



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

## VALORACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS POTABILIZADORAS PARA ELABORAR PRODUCTOS CERÁMICOS

### T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA AMBIENTAL  
P R E S E N T A :

**I. Q. FABRICIO ESPEJEL AYALA**

TUTOR:

**DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA**



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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. MARÍA DE LOURDES CHÁVEZ GARCÍA

Secretario: DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

Vocal: DR. ALFONSO HUANOSTA TERA

1<sup>er</sup>. Suplente: M. C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS

2<sup>do</sup>. Suplente: M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

SUPLENTE

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

DRA. ROSA MARIA RAMIREZ ZAMORA

## **DEDICATORIAS**

**A DIOS, SIEMPRE EN MÍ, SIEMPRE EN  
TODO**

**CON MUCHO CARIÑO PARA MIS  
PADRES EN LOS CUALES SIEMPRE HE  
VISTO UN APOYO INCONDICIONAL**

**A EMMANUEL Y A PAULA, POR  
AQUELLOS MOMENTOS EN LOS  
CUALES SE INTENSIFICARON LAS  
FUERZAS PARA CONTINUAR  
ADELANTE**

**A MIOS TIOS QUIENES NO SE  
ENCUENTRAN PRESENTES YA EN  
ESTA VIDA POR LOS DESIGNIOS DE  
DIOS MISMO**

**A MI AMIGA MONSERRAT (FATIMA),  
QUIEN MURIÓ DESEANDO NUNCA  
HABER PARTIDO**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A LA DRA. ROSA MARIA RAMIREZ ZAMORA POR SU PACIENCIA, ENSEÑANZA APOYO, Y POR LA CONFIANZA DEPOSITADA EN MI PARA SALIR ADELANTE.**

**A LA DRA. MARIA DE LOURDES CHAVEZ GARCIA POR LOS CONOCIMIENTOS BRINDADOS EN EL AREA DE CERAMICOS.**

**AL DR. ALFONSO HUANOSTA TERA, AL MTRO. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS Y AL MTRO. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, POR ACEPTAR SER PARTE DEL JURADO Y DAR SUS OBSERVACIONES PARA LA MEJORA DE ESTE TRABAJO.**

**A LA Q. F. B. SOLEDAD LUCARIO, APOYANDO SIEMPRE EN LA ADQUISICION DE MATERIALES PARA QUE SALGAN CON BUEN FIN LAS INVESTIGACIONES.**

**A TODAS LAS PERSONAS QUE PARTICIPARON EN ESTE TRABAJO: MUESTREO: MARCELO, OSWALDO, JORGE, ARTURO Y BERTHA. MOLIENDA: MONSERRAT Y DR. ANTONIO HUERTA CERDAN, DE LA FACULTAD DE QUIMICA. COCCION DE MATERIALES: DRA. MARIA DE LOURDES Y AL LABORATORISTA ALBERTO. PRUEBAS DE COMPRESION: DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSSENS, DE LA FACULTAD DE INGENIERIA.**

**A LA DRA. NATALIE CABIROL, POR LA AMISTAD BRINDADA.**

**A MIS AMIGOS DE LA MAESTRÍA: MONICA, IVANIA, CLAUDIA.**

**A ARIADNA MORALES, POR SUS OBSERVACIONES HACIA ESTE TRABAJO**

**AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT), POR LA BECA OTORGADA PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.**

