓLIDOS CON RESPECTO A LA GENERACIÓN DE LODOS (%)
Flujo influente	$Q_{SI}$	$m^3/s$	17.870	100	-
Concentración promedio SST en influente	$SST_{SI}$	$kg/m^3$	0.026		
Flujo másico SST en influente	$MSST_{SI}$	kg/mes	1,204,295.040		
Flujo efluente	$Q_{SE}$	$m^3/s$	17.016	25.64	-
Concentración promedio SST en efluente	$SST_{SE}$	$kg/m^3$	0.007		
Flujo másico SST en efluente	$MSST_{SE}$	kg/mes	308,738.304		
Flujo Clarivac	$Q_{LSS}$	$m^3/s$	0.854	36.03	48.45
Concentración promedio SST en Clarivac	$SST_{LSS}$	$kg/m^3$	0.196		
Flujo másico SST en Clarivac	$SST_{LSS}$	kg/mes	433,859.328		
Lodos acumulados en sedimentadores	$MSST_{LAS}$	kg/mes	461,697.408	38.33	51.55
			<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Los resultados del balance de materia en temporada de lluvia, el porcentaje de lodos generados que se acumulan en el sedimentador aumenta a 40% del total, mientras que el 36 % es conducido hacia espesadores y un 25% de los sólidos sale en el efluente, manteniendo la eficiencia de los sedimentadores.

Los porcentajes de lodos acumulados en los sedimentadores tanto en época de estiaje y lluvia, 24.64 y 38.33% respectivamente, revelan que los sistemas de evacuación de los lodos no está siendo eficientes, esto puede deberse a que los flóculos no están bien formados y el clarivac succiona una mayor cantidad de agua o porque el sistema no alcanza a succionar el lodo depositado en el fondo.



### 3.2 Resultados de pruebas de elaboración de mezclas cementantes

En las tablas 3.18 a la 3.21 se obtuvieron los siguientes resultados en la elaboración de especímenes:

En base a los resultados de resistencia a la compresión, las mezclas binarias elaboradas con lodo-cemento (90-10%) y lodo-cal (90-10%) presentan los mejores resultados. Estas mezclas presentaron valores comprendidos en un intervalo de 85-154 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe señalar que a mayor concentración de lodo, la resistencia a la compresión aumentó.

La mejor mezcla ternaria fue la compuesta por lodo-yeso-cemento (90-5-5%), obteniendo una resistencia a la compresión comprendida en un intervalo de 80-110 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe señalar que al igual que las mezclas binarias a mayor concentración de lodo, la resistencia a la compresión aumentó.

Con respecto a la densidad, los resultados generados fueron aceptables para las mejores mezclas. Obteniendo resultados en un intervalo de 1.3-1.55 g/cm<sup>3</sup>, respecto a los resultados de los especímenes de referencia de 100% mortero de 1.58 g/cm<sup>3</sup>.

Los resultados obtenidos para la propiedad denominada fluidez fueron aceptables para las mejores mezclas, obteniendo resultados en el intervalo 12-25% de fluidez. Estos valores corresponden a las recomendaciones para morteros y concretos de relleno propuestas por la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, las cuales recomiendan elaborarlos con la cantidad de agua mínima necesaria para obtener una pasta manejable.

Los resultados obtenidos para contracción por secado fueron desfavorables, ya que el porcentaje de contracción por secado aumenta al incrementarse la concentración de lodo en las mezclas, obteniendo una contracción por secado en el intervalo de 0-87%.

Cabe señalar que los especímenes elaborados con el 100% de lodo de la planta potabilizadora en estudio presentó el mejor resultado de resistencia a la compresión (146-168 kg/cm<sup>2</sup>), con una contracción por secado alta (84%).





Tabla 3.18. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas binarias lodo-cemento y lodo-cal.

Mezcla binaria		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Fluidez %	RC (14 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	RC (28 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	CXS %
Lodo %	Cemento %					
100	0	1.54	20.25	168.09	146.83	84.39
90	10	1.33	12.81	91.11	110.97	84.39
90	10	1.35		115.56	153.64	
75	25	1.26	16.37	38.32	47.31	22.13
75	25	1.28		56.64	62.22	
40	60	0.69	4.37	4.07	3.17	22.13
40	60	0.67		3.70	2.26	
25	75	0.72	7.12	1.2	0.8	5.88
25	75	0.8		1.25	0.8	
0	100	2.01	58.19	617.2	689.2	11.1
0	100	2.05		682.8	670	
Lodo %	Cal %					
90	10	1.42	24.62	84.66	144.13	86.54
90	10	1.51		123.72	130.10	
75	25	1.05	29.5	32.77	27.62	61.88
75	25	0.9		31.19	27.68	
40	60	0.52	26.5	1.36	1.89	16.94
40	60	0.48		1.81	1.85	
25	75	0.6	36.25	3.17	3.40	16.94
25	75	0.63		3.17	3.40	
0	100	0.94	58	5.2	6.66	18.07
0	100	0.93		5.2	7.76	

RC= Resistencia a la compresión.  
CXS= Contracción por Secado.

**N.D.** Espécimen No Determinado  
Espécimen presenta fisuras  
Mejores mezclas



Tabla 3.19. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas binarias lodo-yeso y lodo-mortero.

Mezcla binaria		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Fluidez %	RC (14 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	RC (28 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	CXS %
Lodo %	Yeso %					
90	10	1.48	2.69	100	94.44	79.12
90	10	1.43		92.77	82.22	
75	25	1.54	2.62	100.59	98.86	74.60
75	25	1.51		74.22	100.94	
40	60	1.29	1.12	47.30	57.92	66.68
40	60	1.25		35.29	70.63	
25	75	1.07	24.5	15.63	25.64	57.26
25	75	1.10		13.13	21.47	
0	100	0.74	N.D.	15.60	8.70	0
0	100	0.78		19.60	8.98	
% Lodo	% Mortero					
90	10	1.35	12.69	93.94	56.65	83.06
90	10	1.49		94.39	150.79	
75	25	1.53	17.31	72.22	98.21	80.49
75	25	1.19		N.D.	95.12	
40	60	1.15	19.5	11.90	8.53	64.97
40	60	1.10		13.07	10.51	
25	75	0.88	13.12	3.32	3.25	36.39
25	75	0.85		2.77	2.70	
0	100	1.58	73.44	198.80	179.6	0
0	100	1.61		201.2	162.8	

RC= Resistencia a la compresión.  
CXS= Contracción por Secado.

N.D.	Especimen No Determinado
	Especimen presenta fisuras
	Mejores mezclas



Tabla 3.20. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas ternarias lodo-yeso-cemento, lodo-yeso-cal y lodo-cal-cemento.

Mezcla ternaria			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Fluidez %	RC (14 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	RC (21 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	CXS %
Lodo %	Yeso %	Cemento %					
90	5	5	1.40	13.62	109.61	93.60	80.51
90	5	5	1.54		84.66	48.89	
75	12.5	12.5	1.36	5.19	76.10	58.89	79.82
75	12.5	12.5	1.40		80.86	47.31	
40	30	30	0.75	12.31	4.87	3.79	40.83
40	30	30	0.71		4.33	4.38	
25	37.5	37.5	0.66	14.31	15.83	19.99	2
25	37.5	37.5	0.68		19.58	18.74	
Lodo %	Yeso %	Cal %					
90	5	5	1.41	16.13	63.49	N.D.	84.84
90	5	5	1.45		N.D.	N.D.	
75	12.5	12.5	1.37	15.31	60.34	N.D.	80.49
75	12.5	12.5	1.38		N.D.	N.D.	
40	30	30	0.63	19.93	2.96	3.62	27.1
40	30	30	0.70		3.03	3.54	
25	37.5	37.5	0.72	34.06	15.19	13.33	0
25	37.5	37.5	0.72		7.50	11.25	
Lodo %	Cal %	Cemento %					
90	5	5	1.38	20.94	30.65	98.21	84.24
90	5	5	1.53		134.92	N.D.	
75	12.5	12.5	1.24	23.06	51.11	42.53	79.84
75	12.5	12.5	1.31		55.56	44.00	
40	30	30	0.40	27	0.42	0.89	9.68
40	30	30	N.D.		N.D.	0.91	
25	37.5	37.5	0.58	37.56	4.49	4.08	0
25	37.5	37.5	0.62		5.20	4.58	

RC= Resistencia a la compresión.

CXS= Contracción por Secado.

N.D.	Espécimen No Determinado
	Espécimen presenta fisuras
	Mejores mezclas



Tabla 3.21. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas ternarias lodo-yeso-andesita, lodo-yeso-arena río.

Mezcla ternaria			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Fluidez %	RC (14 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	RC (21 días) (Kg/cm <sup>2</sup> )	CXS %
Lodo %	Yeso %	Andesita %					
40	30	30	1.25	4.81	40.11	28.55	68.58
40	30	30	1.25		40.66	33.74	
25	37.5	37.5	1.10	2.12	23.55	19.91	56.1
25	37.5	37.5	1.10		26.99	15.93	
Lodo %	Yeso %	Arena río %					
40	30	30	1.35	7.44	35.81	32.09	68.58
40	30	30	1.32		38.32	29.41	
25	37.5	37.5	1.16	0.62	19.57	20.78	61.36
25	37.5	37.5	1.12		19.72	18.89	

RC= Resistencia a la compresión.

CXS= Contracción por Secado.

N.D.	Espécimen No Determinado
■	Espécimen presenta fisuras
■	Mejores mezclas

La figura 3.2 presenta la grafica de resistencia a la compresión de especímenes versus composición de lodo en la mezcla binaria lodo-cemento, la cual muestra el comportamiento del lodo en la mezcla. Obteniendo como resultado que a mayor concentración del lodo en la mezcla, la resistencia a la compresión aumentó significativamente, siendo la mezcla lodo-cemento (90-10%) la primera de las mejores mezclas en base a la resistencia a la compresión.

La figura 3.3 presenta la grafica de resistencia a la compresión de especímenes versus composición de lodo en la mezcla binaria lodo-cal, la cual muestra el comportamiento del lodo en la mezcla. Obteniendo como resultado que, a partir del 60% de composición de lodo en la mezcla la resistencia a la compresión aumentó significativamente, siendo la mezcla lodo-cal (90-10%) la segunda mejor mezcla en base a la resistencia a la compresión.

La figura 3.4 presenta la grafica de resistencia a la compresión de especímenes versus composición de lodo en la mezcla ternaria lodo-yeso-cemento, la cual muestra el comportamiento del lodo en la mezcla. Obteniendo como resultado que, a partir del 40% de composición de lodo en la mezcla la resistencia a la compresión aumentó significativamente, siendo la mezcla lodo-yeso-cemento (90-5-5%) la tercer mejor mezcla en base a la resistencia a la compresión.

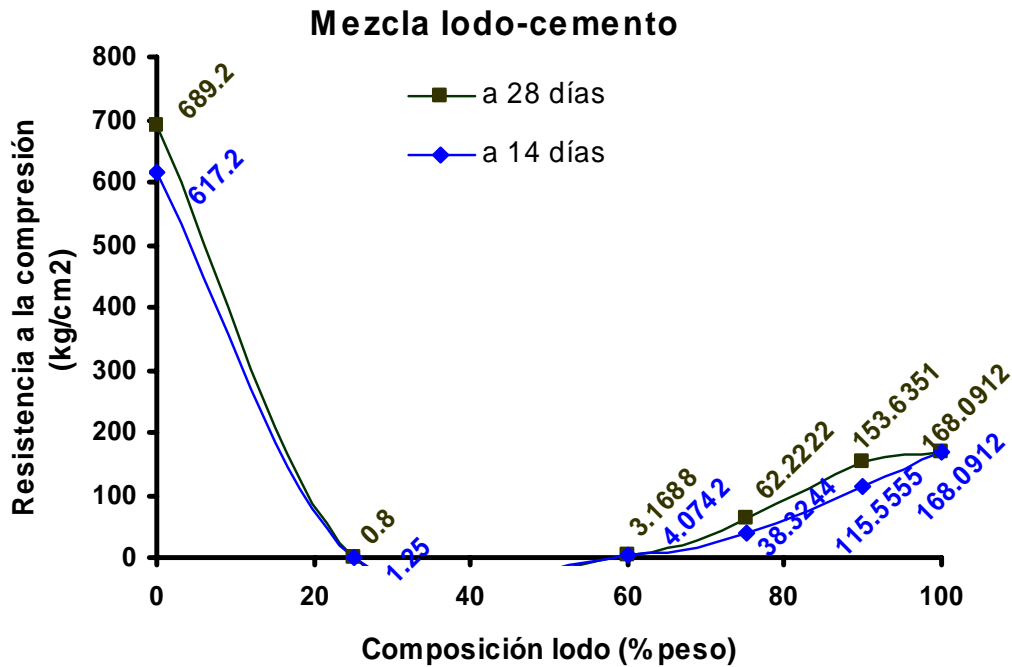


Figura 3.2. Resultados de resistencia a la compresión de mezcla lodo-cemento.

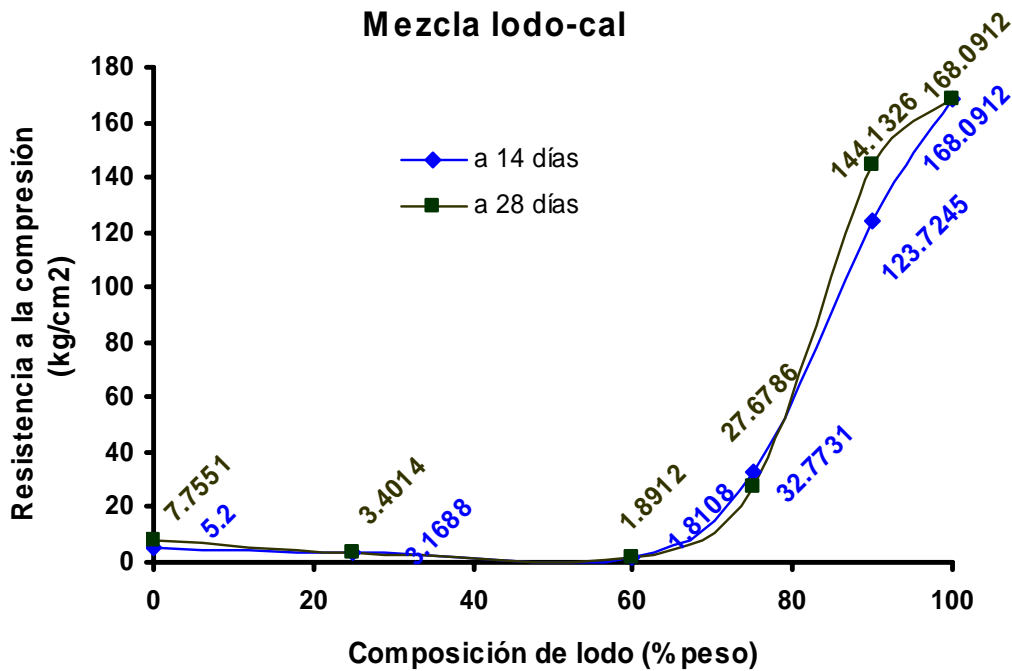
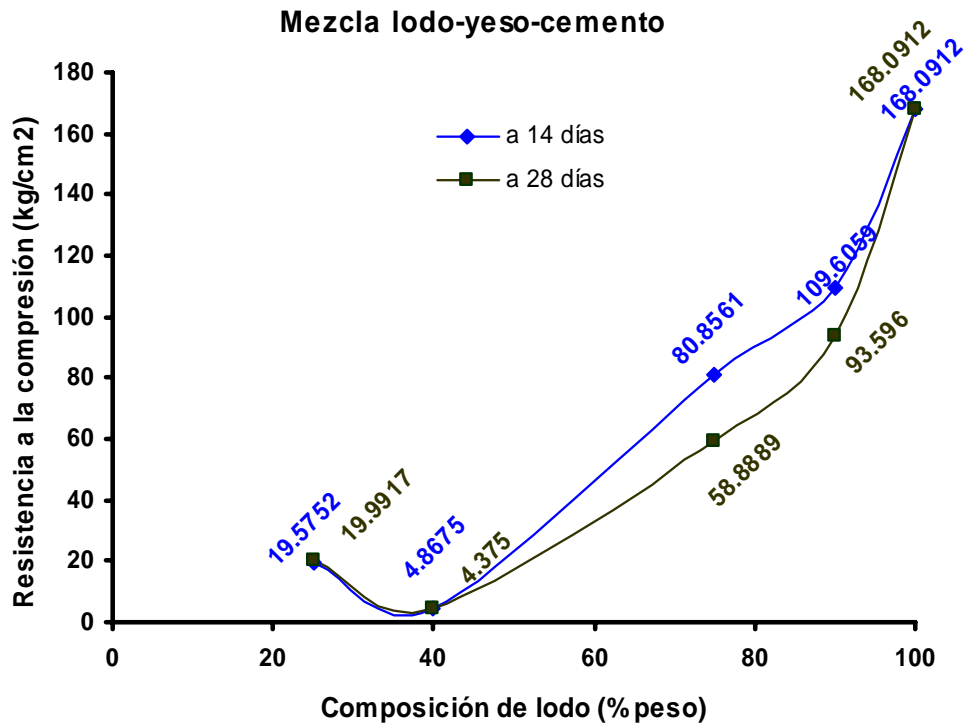


Figura 3.3. Resultados de resistencia a la compresión de mezcla lodo-cal.



**Figura 3.4. Resultados de resistencia a la compresión de mezcla lodo-yeso-cemento.**

En base a los resultados obtenidos en las tablas 3.18 a 3.21 se determinaron las mezclas binarias y ternarias que cumplen con el valor de resistencia a la compresión para la fabricación de morteros (tipo I, II, III) y concreto de relleno, propuesta por la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de mampostería (Colegio de Ingenieros Civiles, 2002).

En la tabla 3.22 se muestra una comparación de las mejores mezclas binarias y mezclas ternarias elaboradas a base de lodo en el laboratorio con respecto a las mezclas empleadas para la elaboración de morteros de cemento y mixtos propuesta en la norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de mampostería (Colegio Ingenieros Civiles, 2002).

La tabla 3.23 muestra una comparación de las mezclas binarias elaboradas a base de lodo con cal o yeso en el laboratorio con respecto a las mezclas empleadas para la elaboración de morteros de cal.

La tabla 3.24 muestra una propuesta de las mejores mezclas elaboradas en el laboratorio a base de lodo con materiales cementantes para la elaboración de concretos de relleno (Colegio Ingenieros Civiles, 2002).



Tabla 3.22. Equivalencias de mezclas elaboradas con lodo y materiales cementantes con respecto a la mezcla propuesta en la norma para fabricar morteros de cemento y de tipo mixto para mampostería.

Mezcla a base de lodo			Mortero equivalente (Colegio de Ingenieros Civiles, 2002)				
Composición	Relación partes (vol)	RC (kg/cm <sup>2</sup> )	Clasificación	Composición (partes en volumen)			RC (kg/cm <sup>2</sup> )
				Partes cemento	Partes cal	Partes arena	
90% lodo-10% cemento	1:6	91-153	I	1	0-0.25	2.25-3	125
75% lodo-25% cemento	1:2	38-62					
90% lodo-10% mortero	1:2.25-3:6	94-150					
75% lodo-25% mortero	1:2.25-3:3	72-98					
90% lodo-5% cal-5% cemento	1:0.5:12	98-134	II	1	0.25-0.5	2.25-3	75
75% lodo-12.5% cal-12.5% cemento	1:0.5:4	43-55					
90% lodo-5% yeso-5% cemento	1:0.72:12	84-110	III	1	0.5-1.25	2.25-3	40
75% lodo-12.5% yeso-12.5% cemento	1:0.72:4	47-80					

RC= Resistencia a la compresión.

Tabla 3.23. Comparación de mezclas elaboradas en laboratorio con respecto a mezclas empleadas para elaborar morteros de cal.

Relación Cal:Arena	RC (kg/cm <sup>2</sup> )	Mezcla		Relación (Partes en vol)	RC (kg/cm <sup>2</sup> )
		% Lodo	% Cal		
1:1	18	90	10	1:12	84-144
1:2	10	75	25	1:4	27-32
1:4	2	% Lodo	% Yeso		
		90	10	1:8.37	82-100
		75	25	1:2.79	74-100
		40	60	1:0.65	35-70

RC= Resistencia a la compresión.



Tabla 3.24. Propuesta de mezclas elaboradas con lodo y material cementante para fabricar concreto de relleno.

Mezcla a base de lodo			Concreto equivalente (Colegio de Ingenieros Civiles, 2002)				
Composición	Relación partes (vol)	RC (kg/cm <sup>2</sup> )	Composición (partes en volumen)				RC (kg/cm <sup>2</sup> )
			Partes cemento	Partes cal	Partes arena	Partes grava	
90% lodo- 10% cemento	1:6	91-153	1	0-0.1	2.25-3	1-2	125
90% lodo- 10% mortero	1:2.25-3:6	94-150					
90% lodo- 5% cal- 5% cemento	1:0.5:12	98-134					

RC= Resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos en la tabla 3.22 muestran que las mezclas binarias lodo-cemento (90-10%) y lodo-mortero (90-10%) cumplen con el valor propuesto para resistencia a la compresión para mortero tipo I (125 kg/cm<sup>2</sup>). La mezcla ternaria compuesta de lodo-cal-cemento (90-5-5%) cumple con el valor propuesto para resistencia a la compresión para mortero tipo II (75 kg/cm<sup>2</sup>). Las mezclas ternarias elaboradas de lodo-yeso-cemento (90-5-5% y 75-12.5-12.5%) cumplen con el valor propuesto para resistencia a la compresión para mortero tipo III (40 kg/cm<sup>2</sup>) substituyendo las partes de cal por yeso.

Los resultados obtenidos en la tabla 3.23 permiten determinar que las mezclas elaboradas con lodo-cal (90-10% y 75-25%) y lodo-yeso (90-10%, 75-25% y 40-60%) son aptas para la fabricación de morteros de cal y morteros de yeso. Ya que estos tipos de morteros son empleados para revestimientos entre otras aplicaciones y son menos resistentes que los morteros de cemento.

Los resultados que se presentan en la tabla 3.24 muestran que las mezclas binarias lodo-cemento (90-10%) y lodo-mortero (90-10%) junto con la mezcla ternaria lodo-cal-cemento (90-5-5%) cumplieron con el valor propuesto para la resistencia a la compresión (125 kg/cm<sup>2</sup>) para la fabricación de concreto de relleno. los resultados de resistencia a la compresión para estas mezclas binarias y ternaria aún no contienen agregado grueso (grava), por lo que se considera que al ser incluido puede mejorar los resultados de resistencia a la compresión.

Para este análisis de resultados el lodo de la planta potabilizadora en estudio fue considerado como sustituto de la arena para la producción de morteros y concreto de relleno. Cabe señalar, que las mezclas mencionadas en este análisis cumplen con el valor propuesto para resistencia a la compresión para la fabricación de morteros (tipo I, II, III) y concreto de relleno, propuesta por la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de mampostería (CIC, 2002), pero no cumple con las partes en volumen de arena.