**AL INSTITUTO DE INGENIERIA POR LOS RECURSOS MATERIALES Y ECONOMICOS BRINDADOS.**

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, LA MAXIMA CASA DE ESTUDIOS EN LA CUAL SE APRENDE EN SERIO.**

**A MIS AMIGOS: JOSE, JUAN MANUEL, PEPE, DOÑA CHAYO, CARLOS, CHAYITO, ABI, YOSE; POR LOS CONSEJOS BRINDADOS.**

**CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>SUMMARY</b> .....	4
<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	14
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	14
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	15
2.1 Generalidades de lodos fisicoquímicos producidos en plantas de tratamiento de agua potable.....	15
2.1.1 Definiciones de lodos fisicoquímicos.....	15
2.1.2 Procesos de producción.....	16
2.1.3 Características de lodos.....	16
2.1.4 Tratamiento, disposición y manejo.....	20
2.1.5 Legislación.....	23
2.1.5.2 Nivel Internacional.....	25
2.2 Panorama general de las opciones de aprovechamiento y reutilización de lodos	27
2.2.1 Panorama general de las tecnologías de aprovechamiento y reutilización de lodos.....	29
2.2.1 Tipos de opciones de aprovechamiento y reutilización.....	29
2.2.2 Tendencias de aprovechamiento y reutilización.....	30
2.2.3 Estudio de casos de aplicación de residuos para elaborar productos cerámicos.....	35
2.3 Aspectos generales de los productos cerámicos.....	46
2.3.1 Silicatos.....	46
2.3.2 Definiciones y clasificación (ordinarios y refractarios).....	50
2.3.2.1 Generalidades de productos cerámicos ordinarios (tradicionales).....	50
2.3.3 Materias primas y procesos de producción de ladrillos cerámicos.....	51
2.3.4 Productos cerámicos tradicionales (alfarería).....	54
2.3.5 Impacto ambiental de la producción de productos cerámicos.....	54
<b>CAPITULO III. METODOLOGÍA</b> .....	57
3.1 Metodologías de las pruebas de elaboración de productos cerámicos a partir de lodo de plantas potabilizadoras.....	57
3.1.1 Materiales y reactivos.....	57
3.1.1.1 Lodo.....	57
3.1.1.2 Arcilla roja.....	59
3.2 Sistemas y técnicas experimentales.....	59
3.2.1 Caracterización de lodo.....	59
3.2.2 Pruebas exploratorias.....	59
3.2.3 Pruebas finales.....	60
3.2.3.1 Diseño experimental.....	60
3.2.3.2 Descripción de pruebas finales.....	62
3.2.4 Técnicas analíticas.....	65
3.2.5 Evaluación de la factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental de la opción de reúso planteada.....	69
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	71
4.1 Estimación de volúmenes de los flujos de los lodos generados.....	71
4.1.1 Comparación respecto a producción promedio estimada con la ecuación de Kawamura y datos reportados para otras plantas potabilizadoras.....	78

4.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras colectadas en la época de estiaje y de lluvias en la planta potabilizadora “Los Berros”.....	79
4.3 Resultados del análisis de contenido de óxidos y de composición mineralógica.....	81
4.3.1 Análisis de contenido de óxidos para los lodos depositados en la PPLB y la arcilla roja utilizada en las pruebas de elaboración de materiales cerámicos.....	81
4.3.2 Análisis de composición mineralógica de los lodos generados y almacenados en la PPLB y de la arcilla roja empleada en la elaboración de materiales cerámicos...	82
4.4 Resultados obtenidos en las pruebas preliminares de elaboración de productos cerámicos.....	84
4.4.1 Probetas cerámicas.....	84
4.4.2 Esferas para soporte de cultivos hidropónicos.....	86
4.4.3 Productos de alfarería.....	86
4.5 Resultados obtenidos en las pruebas finales de elaboración de probetas y de ladrillos cerámicos con lodo proveniente de la PPLB y una arcilla convencional.....	88
4.5.1 Diseño experimental.....	88
4.5.2 Pruebas adicionales.....	99
4.6 Evaluación de la Factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental de la opción de reúso planteada.....	100
4.6.1 Evaluación de la Factibilidad Técnica.....	101
4.6.2 Evaluación de la Factibilidad Económica.....	103
4.6.3 Evaluación de la Factibilidad Social.....	107
4.6.4 Evaluación de la Factibilidad Ambiental.....	108
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	117
<b>ANEXO I.</b> Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección Ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites para su aprovechamiento y disposición final.....	124
<b>ANEXO II.</b> Resultados del análisis mineralógico realizado a las muestras de lodos en el Instituto de Geología.....	129
<b>ANEXO III.</b> Análisis estadístico del porcentaje de contracción y la densidad de los ladrillos elaborados con lodo y arcilla.....	137
<b>ANEXO IV.</b> Evaluación de Impacto Ambiental.....	142