### Elaboración de tabicones

Paralelamente a la evaluación de la opción de aprovechamiento de cementantes, se analizó la opción de elaboración de tabicones. Se contactó a una fábrica de tabicón cercana a la planta potabilizadora en estudio, donde se realizaron pruebas en las máquinas bloqueras de este sitio. Se partió de la formulación comercial y se procedió a realizar mezclas introduciendo el lodo almacenado en sustitución de tepojal, arena y agua (en el caso de lodo de espesadores). En la tabla 3.25 se presentan las mezclas con las que se elaboraron los tabicones, de acuerdo al procedimiento comercial.

La descripción del procedimiento para la elaboración de tabicones que se realizó en este estudio se presenta en la sección 1.3.2. La tabla 3.26 muestra los resultados preliminares obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión de tabicones.

Tabla 3.25. Mezclas propuestas para la elaboración de tabicones a base de lodo de la planta potabilizadora en estudio.

<b>Muestra</b>	<b>lodo (Kg)</b>	<b>Tepojal (Kg)</b>	<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Cal (Kg)</b>
1	20	30	0	0
2	20	30	5	0
3	20	55	5	0
4	10	30	0	5
5	20 L*	120	25	0

\* Lodo de espesadores.

Tabla 3.26. Resultados preliminares de resistencia a la compresión de tabicones elaborados a base de lodo de la planta potabilizadora en estudio.

<b>Muestra</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Comercial	11.6	40x12	19.5	9360	1.24	32.85
Comercial	12.2	40x12	19.5	9360	1.30	30.02
1	10.1	40x12	19	9120	1.11	5.81
1	10.2	40x12	19.5	9360	1.09	5.88
2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	10.6	40x12	19.5	9360	1.13	6.33
3	9.9	40x12	19.5	9360	1.06	6.27
4	8.2	40x12	19	9120	0.90	1.79
4	8.1	40x12	19.3	9264	0.87	1.71
5	10.4	40x12	19	9120	1.14	17.46
5	11	40x12	19.5	9360	1.18	17.10



Los resultados preliminares de la tabla 3.26 muestran que la mejor mezcla, en base a la resistencia a la compresión, fue la muestra 5 (120 kg tepojal, 25 kg cemento y 20 L de lodo de espesadores) obteniendo un valor de 17.46 kg/cm<sup>2</sup>, que comparado con la resistencia a la compresión de la muestra comercial se encuentra aproximadamente 50% por debajo del valor. Las mezclas en donde se utilizó lodo de tarquina presentaron resistencia a la compresión muy baja (hasta 90% menos que el tabicón comercial). Esto se atribuye a la poca cantidad de cemento agregado a las mezclas (muestras 1 a 4) que comparado con la mezcla para elaborar tabicones comerciales (muestra 5, excepto agua por lodo de espesadores), la cantidad de cemento fue demasiado baja. Debido a la producción de tabicones en la fábrica fue difícil continuar experimentando ya que por situaciones de tiempo de experimentación y falta de materias primas para elaborar tabicones sólo se experimentó con las muestras antes mencionadas. No obstante, la propuesta para mejorar las mezclas de la tabla 3.25 es agregar la cantidad adecuada de cemento a las concentraciones señaladas esperando minimizar la cantidad de cemento o incluso de tepojal con la finalidad de mejorar la calidad del tabicón y reducir los costos de producción de los mismos.

#### Elaboración de ladrillos (adobes tecnificados)

En la siguiente etapa de este estudio experimental se elaboraron ladrillos pequeños de 12x5x2.5 cm y ladrillos grandes de 24x12x2.5 cm de las mejores mezclas determinadas en base a las pruebas de laboratorio antes mencionadas, el procedimiento de elaboración de ladrillos se menciona en la sección 2.2 de este estudio, obteniendo los siguientes resultados:

#### Elaboración de ladrillos de mezcla lodo-cemento



Concentración: 90-10%

Ladrillos pequeños de 12x5x2.5 cm de dimensión

Estado: Mezcla fresca

Foto 3.1 Ladrillos mezcla lodo-cemento.



Concentración: 90-10%

Ladrillos pequeños de 7.4x3.1x1.6 cm de dimensión

CXS: 75.53%

Estado: Mezcla en consolidación

Foto 3.2 Ladrillos mezcla lodo-cemento.



Los resultados obtenidos en la fabricación de ladrillos grandes se presentan a continuación:

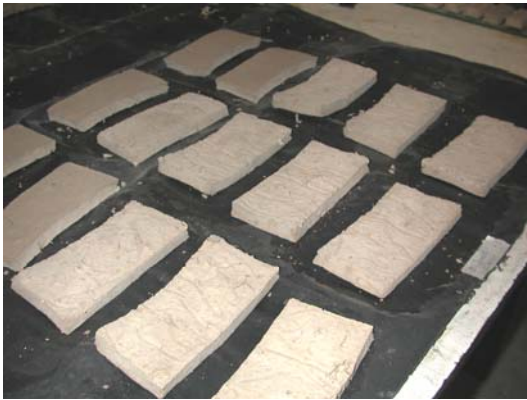


Concentración: 90-10%

Ladrillos grandes de 24x12x2.5 cm de dimensión

Estado: Mezcla fresca

Foto 3.3 Ladrillos mezcla lodo-cemento.



Concentración: 90-10%

Ladrillos grandes de 15x7.5x1.4 cm de dimensión

CXS: 78.12%

Estado: Mezcla en consolidación

Foto 3.4 Ladrillos mezcla lodo-cemento.

Los ladrillos pequeños y grandes de esta mezcla no presentaron fisuración mostrando buenas características con respecto a los adobes tradicionales, excepto que al consolidarse presentaron una alta contracción por secado y un ligero encurvamiento, debido principalmente al alto contenido de humedad del lodo, como se ilustra en las fotos 3.1 a 3.4.



Elaboración de ladrillos mezcla lodo-cal

En los resultados de la elaboración de ladrillos pequeños y grandes se presentaron algunas dificultades, ya que el lodo contiene pequeños trozos de lodo seco denominados “grumos”; éstos provocan que al iniciar la etapa de consolidación de los ladrillos se fisuren y posteriormente se fracturen totalmente como se ilustra en las fotos 3.5 y 3.6:



Foto 3.5 Ladrillos mezcla lodo-cal.



Foto 3.6 Ladrillos Mezcla lodo-cal.

Posteriormente, se elaboraron ladrillos pequeños y grandes evitando los grumos en la mezcla, obteniendo los siguientes resultados:



Foto 3.7 Ladrillos mezcla lodo-cal.

Concentración: (90-10%)  
Dimensión inicial: 12x5x2.5 cm (mezcla fresca)  
Dimensión final: 6.6x2.5x1.4 cm (mezcla consolidada)  
CXS: 84.6%



Foto 3.8 Ladrillos mezcla lodo-cal.

Concentración: (90-10%)  
Dimensión inicial: 24x12x2.5 cm (mezcla fresca)  
Dimensión final: 13.8x6.6x1.4 cm (mezcla consolidada)  
CXS: 82.29%



Los ladrillos pequeños no presentaron fisuras, mostrando buenas características con respecto a los adobes tradicionales, con la excepción que al consolidarse presentaron el mismo problema que la mezcla lodo-cemento con una contracción por secado aún más alta, como se ilustra en la foto 3.7.

Con respecto a los ladrillos grandes, estos se fisuraron con la acción de consolidación, aún evitando el problema de grumos mencionado anteriormente. Por consiguiente, esta mezcla no fue apta para la fabricación de ladrillos grandes, como ilustra la foto 3.8.

Elaboración de ladrillos mezcla lodo-yeso-cemento

En los resultados de la elaboración de ladrillos pequeños y grandes se presentaron las mismas dificultades de la mezcla lodo-cal, ya que el lodo contiene pequeños trozos de lodo seco denominados “grumos”, estos provocan que al comenzar la etapa de consolidación de ladrillos se fisuren y posteriormente se fracturen totalmente como se ilustra en las fotos 3.9 y 3.10:



Foto 3.9 Ladrillos lodo-yeso-cemento.



Foto 3.10 Ladrillos lodo-yeso-cemento.

Posteriormente, se elaboraron ladrillos pequeños y grandes evitando los grumos en la mezcla, obteniendo los siguientes resultados:



Foto 3.11 Ladrillos mezcla lodo-yeso-cemento.

Concentración: (90-5-5%)

Dimensión inicial: 12x5x2.5 cm (mezcla fresca)

Dimensión final: 6.5x2.6x1.3 cm (mezcla consolidada)

CXS: 85.35%



Concentración: (90-5-5%)

Dimensión inicial: 24x12x2.5 cm (mezcla fresca)

Dimensión final: 13.8x6.5x1.3 cm (mezcla consolidada)

CXS: 83.8%

Foto 3.12 Ladrillos mezcla lodo-yeso-cemento.

Los ladrillos pequeños presentaron pequeñas fisuras y mostrando buenas características con respecto a adobes tradicionales, con la excepción que al consolidarse presentaron el mismo problema de las mezclas anteriores, un ligero encurvamiento y una alta contracción por secado, como se ilustra en la foto 3.11.

Con respecto a los ladrillos grandes, éstos se fisuraron al consolidarse, aún evitando el problema de grumos, siendo esta mezcla no apta para la elaboración de ladrillos grandes como se ilustra en la foto 3.12.

En conclusión, las mejores mezclas determinadas con base en los valores de resistencia a la compresión para la elaboración de ladrillos obtuvieron resultados no muy aceptables, ya que las principales desventajas de los ladrillos fueron la contracción por secado, ligero encurvamiento, fisuración y en algunos casos fractura total, debido principalmente al alto contenido de humedad. No obstante, se considera la posibilidad de realizar un acondicionamiento al lodo (secado-molido) y adicionar paja con la finalidad de contrarrestar el problema de contracción por secado y el ligero encurvamiento para el aprovechamiento de lodos en la fabricación de ladrillos (adobes tecnificados).



### 3.2 Estimación de costos

Considerando las cinco mezclas preparadas (tabla 3.25) para elaborar tabicones, se realizó una estimación de los costos anuales asociados a la adquisición de materias primas. La tabla 3.27 presenta, de manera comparativa, los costos estimados para elaborar tabicones a partir de dichas mezclas y de una de tipo comercial (tabiquera localizada en el municipio de Villa Victoria). El responsable de la tabiconera proporcionó las cantidades y costos de materias primas aplicadas en la empresa para producir 3,000 tabicones al día, los datos son los siguientes:

- 60 bultos de cemento Moctezuma \$ 4,500.
- Un camión de tepojal aprox. 18 toneladas \$ 1,200.
- Una pipa de agua aprox. 12 m<sup>3</sup> \$ 180.
- Diariamente se producen 3000 tabicones.

Tabla 3.27. Estimación comparativa de costos de materias primas para la elaboración de tabicones con las mezclas propuestas de lodos y otra de tipo comercial.

Muestra	\$ Tepojal/año	\$ Cemento/año	\$ Agua/año	Costo tabicón (\$)	Costo total de materia prima/año
1	540,000	--	--	0.5	540,000
2	540,000	2,025,000	--	2.375	2,565,000
3	660,000	1,350,000	--	1.86	2,010,000
4	720,000	2,160,000*	--	2.67	2,880,000
5	720,000	3,375,000	--	3.79	4,095,000
Comercial	720,000	3,375,000	27,000	3.82	4,122,000

\* \$ cal/año

Los resultados obtenidos en la tabla 3.27 muestran que los costos en la elaboración de tabicones con mezclas propuestas (tabla 3.25) se encuentran muy por debajo, respecto a la mezcla comercial, excepto la muestra 5 (mezcla comercial substituyendo el agua por lodo de espesadores). Esto se debe principalmente a la poca cantidad de cemento agregado en las mezclas y la sustitución de 25% de tepojal por lodo.