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1 Diagrama de Operación de la planta potabilizadora bajo estudio.....	9
Figura 1. 2. Diagrama de espesamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora bajo estudio.....	12
Fig. 2.1. % de absorción de agua de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).....	41
Fig. 2.2. % de contracción por secado de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).....	41
Fig. 2.3. % de pérdida por ignición de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).....	41
Fig. 2.4 Densidad de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).....	41
Fig. 2.5 Resistencia a la compresión de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).....	42
Fig. 2.6% de absorción de agua para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. et al., 2002).....	44
Fig. 2.7 % de porosidad para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. et al., 2002).....	44
Fig. 2.8 Densidad aparente para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. et al., 2002)	45
Fig. 2.9 % de contracción lineal para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. et al., 2002).....	45
Figura 2.10. Tetraedro elemental o la pirámide triangular de los silicatos (Domínguez y Schifter, 1995).....	46
Figura 2.11. Agrupamiento de las arcillas en función de la composición (Avgustinik A. I., 1983).....	49
Figura 2.12. Generación de residuos en la industria de la cerámica.....	55
Figura 3.1. Puntos de muestreo en las estructuras de almacenamiento de lodos (tarquinas) de la Plantapotabilizadora “Los Berros”.....	58
Figura 3.2 Perfil de temperatura desarrollado en la cocción de las probetas y ladrillos cerámicos.....	65
Figura 3.3. Trazado de línea de encogimiento para determinar el porcentaje de contracción por cocción (Vázquez Malagón, 2001).....	67
Figura 4.1. Tendencia anual en la generación de lodos en la Planta potabilizadora “Los Berros” (valores calculados teóricamente).....	73
Figura 4.2. Diagrama de bloques utilizado para establecer el balance de materia en un sedimentador de la planta potabilizadora “Los Berros” (PPLB), Sistema Cutzamala.....	74
Figura 4.3. Probeta elaborada con 75 % de lodo y 25 % arcilla tipo “ball clay” (14 % de contracción por cocción).....	85
Figura 4.4 Probeta elaborada con 50 % de lodo y 50 % arcilla tipo “ball clay” (14 % de contracción por cocción).....	85
Figura 4.5 Pieza de cerámica elaborada con 100 % de arcilla tipo “ball clay”.....	85
Figura 4.6. Pieza elaborada con 50% de lodo de tarquina y 50% de barro tradicional.....	87
Figura 4.7. Pieza elaborada tradicionalmente por los alfareros de Texcoco.....	87
Figura 4.8. Pieza de mayor tamaño elaborada con 50% de lodo y 50% de barro tradicional.....	87
Figura 4.9.Gráfica de Pareto para el porcentaje de absorción de agua.....	90
Figura 4.10.Gráfica de Pareto con las variables que afectan significativamente el porcentaje de absorción de agua.....	91
Figura 4.11. Curva de Superficie Respuesta Estimada.....	94
Figura 4.12. Efecto de la Temperatura de quema en la densidad y el porcentaje de absorción de agua para los especímenes realizados de acuerdo al diseño experimental.....	95



Figura 4.13 Especímenes que sufrieron deformación al ser quemado a una Temperatura de 1200 ° C.....	95
Figura 4.14. Ladrillo A (40% lodo sin calcinar).....	100
Figura 4.15. Ladrillo B (40% lodo calcinado).....	100
Figura 4.16. Ladrillo C (0% lodo).....	100
Figura 4.17. Aspecto en la coloración de los materiales elaborados (de abajo hacia arriba: ladrillo A, ladrillo B y ladrillo C).....	100
Figura A-1. Difractograma correspondientes a la muestra de lodo a 1 metro de profundidad en tarquina.....	130
Figura A-2. Difractograma correspondiente a la muestra compuesta de tarquina.....	131
Figura A-3. Difractograma correspondiente a la muestra de lodo de espesadores.....	132
Figura A-4. Difractograma correspondiente a la muestra de lodo de Sedimentador.....	133
Figura A-5. Difractograma correspondiente a la muestra de arena.....	135
Figura A-6. Difractograma correspondiente a la muestra de Arcilla.....	136
Figura A-7. Gráfica de Pareto para el porcentaje de contracción por cocción.....	138
Figura A-8. Gráfica de Pareto considerando la variables que afectan significativamente al porcentaje de contracción por cocción.....	138
Figura A-9. Gráfica de Pareto para el valor de densidad.....	140
Figura A-10. Gráfica de Pareto para el valor de densidad con las variables que afectan significativamente a la densidad.....	141

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Producción teórica de sólidos en plantas potabilizadoras (AWWA, 1991).....	16
Tabla 2.2. Características físicas de lodos (AWWA, 1991).....	17
Tabla 2.3. Composición típica de los lodos producidos con sales de hierro y aluminio en el tratamiento de agua (adaptada de Dillion, 1997).....	18
Tabla 2.4. Trazas de compuestos orgánicos (Comisión de Distribución del Agua AGHTM, Francia).....	19
Tabla 2.5 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).....	20
Tabla 2.6. Características químicas reportadas de un lodo coagulado con $Al_2(SO_4)_3$ (AWWA,1991).....	20
Tabla 2.7. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).....	24
Tabla 2.8 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).....	24
Tabla 2.9 Límites máximos permisibles para Patógenos y Parásitos en biosólidos y lodos.....	25
Tabla 2.10 Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción adicional de patógenos.....	27
Tabla 2.11. Valores límite de contaminantes en lixiviados para disposición en rellenos sanitarios de materiales no peligrosos (Goldbold et al., 2003).....	28
Tabla 2.12. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países.....	32
Tabla 2.13. Composición química (FRX) de los lodos secos, en términos de componentes de óxidos (Ferreira J. M. F. et al., 2001).....	35
Tabla 2.14. Composiciones para la elaboración de ladrillos y losetas a partir de lodos generados del cortado de granito natural (Ferreira J. M. F. et al., 2001).....	36
Tabla 2.15. Propiedades relevantes de los productos cerámicos cocidos y elaborados a partir de lodos generados del cortado de granito natural (Ferreira J. M. F. et al 2001).....	36
Tabla 2.16. Composición química (XRF) de los lodos secos y calcinados con respecto a los elementos relevantes (Ribeiro M. J. et al., 2002a).....	37
Tabla 2.17. Efecto de la adición de lodos en las características de losetas y ladrillos (Ribeiro M. J. et al., 2002a).....	38
Tabla 2.18. Composición porcentual por elemento de los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales (Ribeiro M. J. et al., 2002b).....	38
Tabla 2.19. Efecto de adición de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en la producción de vasijas de gres (Ribeiro M. J. et al., 2002).....	39
Tabla 2.20. Características de lodo y la arcilla (Weng C. H., et al., 2003).....	40
Tabla 2.21. Efectos de la proporción de lodos en el área específica y en el índice de plasticidad en las mezclas (Weng C. H., et al., 2003).....	40
Tabla 2.22. Caracterización de lodos provenientes de la industria de la curtiduría (Basegio T. et al., 2002).....	43
Tabla 2.23 Caracterización de la arcilla utilizada para la elaboración de especímenes de cerámica (Basegio T. et al., 2002).....	43
Tabla 2.24 Composiciones empleadas para elaborar especímenes de cerámica (Basegio	

T. et al., 2002).....	44
Tabla 2.25. Conclusiones relevantes en la elaboración de productos cerámicos con diferentes residuos.....	45
Tabla 2.26 Clasificación de los silicatos según su estructura.....	47
Tabla 2.27. Clasificación de los filosilicatos.....	47
Tabla 2.28. Fórmulas químicas de los minerales de las arcillas (Kingery, 1976).....	48
Tabla 2.29 Principales efectos de algunos compuestos en las arcillas (adaptada de Avgustinik A. I., 1983).....	49
Tabla 2.30. Clasificación de los materiales cerámicos porosos (Pauld. R. 1990).....	50
Tabla 2.31. Clasificación de ladrillos cerámicos y algunas características (Valverde M E., 2001).....	51
Tabla 2.32. Materia prima para la elaboración de ladrillo.....	51
Tabla 2.33. Dimensiones nominales para la elaboración de ladrillos (NMX-C-006-1976).	52
Tabla 2.34. Grados de calidad de los ladrillos elaborados en máquina y a mano (NMX-C-006-1976).....	52
Tabla 2.35. Normas mexicanas en relación de los contaminantes atmosféricos producidos en la industria cerámica.....	56
Tabla 2.36. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (NOM-002-SEMARNAT-1996).....	56
Tabla 3.2. Valores centrales y extremos en el diseño experimental desarrollado para realizar las pruebas de elaboración de materiales cerámicos.....	61
Tabla 3.3. Valores reales y valores codificados del diseño experimental planteado para la elaboración de ladrillos cerámicos.....	62
Tabla 3.4. Intervalo y tiempos de cocción para las probetas cerámicas.....	64
Tabla 3.5. Dimensiones de los especímenes (ASTM C126-99).....	66
Tabla 3.6. Esfuerzos mínimos a soportar para ladrillos (ASTM C126-99).....	66
Tabla 4.1. Datos históricos de flujo y turbiedad del agua cruda y de la dosis de coagulante suministrado en la planta potabilizadora “Los Berros” (mayo 2003 a mayo 2005).....	72
Tabla 4.2. Estimación de flujos máxicos de lodos generados en el periodo de mayo de 2003 a mayo de 2005 en la PPLB mediante la ecuación de Kawamura.....	73
Tabla 4.4. Resumen de datos y resultados obtenidos del balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la PPLB (removidos y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de estiaje (junio 2005).....	76
Tabla 4.5. Resumen de datos y resultados obtenidos del balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la planta potabilizadora “Los Berros” (removidos y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de lluvias (agosto 2005).....	77
Tabla 4.6. Estimación de la producción de lodos en La planta potabilizadora “Los Berros” mediante la medición de Sólidos Suspendidos Totales.....	77
Tabla 4.7 Comparación de datos de producción de lodos para la PPLB y otras plantas potabilizadoras.....	78
Tabla 4.7. Valores promedio de las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos generados y almacenados de la PPLB en época de estiaje.....	80
Tabla 4.8. Contenido de óxidos de los lodos de la PPLB, de la arcilla proveniente de los campos de cultivo del municipio de San Andrés Chiautla utilizada para elaborar las probetas y ladrillos; y comparación con ceniza de lodo para elaborar ladrillos en este trabajo.....	81