Sin embargo, debido a que los tabicones elaborados con las mezclas preparadas con lodo no cumplieron con el valor propuesto de resistencia a la compresión (tabla 3.26), se estimaron los costos usando la misma cantidad de cemento tanto para el tabicón comercial como para los elaborados con lodo (tabla 3.28). La adición de lodo de sedimentadores permite suprimir los costos para adquirir agua. La aplicación de lodos de tarquina suprime este costo también y disminuye el de tepojal.

Cabe señalar, que no necesariamente se requerirá agregar la misma cantidad de cemento, respecto a la mezcla comercial. La cantidad de cemento agregado a la mezcla, la determinarán los resultados de la experimentación con nuevas mezclas propuestas para elaborar tabicones. Por lo que, la estimación comparativa de costos de la tabla 3.28 se considera como el caso crítico en el que se tuviera que agregar la misma cantidad de cemento, respecto a la mezcla comercial.



Tabla 3.28. Estimación de costos de materias primas para producir tabicones comerciales con respecto a tabicones elaborados con lodo de la planta potabilizadora en estudio y la misma cantidad de cemento que los comerciales.

Muestra	\$ Tepojal/año	\$ Cemento/año	\$ Agua/año	Costo tabicón (\$)	Costo total de materia prima/año
Tabicón comercial	720,000	3,375,000	27,000	3.82	4,122,000
Tabicón con lodo de espesadores	720,000	3,375,000	----	3.79	4,095,000
Tabicón con lodo de tarquinas	540,000	3,375,000	----	3.62	3,915,000

Los resultados obtenidos en la estimación de costos de materias primas para la producción de tabicones muestran que anualmente la fábrica de tabicones invertirá 0.65% menos al producir tabicones con lodo de espesadores, respecto a los tabicones comerciales, debido principalmente al ahorro en el consumo de agua.

Esta opción presentó una mediana factibilidad técnica, ya que el parámetro denominado resistencia a la compresión en tabicones presentó un valor inferior respecto al de tipo comercial. No obstante, para la producción de tabicones con lodo de tarquinas la empresa invertirá 5% menos anualmente con respecto a producción de tabicones comerciales, debido principalmente a la sustitución de 25% de lodo de tarquinas por tepojal y al ahorro en el consumo de agua. Cabe señalar, que éstas estimaciones de costos no incluyen mano de obra, servicios (solamente incluye agua y transporte de materias primas).





## Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se determinó que los lodos fisicoquímicos evaluados en este estudio presentaron de una mediana a alta factibilidad técnica-económica para elaborar materiales de construcción. Lo anterior fue determinado con base en los siguientes resultados:

- Las características de los lodos producidos y los almacenados en la planta potabilizadora en estudio fueron similares a las reportadas para otros lodos utilizados para elaborar ladrillos (Tay, *et al.*, 2002; Pan y Tseng, 2001).
- Con base en un análisis comparativo de estas propiedades con respecto a la normatividad nacional (NOM-004-SEMARNAT-2002) e internacional para lodos y biosólidos, los lodos producidos y almacenados en la planta potabilizadora presentan en general, características que los hacen aptos para ser valorados como biosólidos tipo C (contacto indirecto). Esta clasificación se debe principalmente al alto contenido de *Salmonella* y coliformes fecales.
- En las pruebas de elaboración de especímenes (cubos de 5 cm por lado) a base de mezclas binarias y ternarias con lodo, las mejores mezclas fueron las fabricadas con lodo-cemento (90-10%), lodo-cal (90-10%) y lodo-yeso-cemento (90-5-5%). Los especímenes de estas mezclas presentaron características aceptables, con respecto a las obtenidas para especímenes de referencia (100% mortero, 100% cemento, 100% cal).
- Los tabicónes elaborados en pruebas preliminares con 25% de lodo almacenado no presentaron características similares a las de los tabicónes comerciales elaborados en una tabiquera localizada en el municipio de Villa Victoria. Sin embargo, cabe señalar que este resultado se obtuvo debido a la poca cantidad de cemento agregado a las mezclas, por cuestiones de producción de la tabiquera y falta de materia prima no fue posible continuar experimentando.
- Los resultados obtenidos en la fabricación de ladrillos (adobes tecnificados) no fueron muy aceptables, ya que los principales problemas son la contracción por secado, el encurvamiento de ladrillos y la fisuración de los mismos debido principalmente al alto contenido de humedad del lodo.
- Los costos estimados de materias primas para la elaboración de tabicónes, elaborados a base de la mejor mezcla (lodo-cemento, 90-10%), fueron menores respecto a los valores de tabicónes comerciales, elaborados en una tabiquera localizada en Villa Victoria. En consecuencia, los tabicónes a base de lodo presentaron una adecuada factibilidad económica.
- Es recomendable realizar un estudio más profundo sobre las formulaciones de mezclas binarias y ternarias propuestas para la producción de morteros y concreto de relleno, ya que las mezclas lodo-cemento y lodo-mortero (90-10%) y lodo-cal-cemento (90-5-5%) cumplen con el requerimiento de resistencia a la compresión para la fabricación de morteros y concretos de relleno establecida por la norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de mampostería (Colegio de Ingenieros Civiles, 2002). Las mezclas lodo-yeso-cemento (90-5-5% y 75-12.5-12.5%) cumplen con el requerimiento de resistencia a la compresión únicamente para morteros tipo III (sustituyendo las partes de cal por yeso).



- Las mezclas lodo-cal (90-10% y 75-25%) junto con las mezclas lodo-yeso (90-10%, 75-25% y 40-60%), con base en su resistencia a la compresión, pueden ser utilizados para elaborar morteros de cal y morteros de yeso. Estos morteros son empleados principalmente para técnicas de revestimiento, por lo que la resistencia a la compresión es muy baja.
- Es recomendable realizar una experimentación más completa para la fabricación de tabicones con lodo almacenado, con la finalidad de mejorar la calidad del tabicón y reducir los costos de producción, ya que por cuestiones de producción en la tabiquera y falta de materias primas no fue posible continuar experimentando obteniendo resultados de tipo preliminares.
- Debido a la obtención de resultados medianamente aceptables para la fabricación de ladrillos (adobes tecnificados) con lodo almacenado de la planta potabilizadora en estudio, es recomendable realizar un acondicionamiento al lodo (secado-molienda) y la adición de fibra natural (paja), con la finalidad de contrarrestar el principal problema que es contracción por secado y el problema de encurvamiento de ladrillo se solucionará adicionando paja al ladrillo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler, E. (2002). Gestion des boues d'eau potable á la recherche des bonnes pratiques. Synthèse du groupe "terres de decantation". (AGHTM) France.

APHA. (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19th Ed. American Public Health Association. AWWA and WPCF, Washington DC, EUA.

Anderson, 2003. British Ceramic Transactions, volume 102, number 3, June 2003, pp. 109-113

Arboleda, 2000. Manual de tratamiento de aguas potables. Programa de educación de ingeniería sanitaria. Caracas Venezuela.

Armenter Ferrando, J. L.; Cristiá Roca, J.; Cusidó Fabregas, J. A.; Arteaga Nuñez, F. y Cremades Oliver, L., (2002). Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica. Barcelona, España.

Arteaga, F. y Cusidó Fabregas, J. A., (1998). Valorización de los fangos de ETAP en materiales de construcción; cerámica estructural y cerámica de revestimiento. UPC-Terrassa.

AWWARF, (1969). Disposal of wastes from water treatment plants. J. Am. Water Works Assoc. 61:541-619.

Benefield, L. D.; Judieins, J. F. and Weand, B. L., (1982). Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment. Ed. Prentice Hall Inc. Englewood Cliefs. N.Y. Pp 191-236.

Bielza de Ory, J. M., (2005). Caracterización de los lodos de neutralización para reciclabilidad.

Bosch, F. (2002). Valorización de residuos, diseño y construcción de un piloto de filtración. AIMME. Instituto Tecnológico metalmeccánico. Valencia, España. Disponible en sitio web [www.aimme.es/información/informativo/ficha.asp?id=1321#](http://www.aimme.es/información/informativo/ficha.asp?id=1321#).

Cano, M.; Rodríguez-Maribona y Alfaro I., (2000). PAVAL: The Aluminium Oxide Recycling. Characteristics and Applications. LBEIN Technological Research Centre, Bilbao, Spain.

Cheremisinoff, P. N. (1995). Sludge. Management and disposal. Prentice Hall. USA.

Colegio de Ingenieros Civiles, 2002. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería.

Comunidad Económica Europea, CEE. Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura.

Dayton, E. A. y Basta N. T., (2001). Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute. Water Environmental Research. 73: 1, 52-57.



Dillion, G., (1997). Application guide to waterworks sludge treatment and disposal. WRc Report No. TT016.

Ebie, K.; Lee, J-H. y Yoon, T-H., (2000). Activation mechanism and effectiveness in reusing sludge from water purification. *Water Science and Technology*. 42(3-4)273-281.

Environment Protection Agency, (1979). Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal. Centre for Environmental research Information, Technology Transfer. U.S.A. EPA/625/1-79-011.

Environment Protection Agency, (1995). A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. EPA 832-R-93-003

Elías, X., (2000). Valorización de Fangos. Aspectos Ambientales de la Valorización de Cerámica de Fangos. Madrid.

Elliot, H. A.; Dempsey, B. A. y Maille, P. J., (1990). Contents and fractionation of heavy metals in water treatment sludges. *J. Environ. Qual.* 19. 330-334.

Fair, G. M.; Geyer, J. C y Okún, D. A., (1999). Purificación de Agua, Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. G. Editorial Limusa – Wiley SA.

Ferreira, J. M. F. y Olhero S. M., (2002). Al-rich sludge treatments towards recycling. *Journal of the European Ceramic Society* 22(2002) 2243-2249.

FWR, (1994). Report No. FR0428. Treatment and Disposal of Waterworks Sludge in Selected European Countries. Disponible en website. [www.fwr.org/environs/fr0428.htm](http://www.fwr.org/environs/fr0428.htm)

Gallimore, L. E.; Basta, N. T.; Storm, D. E.; Payton, M. E.; Huhnke, R. H. y Smolen, M. D., (1999). Water Treatment Residual to Reduce Nutrients in Surface Runoff from Agricultural Land. Reprinted from the *Journal of Environmental Quality*. 28: 5, 1474-1478.

Girovich, M.J., (1996). Biosolids Treatment and Management. Process for Beneficial Use. Marcel Dekker, Inc, New York.

Goncalves, A.; Esteves, A. y Carvalho, M., (2004). Incorporation of Sludges from a Water Treatment Plant in Cement Mortars. Paper present in The Conference Use of Recycled Materials in Buiding and Structures, November 2004. Barcelona, España.

Goldbold, P.; Lewin, K.; Graham, A. y Barker, P., (2003). Reuse of water utility products as secondary commercial materials. WRc. report No. UC 6081.

Henry, J. G. y Heinke, G. W., (1999). Ingeniería Ambiental. Prentice Hall.

IMCYC, (2005). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC. Sitio web: [www.imcyc.com](http://www.imcyc.com)

INEGI, (2005). Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática. Comunicados. Sitio web: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

Meunier, N.; Blais, J. F. ; Lounés, M. ; Tyagi, R. D. y Sasseville J. L., (2002). Different options for metal recovery alter sludge decontamination at the Montreal Urban Community wastewater treatment plant. *Wat. Sci and Tech.* 46 (10) 33-41.



MENV, (2003). Beneficial Use of Municipal Biosolids in Agriculture. Literature Review and Recommendations Concerning the Impact of Iron and Aluminum Salts on Soil Phosphorus Availability. Ministère de l'Environnement du Québec. Direction des Politiques du secteur agricole. Québec, Canadá.

Múgica, A., (1996). Contaminación Ambiental. Causas y Control de la Contaminación del Agua. Reporte Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco.

N-CMT-2-01-004/02. Características de los materiales, 2002.

Neville, A. Properties of concrete, Pitman Publishing Limited.