Tabla 4.9. Fases identificadas en el análisis de composición mineralógica de los lodos procedentes de la PPLB.....	83
Tabla 4.10 Contenido de minerales del lodo y de la arcilla roja para elaborar ladrillos cerámicos.....	84
Tabla 4.11. Características de las barras cerámicas elaboradas a partir de lodos y arcilla ball clay (Temperatura de cocción de 1,280 ° C).....	85
Tabla 4.12 Resultados de pruebas de elaboración de piezas de alfarería a partir de lodos y un barro tradicional.....	86
Tabla 4.13. Caracterización de las probetas elaboradas con lodo y la arcilla convencional de acuerdo al diseño experimental de tipo superficie respuesta.....	88
Tabla 4.14. Tabla de ANOVA para el porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla.....	90
Tabla 4.15. Minimización del porcentaje de absorción de agua.....	91
Tabla 4.16. Modelos matemáticos que optimizan a cada parámetro de respuesta.....	92
Tabla 4.17. Valores predichos y observados por el modelo matemático (valores codificados).....	92
Tabla 4.19. Análisis estadístico de los valores de resistencia a la compresión de los cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla mediante la distribución de Weibull.....	98
Tabla 4.20. Resultados obtenidos en la elaboración materiales cerámicos con lodo calcinado a 1000° C y la comparación con un testigo y un material elaborado con lodo sin calcinar.....	99
Tabla 4.21 Calificación correspondiente a la calidad de las pastas manejadas en la elaboración de ladrillos cerámicos a partir de lodo y arcilla roja/arena.....	101
Tabla 4.22 Calificación correspondiente a la temperatura de cocción y tamaño de grano empleados en la elaboración de ladrillos cerámicos a partir de lodo y arcilla roja/arena.....	102
Tabla 4.23. Distancia recorrida de la PPLB hasta los sitios de aprovechamiento, así como el costo de peaje.....	105
Tabla 4.24 Costos por consumo de combustible en el transporte de los lodos de la PPLB hasta los sitios de aprovechamiento.....	105
Tabla 4.25. Tipo de contaminantes emitidos según la etapa del proceso de fabricación de ladrillos.....	111
Tabla 4.26. Matriz de Evaluación Técnica, Económica, Social y Ambiental de la utilización de los lodos generados en la PPLB para elaborar productos cerámicos con lodo sin acondicionamiento (pruebas preliminares).....	113
Tabla 4.27. Matriz de Evaluación Técnica, Económica, Social y Ambiental de la utilización de los lodos generados en la PPLB para elaborar productos cerámicos con lodo acondicionado (pruebas finales).....	115
TABLA A-I LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSOLIDOS.....	126
TABLA A-II LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA PATOGENOS Y PARSITOS EN LODOS Y BIOSOLIDOS.....	127
TABLA A-III APROVECHAMIENTO DE BIOSOLIDOS.....	127
TABLA A-IV FRECUENCIA DE MUESTRO Y ANALISIS PARA LODOS Y BIOSOLIDOS....	128
Tabla A.4. Resultados de las muestras por difracción de rayos X.....	129
Tabla A-2. Resultados del análisis mineralógica de las muestras de arcilla roja y arena empleados en este estudio.....	134
Tabla A-3. Tabla de ANOVA para el porcentaje de contracción por cocción de los materiales cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla.....	137

---

Tabla A-4 Minimización del porcentaje de contracción por cocción.....	139
Tabla A-6 Optimización del valor de la densidad.....	140
Tabla A-9. Técnicas o métodos para llevara a cabo una Evaluación de Impacto Ambiental (Ortis Ramírez., L. G., 1998).....	144

**NOMENCLATURA**

ANOVA	Análisis de Varianza
ASTM	American Society Testing Materials
AWWA	American Water Works Association
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno
cm	Centímetros
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados
COH	Contenido Óptimo de Humedad
COT	Carbono Orgánico Total
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
CRETIB	Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, Biológico-Infecioso
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DOF	Diario oficial de la Federación
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDOMEX	Estado de México
EPA	Environmental Protection Agency
FRX	Fluorescencia de Rayos X
g/cm <sup>3</sup>	Gramo sobre centímetro cúbico
g/kg	Gramo por kilogramo
hp	Caballos de fuerza
kg	Kilogramo
Kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramo sobre centímetro cuadrado
kgf	Kilogramo fuerza
kPa	Kilo Pascales
kW	Kilo Watt
L	Litro
L/día	Litros por día
L/s	Litros por segundo
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LGC	Arcilla de grado bajo
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
m	Metros
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo
mm	Milímetros
mg/kg	Miligramos por kilogramo
mg/L	Miligramos por litro
NMP	Número más probable
PACl	Policloruros de aluminio
PCB's	Bifenilos policlorados
pH	Potencial de hidrógeno
PxC	Pérdidas por calcinación
PM <sub>2.5</sub>	Partícula con diámetro de 2.5 micras
PM <sub>10</sub>	Partículas con diámetro de 10 micras
PPLB	Plantapotabilizadora "Los Berros"
ppm	Partes por millón
PRC	Arcilla roja
PST	Partículas Suspendidas Totales
PTAR's	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
Q	Flujo volumétrico
SC	Arcilla tipo pizarra

SST	Sólidos Suspendidos Totales
ST	Sólidos Totales
t	Total
T:O	Tetraedro: Octaedro
Ton	Tonelada
Ton/año	Toneladas por año
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
%	Porcentaje
% p/p	Porcentaje peso/peso
° C	Grados Centígrados
° C/min	Grados Centígrados por minuto
$\sigma_0$	Resistencia de Weibull

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general determinar la factibilidad técnica, económica, social y ambiental al valorar los lodos procedentes de la planta potabilizadora “Los Berros” del Sistema Cutzamala (PPLB), como materia prima para elaborar, bajo condiciones óptimas, productos cerámicos (ladrillos). El trabajo se compone de cuatro capítulos: 1) marco teórico, 2) estudio experimental, 3) resultados y discusión y 4) conclusiones y recomendaciones.

En el primer capítulo se presenta la información relacionada con los lodos fisicoquímicos producidos en plantas potabilizadoras; por ejemplo, los procesos de producción, sus principales características, la legislación relacionada con estos residuos y las principales opciones de valoración. También en este capítulo se presentan los resultados de estudios que utilizaron lodos para elaborar principalmente ladrillos y la información general relativa a procesos de producción de materiales cerámicos.

En el segundo capítulo se presenta la metodología experimental del estudio, la cual se dividió en cuatro etapas: 1) muestreo y caracterización de los lodos de la PPLB; 2) realización de pruebas exploratorias de elaboración de productos cerámicos con mezclas elaboradas con los lodos de la PPLB; 3) realización de pruebas finales de producción de productos cerámicos a partir de mezclas elaboradas con los lodos de la PPLB y; 4) determinación y comparación de la factibilidad técnica, económica, social y ambiental de las pruebas exploratorias y de las finales.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada etapa de la metodología experimental. Con base en los resultados de la etapa de muestreo y caracterización se determinó que los lodos se pueden clasificar como excelentes según la NOM-004-SEMARNAT-2002, para contacto directo al presentar valores de metales pesados y microorganismos que cumplen con lo estipulado por la norma citada. Los lodos de la PPLB presentaron tan sólo el 5.5% del valor especificado para zinc en la norma. Para Arsénico, níquel y mercurio el 2.5%; para cobre y plomo el 0.93%; para cadmio el 0.48%; y para cromo el 0.23%. Las concentraciones medias de microorganismos, en el caso de coliformes fecales, su concentración fue de 0.8% del valor especificado por la norma; para *Salmonella spp.* fue de 73% y para Huevos de Helminto, el 5.77%. Estos residuos presentaron los constituyentes de una pasta cerámica (Caolinita presente en un 27.76%, que da plasticidad, Albita y Anortita presentes en un 8.58%, materiales fundentes y, cuarzo y cristobalita en un 16.53% que son materiales refractarios) aunque una considerable cantidad de materia orgánica (39.97%).