NMX-C-414-ONNCCE-1999. Norma Técnica Mexicana. Industria de la construcción- Cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-414-ONNCCE-2004. Norma Técnica Mexicana. Industria de la construcción- Cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-441-ONNCCE-2005. Industria de la construcción-bloques, tabicones para uso no estructural (construcción de muros de relleno, revestimiento, interiores y exteriores o cualquier otro uso no estructural).

NMX-C-404-1997-ONNCCE. Industria de la construcción-bloques, tabicones para uso estructural (edificaciones).

NMX-C-003-1996-ONNCCE. Industria de la construcción-cal hidratada-especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la construcción-agua para concreto hidráulico-especificaciones.

NMX-C-111-ONNCCE-2004. Agregados para concreto hidráulico-especificaciones y métodos de prueba.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección Ambiental-lodos y biosólidos-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma técnica de edificación E.080 Adobe, 1999.

NWA, Act 36, 1998. Ley nacional del agua en Sudáfrica. Sitio web. [www.polytechnic.edu](http://www.polytechnic.edu).

Onaka, T., (2000). Sewage can made Portland cement: A new technology for ultimate reuse of sewage sludge. *Wat.Sci.Tech.*, 41(8),93-98.

Overcah, M. R. and PAL, D., (1979). Design of Land Treatment Systems for Industrial Wastes – Theory and Practice. Ann Arbor Science Publishers. Ann Arbor. USA.

Pan, J. R.; Huang, C. y Lin, S., (2004). Reuse of fresh water sludge in cement making. *Wat.Sci.Tech*, 50(9), 183-188.



RAS, (2000). Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Sección II. Título C. Colombia.

Regulación Nacional Argentina: Resolución 97/01 "Manejo Sustentable de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos" (SAyDS)

Salazar, A., (2003). Los Ecomateriales: una alternativa económica para la construcción. Agencia Universitaria de Periodismo Científico y Cultural. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Sanks, R. L., (1985). Water Treatment Plant Design. For the Practicing Engineer. Ann Arbor Science Publishers, Inc. USA.

Schultz, C. y Okun, D., 1990. Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Edit. Schultz, R. y Okun, D., 1990). Noriega-Limusa. México.

Stephens, J. B. y Carrasquillo, R. L., (1999). Evaluating Performance-Based Test and Specifications for Sulfate Resistente in Concrete. Research Report Number 1706-3. University of Texas at Austin.

Tay, J. H. y Show, K. Y., (1991). Properties of cement made from sludge. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 117(2), 236-246.

Tay, J. H.; Show, K. Y.; Hong, S. Y.; Chien, C.Y. y Lee, D. J., (2002). Potential reuse of wastewater sludge for innovative applications in construction industry. Bulletin of College of Engineering, N.T.U., No. 86.

Titshall, L. W. y Hughes, J. C., (2005). Characterization of some South African water treatment residues and implications for land application. Water SA. (31):3, 299-307. Available on website [www.wrc.org.za](http://www.wrc.org.za).

WRC. Water Research Commission. Sitio web. [www.wrc.org.za](http://www.wrc.org.za)

Yunusov y Khudaiberganova, (1984). Disposal and Utilization of Sludge from Wastewater in Production of Aluminosilicate Catalysts. Plenum Publishing Corporation 009-3092/83/0910-0473. Rusia.



## PAGINAS WEB

[www.arqhys.com/construccion/ceramica-tipos.html](http://www.arqhys.com/construccion/ceramica-tipos.html)  
[www.spaintiles.inf/documentos/proceso.pdf](http://www.spaintiles.inf/documentos/proceso.pdf)  
[www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID58.pdf](http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID58.pdf)  
[orbita.starmedia.com/wilben/cap0702.html](http://orbita.starmedia.com/wilben/cap0702.html)  
[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/059/htm/sec\\_5.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/059/htm/sec_5.htm)  
[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Paredes\\_M\\_L/cap5.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Paredes_M_L/cap5.htm)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Hall-Heroult\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Hall-Heroult_process)  
<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/wtprimer/sldg/wwwslgdg.mov>  
[www.construrama.com](http://www.construrama.com)  
[www.imcyc.com](http://www.imcyc.com)  
<http://bvirtual.espe.edu.ec>  
[www.ladrisur.com.ar](http://www.ladrisur.com.ar)  
[www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com)  
[www.estrucplan.com.ar](http://www.estrucplan.com.ar)  
[www.grupocalider.com](http://www.grupocalider.com)  
[www.cemexmexico.com](http://www.cemexmexico.com)  
<http://normas.imt.mx>  
[www.uralita.com](http://www.uralita.com)  
[www.consumer.es](http://www.consumer.es)  
[www.bpbformula.com](http://www.bpbformula.com)  
<http://html.rincondelvago.com>  
<http://eleusa.com>  
<http://webstore.ansi.org>  
[www.irapuato.gob.mx](http://www.irapuato.gob.mx)  
[www.cepis.org.pe](http://www.cepis.org.pe)  
[www.induambiente.cl](http://www.induambiente.cl)  
[www.cdc.gov](http://www.cdc.gov)  
[www.scielo.org.pe](http://www.scielo.org.pe)



## ANEXOS





## ANEXO A

### Descripción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

#### Color

El color en los lodos se asocia al término “color aparente” y engloba no sólo el color debido a las sustancias disueltas, sino principalmente a las materias en suspensión (APHA, 1992). La mayoría de las veces el color va a depender del tipo de coagulante utilizado. Por ejemplo, los lodos generados cuando se utilizan sales de hierro toman tonalidades rojizas.

Debido a la consistencia del lodo es difícil determinar el color mediante métodos analíticos, por lo que se puede emplear una tabla con diferentes tonalidades y a simple vista determinar el color más parecido a la muestra.

#### Olor

Al igual que el color, este parámetro es meramente descriptivo y es muy subjetivo ya que los olores percibidos por los humanos parecen ser innumerables y se sabe que cambian de característica conforme varía la concentración del compuesto odorífero, o intensidad de su olor. Sin embargo, una clasificación cuidadosa sugiere que puede haber ciertos olores fundamentales a partir de los cuales podrían componerse los demás. Estos olores son dulce o fragante, agrio o ácido, quemado o empíreo, y caprino o caprílico (Fair, *et al.*, 1999).

Los olores en el lodo están relacionados con:

- 1) Materia orgánica en descomposición.
- 2) Algas y otros organismos microscópicos que contienen aceites esenciales y otros compuestos olorosos.
- 3) Hierro, manganeso y otros productos metálicos.
- 4) Residuos industriales, particularmente sustancias fenólicas.
- 5) Cloro y sus compuestos de sustitución.
- 6) Compuestos orgánicos sintéticos.

#### Temperatura

La temperatura de los lodos va a depender del tipo de proceso donde se generó. Las temperaturas elevadas aceleran la putrefacción y, por lo tanto, un aumento en la demanda de oxígeno.

#### Densidad

La densidad es la razón entre el peso de un volumen dado de lodo y un volumen igual de agua. La densidad está relacionada con la naturaleza del lodo y el grado de tratamiento.

#### % de Humedad

Este parámetro indica la cantidad de agua contenida en el lodo y puede determinarse a través de la concentración de sólidos totales en el lodo.



## Sólidos

Tomando en cuenta que los lodos están compuestos casi en su totalidad por sólidos suspendidos con contenido variable de humedad, los parámetros considerados para su caracterización son los sólidos suspendidos totales (SST), divididos en dos grupos: Aquellos a los que se les ha eliminado el agua o sólidos suspendidos fijos (SSF); y aquellos que se volatilizan después de la calcinación o sólidos volátiles (SSV) (Arteaga y Cusidó-Fabregas 1998).

Los SSF son los materiales residuales que permanecen en los lodos, que han sido deshidratados entre 103-105°C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco (PS) y constituyen la fracción inorgánica del lodo. Los SSV son los sólidos orgánicos totales presentes en los lodos, que se volatilizan cuando éstos se queman a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado. Estos sólidos constituyen la fracción orgánica del lodo (APHA, 1992).

La concentración de sólidos es uno de los parámetros más importantes de este grupo ya que es la base para el diseño de las unidades para el tratamiento y manejo de lodos.

## pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad en una solución. Un valor cercano a 7 implica una condición neutra, mientras que valores por arriba de 7 indican alcalinidad y por debajo de 7 indican acidez.

La alcalinidad en una solución sugiere el contenido de iones de hidróxido, bicarbonatos y carbonatos, mientras que la acidez indica la presencia de iones hidronio que son capaces de neutralizar las bases.

## Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO consiste en una estimación de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica contenida en una muestra de lodo residual, por medio de la actividad de una población microbiana, heterogénea y aerobia. La degradación total de la materia orgánica requiere de un tiempo de más de 20 días. Para efectos prácticos se realiza la llamada DBO<sub>5</sub>, que consiste en la determinación del oxígeno consumido a los cinco días de tomada la muestra y de acuerdo a la experiencia, en este periodo se ha degradado aproximadamente el 70% de la materia orgánica (Múgica, 1996).

## Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química se define como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar los componentes de una muestra de agua residual utilizando reactivos químicos. En esta prueba, a diferencia de la DBO no solamente se oxida materia orgánica, sino también otras sustancias de tipo inorgánico susceptibles a ser oxidadas. La DQO siempre es igual o mayor a la DBO ya que la materia orgánica oxidable por métodos biológicos puede ser oxidada por medios químicos (APHA, 1992 y Múgica, 1996).



### Carbono Orgánico Total (COT)

La determinación de carbono orgánico total es un proceso de combustión rápida que cambia todo el oxígeno a  $\text{CO}_2$ , el cual se mide en un equipo de espectroscopia infrarroja. La cantidad producida de  $\text{CO}_2$  puede relacionarse con el oxígeno equivalente en la muestra (Múgica, 1996).

### Metales

Los metales pesados que se encuentran regulados en nuestro país en el aprovechamiento de lodos y biosólidos en suelo son: Arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, níquel y zinc y su análisis es mediante la espectrofotometría por absorción atómica. La determinación de estos metales es importante para considerar el grado de contaminación y los compuestos que pudieran resultar nocivos al contacto humano durante la disposición o reutilización del lodo.

Otros metales a determinar serían básicamente hierro, aluminio y manganeso dependiendo de la composición del agua a tratar y del coagulante utilizado.

### Nitrógeno

El nitrógeno es considerado como un nutriente importante ya que es un elemento de importancia crítica para todas las formas de vida; por ejemplo, las proteínas, que son componentes de todas las células, en promedio contienen 16% de nitrógeno en peso. Este elemento en sus diferentes formas es un indicador de contaminación en el agua, pero en el suelo agrícola es de suma importancia ya que al fijarse en éste ayuda al crecimiento de las plantas, aumentando la producción de semillas y frutos (Girovich, 1996).

El nitrógeno se introduce en el medio acuático por la descarga de aguas residuales domésticas y residuos industriales orgánicos. Los componentes principales son nitrógeno orgánico (proteínas) y amoníaco (Henry y Heinke, 1999).

### Fósforo

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un nutriente esencial en el proceso de fotosíntesis de las plantas. Está involucrado en la formación de aceites, azúcares, almidones, etc. Ayuda a la transformación de energía solar en energía química, a la maduración adecuada de la planta y a soportar el estrés. El fósforo promueve el crecimiento rápido y ayuda a la floración y al crecimiento de raíces (Girovich, 1996 y Henry y Heinke, 1999).

El fósforo está presente en el agua generalmente como fosfatos que son arrastrados por las aguas superficiales a los lagos y ríos donde producen eutrofización. Estos compuestos están presentes en detergentes y plaguicidas minerales u orgánicos utilizados para proteger los cultivos (Fair, et al., 1999).