Con base en los resultados del contenido de Sólidos Suspendidos Totales (entrada y salida de sedimentadores) se estimó que la producción de lodos durante todo el año fue de 12,455 Toneladas. Esta cantidad, cubre las demandas estimadas de los sitios de aprovechamiento seleccionados en el estudio.



Los resultados de las pruebas exploratorias permitieron estimar que la pre-factibilidad de esta opción de valoración de los lodos de la planta potabilizadora “Los Berros” fue medianamente aceptable. Además, estos resultados y los reportados en estudios similares permitieron definir los intervalos de la Temperatura de cocción y del porcentaje de lodo en las mezclas a utilizar en las pruebas finales.

Con base en los resultados de las pruebas finales, se determinó que las condiciones óptimas de operación del proceso de elaboración de productos cerámicos, utilizando los lodos de la PPLB, fueron las siguientes: 27% de lodo en la pasta cerámica; tamaño de grano del lodo: 271  $\mu\text{m}$  y, temperatura de cocción: 1227.5° C. Bajo estas condiciones, los valores de las variables de optimización fueron: densidad, 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; porcentaje de absorción de agua, 13.4% y porcentaje de contracción por cocción 10%. Estos valores fueron similares a los medidos a un testigo (producto cerámico de tipo comercial).

Para estas condiciones óptimas en la estimación de la factibilidad económica, se determinó que, cuando se utiliza lodo para elaborar ladrillos, los costos por concepto de materiales, disminuyen en un 4.38% comparado con la elaboración de ladrillos utilizando solo arcilla roja y arena. En el aspecto ambiental y social, se determinó que es altamente factible la utilización de lodos para la elaboración de ladrillos. Los impactos ambientales negativos encontrados son poco persistentes.

En el capítulo cuatro se presentan las conclusiones y recomendaciones que se desprendieron del presente estudio. La principal conclusión fue que de manera global, los lodos de la PPLB presentaron una aceptable factibilidad técnica, económica, social y ambiental, para ser valorados como materia prima para elaborar productos cerámicos, bajo condiciones óptimas de operación.

## **SUMMARY**

The aim of the present work was to determine technically, economically, socially and environmentally the feasibility of the use of the sludge from a Drinking Water Treatment Plant “Los Berros”, of the Cutzamala System, as raw material to elaborate ceramic products (bricks) under optimal conditions. The project consists of four chapters: 1) references, 2) experimental study, 3) results and discussions and 4) conclusions and recommendations.

The first chapter presents the physicochemical characterization (data) for the sludge produced in the drinking water treatment plant; including its production process, main characteristics, related legislation (wastes) as well as the main available options for their evaluation. This chapter also includes references to previous works about the use of sludge to elaborate ceramics, mainly bricks, as well as general information related to the production processes of ceramic materials.

In the second chapter the experimental methodology of the study is presented, which was divided in the following four stages: 1) sludge sampling and characterization 2) exploratory tests accomplishment to test the elaboration of the ceramic product, 3) final tests accomplishment of elaboration of the ceramic product and, 4)elaboration of the technical, economical, social and environmental feasibility evaluation.

In the third chapter the report of the obtained results for each stage of the experimental methodology is presented. With base in the results of the sampling and characterization stage it was determined that the sludge under study can be classified as excellent for direct human contact under the NOM-004-SEMARNAT-2002 norm, due to its fulfillment of the requirements of this norm in terms of content of heavy metals and microorganisms. The zinc content for the sludge was found to be of 5.5% of the limit specified by the norm for this metal; in another hand arsenic, nickel and mercury contents represent only 2.5% of the limit; the value for copper and lead content was found to be 0.93% of the limit; for cadmium content a 0.48% of the limit was determined; and for chromium 0.23% of the permitted value. The averaged concentrations for microorganisms, were 0.8% for fecal coliforms, ; 73% for *Salmonella spp.* and 5.77% for Helminth eggs, .Eventough the components for a ceramic paste were found in these wastes (Kaolinite, 27.76%, -which gives it its plasticity-, 8.58%, of Albite and Anortite; which are melting materials and, quartz and cristobalite in 16.53% which are refractory materials) a considerable amount of organic matter (39.97%) was found as well.