De acuerdo a la normatividad europea, los parámetros que deben de analizarse en lodos para su aprovechamiento son (86/278/CEE):

- Materia seca, materia orgánica,
- pH,
- Nitrógeno y fósforo,
- Cádmi, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio, cromo.



### Coliformes fecales

Los coliformes fecales son las bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos. Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes. Pueden identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44°C-45°C. Incluyen al género *Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella*.

### Salmonella sp

Se conoce como *Salmonella sp* a los bacilos móviles por sus flagelos peritricos que fermentan de manera característica glucosa y manosa sin producir gas, pero no fermentan lactosa ni sacarosa. La mayoría produce sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). A menudo, cuando se ingieren, son patógenos para el hombre y los animales, ocasionando fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida también como gastroenteritis).

### Huevos de Helminto

Helminto es el término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales), de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no. Los huevos de helmintos viables son los susceptibles de desarrollar e infectar.

## ANEXO B

Las fabricas de la industria del cemento, cal y yeso generan principalmente productos en forma de polvo que con la adición de agua son modelables y, tras un tiempo de reacción dado, endurecen. Para la obtención de los productos son necesarias las siguientes etapas de fabricación:

**Preparación:** Transporte, trituración, dosificación de materiales suplementarios, almacenamiento, preparación de las materias primas.

**Cocción;**

**Almacenamiento y trituración** de los productos calcinados;

**Aportación de aditivos:** p. ej: yeso al cemento o agua a la cal;

**Embalaje y envío.**

La figura B1 muestra el proceso de producción de cemento.

### 1. Explotación de materias primas ▶

De las canteras de piedra se extrae la caliza y la arcilla a través de barrenación y detonación con explosivos, cuyo impacto es mínimo, gracias a la moderna tecnología empleada.



### ◀ 2. Transporte de materias primas

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas.

### 3. Trituración ▶

El material de la cantera es fragmentado en los trituradores, cuya tolva recibe las materias primas, que por efecto de impacto y/o presión son reducidas a un tamaño máximo de una y media pulgadas.



### 4. Prehomogeneización ▶

La Prehomogeneización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que lo requiera.



### ◀ 5. Almacenamiento de materias primas

Cada una de las materias primas es transportada por separado a silos en donde son dosificadas para la producción de diferentes tipos de cemento.

### 6. Molienda de materia prima ▶

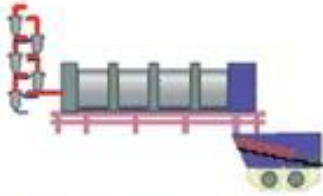
Se realiza por medio de un molino vertical de acero, que muele el material mediante la presión que ejercen tres rodillos cónicos al rodar sobre una mesa giratoria de molienda. Se utilizan también para esta fase, molinos horizontales, en cuyo interior el material es pulverizado por medio de bolas de acero.





### 7. Homogeneización de harina cruda ▶

Se realiza en los silos equipados para lograr una mezcla homogénea del material.

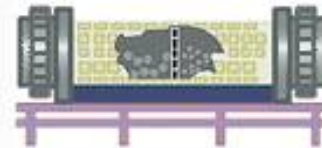


### ◀ 8. Calcinación

La calcinación es la parte medular del proceso, donde se emplean grandes hornos rotatorios en cuyo interior, a 1400° C, la harina cruda se transforma en dinker, que son pequeños módulos gris oscuros de 3 a 4 cm.

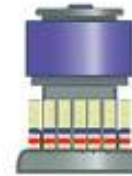
### 9. Molienda de cemento ▶

El dinker es molido a través de bolas de acero de diferentes tamaños a su paso por las dos cámaras del molino, agregando el yeso para alargar el tiempo de fraguado del cemento.



### 10. Envase y embarque del cemento ▶

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será en vasado en sacos de papel, o surtido directamente a granel.



En ambos casos se puede despachar en camiones, tolvas de ferrocarril o barcos.



Figura B1. Proceso de producción de cemento



### Proceso de producción de cales

El proceso de producción de cal comienza desde la explotación y selección del yacimiento de piedra caliza. La caliza es una roca compuesta de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y porcentajes mínimos de otros materiales, esta es una piedra natural que comúnmente se le conoce como piedra caliza rica en calcio. La figura 1.3 muestra el proceso de producción de la cal.



Una piedra caliza que posea un alto contenido de magnesio se clasifica como piedra caliza dolomítica. Las cales elaboradas con estas rocas se llaman cal viva y cal dolomítica respectivamente.

Posteriormente la piedra es triturada y clasificada de acuerdo a su tamaño para diferentes aplicaciones. En el caso de piedra para elaborar cal, se requieren piedras calizas con un tamaño mayor a una pulgada. Cuando se ha clasificado la piedra de acuerdo a su tamaño, esta debe ser lavada para asegurar la pureza del producto antes del proceso de calcinación.



Para el proceso de calcinación la piedra caliza y la piedra dolomítica son transformadas en cal viva y cal dolomítica en hornos horizontales o verticales, para alcanzar esta transformación química son necesarias temperaturas superiores a los  $900\text{ }^\circ\text{C}$ .



Además de la cal viva y la cal dolomítica, el mercado de la construcción, de los alimentos, y la ingeniería ambiental entre otros, requieren de cal hidratada. El hidróxido de calcio o cal hidratada se obtiene por la adición de agua a la cal viva. Este proceso de hidratación conlleva una reacción química exotérmica en la que se liberan grandes cantidades de calor. Durante la hidratación o apagado de la cal, las rocas de cal viva absorben agua desintegrándose y obteniéndose un polvo fino blanco.

Figura B2. Proceso de producción de cal.



### Proceso de producción de yeso

**Extracción:** el yeso natural se extrae de minas al aire libre o subterráneas utilizando maquinas perforadoras especiales y explosiones controladas no contaminantes. El tamaño de las piedras obtenidas puede ser de hasta 50 cm de diámetro.

**Trituración:** una primera trituración que reduce las piedras a un tamaño inferior a 10 cm para facilitar su posterior manejo, se lleva a cabo en la misma cantera o en la zona de entrada a la planta productora de yeso.

**Almacenamiento:** las piedras previamente sometidas a trituración son almacenadas para garantizar la continuidad del proceso de producción así como una óptima homogeneidad entre los lotes de extracción.

**Cribado:** es necesario separar y controlar los tamaños de partículas de yeso para obtener las propiedades de producto requeridas para la elaboración del tipo de yeso o escayola deseado.

**Calcinación:** el sulfato de calcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) se obtiene mediante deshidratación parcial o total del yeso natural a temperaturas entre 120 y 400 °C. La estructura y las propiedades del producto final dependen directamente de las condiciones de calcinación empleadas (temperatura, presión, velocidad).

**Molienda:** después del proceso de calcinación, el yeso se muele para obtener polvo. La distribución de los tamaños de partícula es un factor importante con respecto a las propiedades del producto.

**Mezclado:** una vez que el yeso esta finamente molido, se puede proceder a la última etapa que es el mezclado. Con una selección de aditivos se afinarán finalmente las propiedades del producto para responder a las necesidades de los clientes en lo que se refiere a tiempo de fraguado, viscosidad, porosidad, color, resistencia mecánica y otros más.





## ANEXO C

### Características de materiales cementantes

#### Cemento gris

El cemento Pórtland es el material comercial de mayor uso en la industria de la construcción y es definido como el “material que proviene de la pulverización del producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizas que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio e hierro en cantidades convenientemente calculadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar y agua, así como otros materiales que no excedan del 1% en peso del total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento”.

El cemento puede clasificarse de acuerdo a su tipo (A), resistencia mecánica a la compresión (B) y características especiales de durabilidad ante agentes agresivos (C) y debe de cumplir con las especificaciones de calidad mencionadas en la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999.

#### A. Tipos de cemento de acuerdo a sus componentes

CPO	<b>Cemento Pórtland Ordinario</b>
CPP	<b>Cemento Pórtland Puzolánico</b>
CPC	<b>Cemento Pórtland Compuesto</b>

#### B. Resistencia mecánica

##### 1) Cementos de resistencia normal o mecánica a la compresión a 28 días

<b>20</b>		<b>30</b>		<b>40</b>
<b>Resistencia a 28 días</b>		<b>Resistencia a 28 días</b>		<b>28 días</b>
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Más de 204 kg/cm <sup>2</sup>	Más de 408 kg/cm <sup>2</sup>	Más de 306 kg/cm <sup>2</sup>	Más de 510 kg/cm <sup>2</sup>	Más de 408 kg/cm <sup>2</sup>

##### 2) Cementos de resistencia inicial o resistencia mecánica a la compresión desarrollada a 3 días

<b>30 R</b>		
<b>Resistencia a 3 días</b>	<b>Resistencia a 28 días</b>	
mín.	mín.	Máx.
Más de 204 Kg/cm <sup>2</sup>	Más de 306 Kg/cm <sup>2</sup>	Más de 510 Kg/cm <sup>2</sup>

C. Cementos con características especiales. Para obras que por sus características y ubicación requieran o exijan mayor protección contra agentes agresivos, los cementos se clasifican como:



<b>Características Especiales</b>	
RS	Resistencia a los sulfatos
BRA	Baja reactividad del álcali agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

La composición química del cemento Pórtland es muy compleja; pero puede definirse esencialmente como un compuesto de cal, alúmina y sílice. La composición química típica de acuerdo a Stephens y Carrasquillo (1999) se muestra en la tabla C1:

Tabla C1. La composición química típica del cemento Pórtland.

<b>Compuesto</b>	<b>%</b>
CaO	62.5
SiO <sub>2</sub>	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5
SO <sub>3</sub>	2
MgO	2

Los componentes potenciales o hidráulicos del cemento son el silicato tricálcico (SC<sub>3</sub>), el silicato bicálcico (SC<sub>2</sub>), el aluminato tricálcico (AC<sub>3</sub>), el aluminoferrito tetracálcico (AFC<sub>4</sub>), el yeso, la cal libre, la magnesia y álcalis. Un ejemplo de composición tipo podría ser SC<sub>3</sub> (40-50%), SC<sub>2</sub> (20-30%), AC<sub>3</sub> (10-15%), AFC<sub>4</sub> (5-10%). El SC<sub>3</sub> es el responsable del endurecimiento rápido, da lugar a altas resistencias iniciales y a un alto calor de fraguado. El SC<sub>2</sub> otorga la resistencia a largo plazo, tiene un bajo calor de hidratación y alta estabilidad, complementando, de alguna forma al anterior. El AC<sub>3</sub> tiene una velocidad altísima de fraguado, un muy alto calor de hidratación y da lugar a valores importantes de retracción (Stephens y Carrasquillo, 1999).

En la tabla C2 pueden apreciarse las características químicas del cemento producido en México en comparación con lo establecido por las normas ASTM.

Tabla C2. Características químicas del cemento producido en México (Cemex).

<b>Características Químicas (Promedio %)</b>			
	ASTM C-150	Bolsa (Cemex)	Composición típica (Stephens y Carrasquillo, 1999)
SiO <sub>2</sub> (Óxido de Sílice)	-	22.4	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Aluminio)	-	5.04	6.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Hierro)	-	0.2	2.5
CaO (Óxido de Calcio)	-	67.22	62.5
MgO (Óxido de Magnesio)	Máx. 6.0	1.3	2
SO <sub>3</sub> (Óxido de Azufre)	Máx. 3.5	2.5	2
Na <sub>2</sub> O (Óxido de Sodio)	-	-	-
K <sub>2</sub> O (Óxido de Potasio)	-	-	-
Residuo Insoluble	Máx. 0.75	0.5	-
Pérdida al fuego	Máx. 3.0	1.5	-
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)	-	11	-
Silicato Tricálcico (C <sub>3</sub> S)	-	>55	-



En esta tabla se observa que las especificaciones técnicas en cuanto a la caracterización química propuestos por la ASTM son muy limitadas. La composición química del cemento mexicano cumple con estas especificaciones y es muy similar a la composición química reportada para el cemento Pórtland.

## Cal

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas, constituido principalmente de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y otros componentes. La adición de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, subbases y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor o menor grado, produce aumento en el límite líquido y disminución en el índice plástico; aumenta la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos; aumenta la resistencia a la compresión simple.

La cal es uno de los pocos productos que ha resistido con éxito la prueba del tiempo, ya que por siglos no solo se ha usado en la construcción, agricultura y alimentación, sino que conforme ha ido avanzando la ciencia y la tecnología, se han descubierto nuevas aplicaciones químicas y físicas de este material.

Es el químico natural indispensable en la preparación de morteros para albañilería. A la fecha no hay otro material tan versátil como la cal en los morteros, ya que ayuda a que las construcciones sean térmicas e impermeables, todo esto a costos más bajos.

Según su composición química se clasifica en:

### 1.- Cal viva

Producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte de óxido de calcio, o bien, óxido de calcio asociado con óxido de magnesio, capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación. Junto con la cal hidratada, la cal viva es la más utilizada para la estabilización. Sus principales ventajas son que presenta una mayor reactividad con los materiales por estabilizar y menor generación de polvo durante su utilización.

### 2.- Cal apagada o hidratada

Polvo seco, obtenido al tratar cal viva con la suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) e hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ). Junto con la cal viva, la cal hidratada es la más utilizada para la estabilización. Su principal ventaja es que ofrece menor peligro durante su transporte, manejo y utilización. Por razones ecológicas, en general no es aceptable usar cal viva. Se emplea preferentemente como cal apagada y en lechada, excepto cuando se requiere disminuir el contenido de agua de los suelos.

### 3.- Cal hidráulica hidratada

Producto cementante seco, hidratado, obtenido al calcinar calizas que contienen sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente, de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) para permitir la hidratación y, al mismo tiempo, dejando suficientes silicatos de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) sin hidratar, con lo que resulta un polvo seco, que cumple con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones, destacándose la propiedad de fraguar y endurecer, aun bajo el agua.



4.- Cal hidratada, al alto calcio

Cal hidratada, producto de la calcinación de calizas, contaminadas con menos del 5% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ).

5.- Cal dolomítica

Cal obtenida de la calcinación de calizas que contiene del 35 al 46% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ).

Los materiales por estabilizar y la cal para estabilización, cumplirán con los requisitos de calidad de la norma N-CMT-4-03-001/02.

Los materiales para terracerías, revestimientos, subbases, bases o recuperados obtenidos de los trabajos de conservación o reconstrucción de pavimentos, se podrán estabilizar con cal siempre y cuando su índice plástico sea mayor al 10% y contengan 7% o más de partículas finas, menores que la malla N° 200 (0.075 mm de abertura), que reaccionen con la cal, constituidas fundamentalmente por minerales arcillosos.

Es recomendable definir previamente el tipo de minerales arcillosos que contiene el material, así como sus porcentajes, mediante procedimientos de barrido con microscopio electrónico, difracción de rayos X, capacidad de intercambio cationico y análisis térmico diferencial, en otros procedimientos.

Composición química de la cal

La cal viva y la cal hidratada que son las más utilizadas en estabilizaciones, cumplirán con la composición química que se indica en las tablas C3 y C4.

Tabla C3. Composición química de la cal viva para estabilizaciones.

Característica	Valor %
Óxidos de calcio y magnesio calculado sobre la muestra calcinada, mínimo*	60
Contenido de bióxido de carbono cuando la muestra se toma en el lugar de fabricación, máximo	3
Sílice, alúmina y óxidos de hierro, máximo	8

\* Este dato será indicado por el fabricante.

Características físicas

Cal hidratada

La cal hidratada no contendrá más de 3% de partículas retenidas en la malla N° 100 (0.15 mm de abertura) y no más del 10% retenidas en la malla N° 200 (0.075 mm de abertura) de acuerdo con el procedimiento indicado en el manual M-MMP-4-02-003, residuo y características granulométricas de la cal.



Tabla C4. Composición química de la cal hidratada para estabilizaciones.

Característica	Valor %
Óxido de calcio, bases no volátiles, mínimo*	80
Óxido de magnesio, máximo*	5
Contenido de bióxido de carbono, máximo: Si la muestra es tomada en el lugar de fabricación	10
Si la muestra es tomada en otro lugar diferente al de fabricación	12
Agua libre, en la muestra original, máximo	3
Óxido de calcio libre (sobrecalcinado) en la cal hidratada, máximo*	3

\* Este dato será indicado por el fabricante.

### Cal viva

Toda la cal pasará por una malla con abertura de 25 mm (1") y será retenida en la malla de 6.3 mm ( $\frac{1}{4}$ "). Presentará una elevación de temperatura mínima de 30 °C en 20 minutos de acuerdo con el procedimiento indicado en el manual M-MMP-4-02-010, calor de hidratación de la cal viva. No presentará más de 15% de residuo o retenido en la malla N° 50 (0.3 mm de abertura), de acuerdo con el procedimiento indicado en el manual M-MMP-4-02-003, residuo y características granulométricas de la cal.

### Yeso

El yeso, el aglomerante más antiguo de que se tiene noticia, es un material natural que al molerse y deshidratarse forma un polvo, que al volverse a combinar con agua, se convierte en una pasta moldeable que fragua con el tiempo.

### Características y propiedades

Por sus propiedades bioclimáticas, los revestimientos de yeso contribuyen al confort, creando un clima ambiente sano y equilibrado.

Son térmicamente aislantes: debido a su gran inercia térmica y su bajo coeficiente de conductividad, reducen los puentes térmicos y eliminan el fenómeno de pared fría.

Regulan la humedad ambiente: los revestimientos de yeso respiran con una auténtica piel, regulando la temperatura y activando la aireación del local. Aseguran así, un grado higrométrico equilibrado, absorbiendo rápidamente la humedad en exceso, para restituirla al ambiente cuando el aire está más seco.

Protegen en caso de incendio: son incombustibles, prolongan la resistencia al fuego, no despiden vapores tóxicos ni humos. En presencia del fuego, el yeso desempeña un papel activo, ya que gracias al agua de cristalización, no solo se limita a frenarlo, sino que absorbe una considerable cantidad de calor.

Absorbente acústico: tienen cierta elasticidad, lo que unido a su estructura interna finamente porosa, hace que se comporte como un buen absorbente acústico, disminuyendo reverberaciones y amortiguando las ondas sonoras.



Entre otras características del yeso, es compatible con los distintos tipos de agua del país, tiene una granulometría uniforme, alto índice de pureza, máximo rendimiento.

### Agregados

Los agregados son componentes derivados de la trituración natural o artificial de piedras, y pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra.

Aunque hay varias formas de clasificar a los agregados, uno de los más comunes es el que los separa en agregados gruesos y finos, dependiendo del diámetro medio de sus partículas. Si se usa una malla N° 4 (4.75 mm), lo que se queda retenido en la malla son agregados gruesos; lo que pasa esta malla pero que es retenido en una malla N° 200 (0.075 mm) son los agregados finos.

A los agregados gruesos a veces se les denomina gravas; a los finos, arenas. Sin embargo, en términos generales hay más variedad de agregados: los hay pesados como la barita, que ofrecen alta densidad; ligeros como la piedra pómez o la escoria volcánica para concretos ligeros; y hay también otras categorías de gravas y arenas trituradas.

#### Arenas:

Los agregados finos o arenas consisten en arena natural extraída de los ríos, lagos, depósitos volcánicos o arenas artificiales, esto es, que han sido triturados.

Estos agregados abarcan normalmente partículas entre 4.75 y 0.075 mm. La arena es más importante para darle finura al cemento.

Arena, masa agregada e incoherente de materiales minerales en estado granular fino, que consta normalmente de cuarzo (sílice) con una pequeña proporción de mica, feldespato, magnetita y otros minerales resistentes. Es el producto de la desintegración química y mecánica de las rocas bajo meteorización y abrasión. Cuando las partículas acaban de formarse suelen ser angulosas y puntiagudas, haciéndose más pequeñas y redondeadas por la fricción provocada por el viento y el agua.



## ANEXO D

### Aplicaciones de materiales cementantes

#### Cemento

##### Cemento Pórtland Ordinario (CPO)

Máximo desempeño de alta resistencia, fraguado rápido y durabilidad en la construcción de losas de concreto, columnas, castillos, dalas, zapatas, alcantarillados, obras sanitarias y prefabricados de todo tipo (pretensados, tabicones, adoquines, adocretos, bloques, postes de luz, etc.).

Este cemento es compatible con todos los materiales convencionales, tales como: arenas, gravas, piedras, cantera, mármol, etc., así como con los pigmentos (preferentemente los que resisten la acción solar) y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomiendan sus fabricantes.

##### Cemento Pórtland Compuesto (CPC)

Excelente desempeño, alta resistencia, fraguado rápido y durabilidad en la construcción de losas de concreto, columnas, castillos, dalas, zapatas, alcantarillados, obras sanitarias y prefabricados de todo tipo.

Este cemento es compatible con todos los materiales convencionales, tales como: arenas, gravas, piedras, cantera, mármol, etc., así como con los pigmentos (preferentemente los que resisten la acción solar) y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomiendan sus fabricantes.

##### Cemento Pórtland Puzolánico (CPP)

Excelente desempeño, alta resistencia, fraguado rápido y durabilidad en la construcción de losas de concreto, columnas, castillos, dalas, zapatas, alcantarillados, obras sanitarias y prefabricados de todo tipo.

Ideal en la construcción de zapatas, pisos, columnas, castillos, dalas, muros, losas, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (bancas, mesas, fuentes, escaleras, etc.).

Especialmente diseñado para maximizar la durabilidad de la construcción sobre suelos salinos. El mejor para obras expuestas a ambientes químicamente agresivos. Alta durabilidad en prefabricados para alcantarillados como: brocales para pozos de visita, coladeras pluviales, registro y tubería para drenaje.

#### Cal

En seguida, una descripción de usos y aprovechamientos de la cal:

- Estabilización de suelos: la cal, en virtud a su reacción química y física con suelos arcillosos, produce bases estables para la construcción de carreteras, calles, avenidas, bulevares, áreas de estacionamiento, patios, centros comerciales, aeropuertos, entre otros, con un sustancial ahorro en consumo de agregados y acarreo de materiales.



- Estabilización de presas y canales de riego: la cal es muy efectiva con suelos sumergidos en agua, como vasos de presas, canales de irrigación, diques y represas, desarrollando la suficiente resistencia y estabilidad para prevenir reblandecimientos, reducir filtraciones y resistir la erosión del agua.
- Neutralizador de tierras ácidas: al abonar la tierra con cal se produce una serie de procesos químicos, físicos y biológicos, tales como descomposición de organismos, transformación de sustancias venenosas y dañinas; proporcionando el calcio y magnesio a las plantas, y la reducción y neutralización de acidez en la tierra, todo ello con el beneficio de una mayor productividad del campo.
- Impermeabilizante: la cal también es un magnífico y económico impermeabilizante. Una sencilla mezcla de alumbre, jabón de pastilla amarillo y cal hidratada, disueltos en un tambor de agua tibia, proporciona una solución impermeable que evita la transminación de agua.
- Pintura: las pinturas a base de cal dan belleza e higiene a las casas, además de ser muy económicas, pues se pintan fachadas, bardas e interiores con un ahorro, y con la ventaja de que la cal es un material ecológico.

### Yeso

Este producto resulta ideal para hacer molduras y vaciados, también puede ser utilizado en mezcla con arena para sustituir el cemento en construcciones que no soporten grandes cargas, tales como bardas chicas y tabiques.

Se emplea además en productos prefabricados, tales como plafones, láminas de tabla roca, placas acústicas y cartones enyesados para su uso en muros domésticos. Para aplicaciones prácticas, el yeso es altamente versátil: es resistente al fuego, no es abrasivo (de hecho es un material muy blando, tiene baja temperatura de calcinación; se puede usar como agente oxidante y para acabados en construcción.

Una aplicación agrícola es que mejora la estructura o condiciones del suelo, ya que neutraliza las sales y los álcalis. Sirve para que los vegetales aprovechen más los fertilizantes e incluso mejora la productividad de las legumbres.

### Agregados

Arena:

La arena de arenas ensacadas combinada con cemento, cal, agua y otros agregados es ideal para producir mezclas adherentes tales como morteros, concretos, lechadas, etc., mismos que pueden ser usados para fabricar elementos de construcción tales como losas, columnas, trabes, plantillas, muros, acabados, etc. Así mismo la arena inerte puede ser utilizada para camas de arena, filtros, revestimientos, etc.

- Arena gris o blanca: mezclándola con cemento y agua, sirve para rellenos, revestimientos, tabiques, alisados, acabados.
- Arena fina negra: esta arena es más ligera que la gris, pero ofrece los mismos usos.
- Arena negra  $\frac{3}{16}$ : sirve para la fabricación de tabicón, block, adoquín.





- Arena roja  $3/16$ : jardinería, parques, jardines, caminos, macetas.
- Arena tezontle: mezclándola con cemento se obtiene una masa muy ligera, sirve para jardinería, rellenos.
- Tepetate: es una arena arcillosa, ideal para rellenos por su fácil compactación.
- Arenas silicas: se utilizan para la elaboración de cristal, proyección para limpieza de fachadas, filtros de alberca, jardines para niños.
- Tepojal: este material es de origen mineral, muy ligero, de color ocre poroso, inerte pero por su textura tiende a la degradación después de varios usos, aunque por no estar industrializado es barato. Es aplicable para fabricar tabicones y para germinación.
- Arena andesita: es la roca intermedia entre la riolita y el basalto, la asociación riolita-andesita-basalto sugieren que estas rocas son producto de la cristalización normal de un magma originalmente homogéneo, o que las andesitas pueden resultar de la solidificación del basalto por material silico de la corteza. La andesita suele utilizarse como material de construcción.

## ANEXO E

### REPORTE FOTOGRAFICO DEL TREN DE TRATAMIENTO DE LA PLANTA POTABILIZADORA EN ESTUDIO



FOTO E.1 TANQUE DE RECEPCIÓN DE AGUAS CRUDAS



FOTO E.2 CANALES PARSHALL



FOTO E.3 SECCIÓN DE FLOCULACIÓN



FOTO E.4 SECCIÓN DE SEDIMENTACIÓN



FOTO E.5 SISTEMA CLARIVAC



FOTO E.6 SECCIÓN DE FILTRACIÓN

	
<p><b>FOTO E.7 ESPESADOR</b></p>	<p><b>FOTO E.8 CÁRCAMO DE BOMBEO DE LODOS ESPESADOS A PRESA DE LODOS</b></p>
	
<p><b>FOTO E.9 PRESA DE LODOS</b></p>	<p><b>FOTO E.10 TARQUINA No. 1</b></p>

La foto E.1 presenta el tanque de recepción de aguas crudas (TRAC), donde es homogeneizada el agua cruda de las diferentes presas que abastecen la planta potabilizadora en estudio para su tratamiento. En la foto E.2 se muestran los canales Parshall de la planta potabilizadora en estudio con sus respectivos equipos de dosificación de cloro y sulfato de aluminio, en los cuales se realiza también la coagulación por medio de un mezclado rápido. La foto E.3 muestra la sección de floculación, en la cual por medio de un sistema de mamparas se efectúa un mezclado lento que garantiza la formación de los flóculos. La foto E.4 presenta la sección de sedimentación, en donde se realiza la separación de lodos del agua. En la foto E.5 se aprecia el sistema CLARIVAC, el cual tiene como finalidad succionar los lodos que se acumulan en la sección de sedimentación antes descrita. La foto E.6 muestra la sección de filtración, en la cual se separan los sólidos que aún contenga el agua clarificada. En la foto E.7 se aprecia un espesador, el cual tiene como objetivo concentrar los lodos y el agua eliminada es recirculada al inicio del proceso. La foto E.8 presenta el cárcamo de bombeo de lodos. En la foto E.9 se observa la presa de lodos, en la cual se concentra la mayor parte de lodo generado por los trenes del proceso de tratamiento, que es enviado desde el cárcamo de bombeo de lodos. En la foto E.10 se puede apreciar la tarquina 1, que es utilizada para concentrar lodos provenientes de la presa de lodos de la planta.



## ANEXO F

Tabla F1. Técnicas analíticas para determinar fluidez.

<b>Técnica</b>	<b>ASTM</b>	<b>Especificación</b>
Prueba de Fluidez	C 230	Mesa de fluidez para uso en muestras de cemento hidráulico
	C 1437	Fluidez de cemento mortero hidráulico
	C 939	Fluidez de Grouts en cono de asentamiento (sin agregado o con agregado fino)
	C 143	Fluidez de Grouts en cono de asentamiento (con agregado grueso)

Tabla F2. Técnicas analíticas para determinar resistencia a la compresión y contracción por secado.

<b>Técnica</b>	<b>ASTM</b>	<b>Especificación</b>
Resistencia a la Compresión	C 109	Resistencia a la compresión de cemento mortero hidráulico (usando especímenes cubos de 2")
	C 349	Resistencia a la compresión de cemento mortero hidráulico (usando porciones de prismas en flexión)
Contracción por Secado	C 157	Cambio de longitud de endurecimiento de cemento mortero hidráulico y concreto
	C 1012	Cambio de longitud de cementos morteros hidráulicos expuestos a una solución de sulfatos



## ANEXO G

Tabla G1. Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales (junio de 2005, época de estiaje)

Muestra	Turbiedad, NTU	% de remoción de turbiedad	Sólidos Suspendidos Totales, g/L	% de remoción de sólidos suspendidos totales	SST/Turb (mg/L* UTN)	MODULO
SI1-C3	3,85	33,51	0,0207	72,52	2,22	C
SE1-C3	2,56		0,0057			
SI2-C3	3,95	34,68	0,0051	65,97	1,30	
SE2-C3	2,58		0,0018		0,68	
SI3-C3	5,5	39,45	0,0194	62,46	3,54	
SE3-C3	3,33		0,0073		2,19	
SI1-D3			0,0086	59,16		D
SE1-D3			0,0035			
SI2-D3	0,74	12,16	0,0107	43,15	14,40	
SE2-D3	0,65		0,0061		9,32	
SI3-D3	5,89	62,14	0,0157	79,58	2,67	
SE3-D3	2,23		0,0032		1,44	
SI1-E1	2,4	48,75	0,0120	30,65	5,00	E
SE1-E1	1,23		0,0083		6,77	
SI2-E1	3,78	35,19	0,0163	63,28	4,31	
SE2-E1	2,45		0,0060		2,44	
SI3-E1	4,78	53,77	0,0209	62,24	4,37	
SE3-E1	2,21		0,0079		3,57	
SI1-F3	6,94	48,41	0,0267	63,35	3,85	F
SE1-F3	3,58		0,0098		2,73	
SI2-F3	7,22	49,31	0,0250	72,26	3,46	
SE2-F3	3,66		0,0069		1,89	
SI3-F3	6,83	59,30	0,0266	87,92	3,89	
SE3-F3	2,78		0,0032		1,16	

Número 1,2,3: número de muestreo; C3, D3, E3 Y F3: Identificación de Sedimentadores de los bloques C, D, E y F



Tabla G2. Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales (23 de junio de 2005, época de estiaje)

No.	Muestra	Turbiedad, NTU	% de remoción de turbiedad	Sólidos Suspendidos Totales, g/L	% de remoción de sólidos totales	SST/Turb (mg/L* UTN)	MODULO
1	SI1-C3			0,0286	48,44		C
2	SE1-C3	4,43		0,0147		3,33	
3	SI2-C3	6,32	43,20	0,0237	69,56	3,76	
4	SE2-C3	3,59		0,0072		2,01	
5	SI3-C3	7,81	33,80	0,0245	58,29	3,14	
6	SE3-C3	5,17		0,0102		1,98	
7	SI1-D3	7,74	73,00	0,0300	80,55	3,88	D
8	SE1-D3	2,09		0,0058		2,79	
9	SI2-D3	5,72	38,99	0,0245	70,20	4,28	
10	SE2-D3	3,49		0,0073		2,09	
11	SI3-D3	8,27	58,16	0,0256	75,17	3,09	
12	SE3-D3	3,46		0,0064		1,84	
13	SI1-E1	7,54	65,65	0,0295	66,30	3,91	E
14	SE1-E1	2,59		0,0099		3,83	
15	SI2-E1	6,49	71,96	0,0177	62,95	2,73	
16	SE2-E1	1,82		0,0066		3,61	
17	SI3-E1	9,05	59,78	0,0220	62,87	2,43	
18	SE3-E1	3,64		0,0082		2,25	
19	SI1-F3	6,62	54,08	0,0169	43,76	2,55	F
20	SE1-F3	3,04		0,0095		3,12	
21	SI2-F3	8,09	70,33	0,0209	67,83	2,58	
22	SE2-F3	2,4		0,0067		2,80	
23	SI3-F3	8,79	54,49	0,0277	79,18	3,15	
24	SE3-F3	4		0,0058		1,44	

Número 1,2,3: número de muestreo; C3, D3, E3 Y F3: Identificación de Sedimentadores de los bloques C, D, E y F



Tabla G3. Resultados de análisis de sólidos suspendidos totales (2 de agosto de 2005, época de lluvias)

No.	Muestra	Turbiedad NTU	% remoción turbiedad	Sólidos Suspendidos Totales, g/L	% remoción SST	MODULO
1	SI1-C3	4,23	99,76	0,02	80,00	C
2	SI2-C3	2,19	99,54	0,02	75,00	
3	SI3-C3	5,88	99,83	0,03	50,00	
4	SC1-C3	214,4		0,368		
5	SC2-C3	0,7		0,016		
6	SC3-C3	246,9		0,455		
7	SE1-C3	0,01		0,004		
8	SE2-C3	0,01		0,005		
9	SE3-C3	0,01		0,015		
10	SI1-D3	0,72	98,61	0,034		D
11	SI2-D3	5,9	99,83	0,032	87,50	
12	SI3-D3	7,37	99,86	0,032	93,75	
13	SC1-D3	2,61		0,022		
14	SC2-D3	6,5		0,028		
15	SC3-D3	10,14		0,028		
16	SE1-D3	0,01				
17	SE2-D3	0,01		0,004		
18	SE3-D3	0,01		0,002		
19	SI1-E3	2,92	99,66	0,024	83,33	E
20	SI2-E3	2,1	99,52	0,026	46,15	
21	SI3-E3	0,31	96,77	0,028	92,86	
22	SC1-E3	83,8		0,206		
23	SC2-E3	61,4		0,188		
24	SC3-E3	0,01		0,01		
25	SE1-E3	0,01		0,004		
26	SE2-E3	0,01		0,014		
27	SE3-E3	0,01		0,002		
28	SI1-F3	1,42	99,30	0,022		F
29	SI2-F3	2,48	99,60			
30	SI3-F3	0,59	98,31	0,02		
31	SC1-F3	789,5				
32	SC2-F3	61,5		0,2		
33	SC3-F3	462,8		0,62		
34	SE1-F3	0,01				
35	SE2-F3	0,01				
36	SE3-F3	0,01				

Número 1,2,3: número de muestreo; C3, D3, E3 Y F3: Identificación de Sedimentadores de los bloques C, D, E y F