Besides, the obtained result for total Suspended Solids, which was of 12,455 tons, (measured in the input and in the output of the clarifiers), allowed to consider that the yearly sludge production is enough to cover the estimated demand for sludge In the selected sites, of this study for the desired ceramic production.

The results for the exploratory tests allowed to classify the sludge under study as moderately acceptable along with those reported in similar studies, allowed to define the adequate intervals for baking Temperature and for the sludge percentage to be used in the mixtures for the final tests.

According to the results of the final tests, the optimal conditions for process operation were determined to the sludge from the PPLB,. The determined conditions were the following ones: 27% sludge content in the ceramic paste; size of grain: 271  $\mu\text{m}$  and, a baking temperature of: 1227.5 $^{\circ}$  C. Under these conditions the values for the variables for process optimization were: density, 1,6  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; percentage of water absorption, 13,4% and, percentage of contraction by baking, 10%. These values were similar to those measured in a blank sample (ceramic product of commercial type).

For these optimal conditions in the feasibility economic estimation study, it was determined that, when sludge is used to elaborate bricks, the costs, in terms of material cost, decrease in 4.38% compared with the elaboration of bricks using only red clay an sand. In the environmental and social aspect, it was determined that the use of sludge to elaborate bricks is highly feasible. The environmental negative impacts were found to be of little persistence.

In Chapter four the conclusions and recommendations obtained as outcome of this study are presented. The main conclusion was that, generally speaking, the PPLB sludge can be considered as a technical, economical, social and environmental feasible option to be used as raw material to elaborate ceramic products, under optimal conditions of operation.

## CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

La potabilización de agua es la ejecución de una serie de operaciones unitarias y procesos encaminados a producir agua que no contenga contaminantes perjudiciales (con características químicas y microbiológicas). Las aguas superficiales, fuente de agua para los sistemas de potabilización, son por lo general, más turbias que las aguas subterráneas y contienen un mayor número de sólidos suspendidos y bacterias que éstas, mientras que las aguas subterráneas concentran una mayor cantidad de productos químicos en disolución (Schultz y Okun, 1990). Debido a esto, para las aguas de tipo superficial es necesario aplicar coagulantes para remover los contaminantes en suspensión, generando como resultado de esto, lodos. Además, los procesos y actividades involucradas en la operación de las plantas potabilizadoras generan también en mayor o menor grado lodos. Al acumularse estos y 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 México, como en varios países, los lodos residuales generados en la potabilización de agua, se engloban en el término genérico como "lodos". Por ello, la regulación (NOM-004-SEMARNAT-2002) 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.

Debido a las características principales de este tipo de residuos (compuestos principalmente por hidróxidos precipitados) (Elliott et al., 1990), se puede plantear la posibilidad de ser reutilizados en diversas aplicaciones industriales ayudando, de esta manera, a reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente dándole un aprovechamiento (EPA, 1995).

### **Descripción general del tren de operación de la planta potabilizadora en estudio**

El proceso de potabilización de la planta potabilizadora bajo estudio inicia con la recepción de agua cruda en un tanque de almacenamiento, seguido del proceso de coagulación-floculación para la remoción de sólidos suspendidos y coloides. El agua cruda es bombeada a la caja de distribución de los canales Parshall en donde se realiza una precloración y se adiciona sulfato de aluminio líquido, aprovechando el salto hidráulico y la caja de transición de cambio de régimen de canal a tubería para obtener una buena dilución, antes de su llegada a los tanques de floculación. 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 los flóculos.

Posteriormente, el agua pasa al tanque de sedimentación a través de un muro con orificio. Los primeros 10 metros del 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 y de cloración en línea para finalmente 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 a todo lo largo 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 de lodos.

Los lodos producidos actualmente son espesados en los concentradores y transferidos a una laguna de almacenamiento que, debido al tiempo que lleva operando la planta, está saturada y no puede recibir mayor cantidad, razón por la que los lodos de esta laguna han sido enviados a través de bombeo a estanques formados con bordos de tierra denominados “tarquinas”, donde se disponen finalmente los lodos, evaporando el agua del sobrenadante. Actualmente se cuenta con dos “Tarquinas” en operación y se encuentra en proyecto una tercera.

Por otra parte, cada veinte días el personal de operación de la planta realiza el lavado a un tanque sedimentador. Este se pone fuera de servicio y la mayor parte del agua retenida en el sedimentador se transfiere a los filtros para continuar con el proceso de potabilización. La operación de lavado tiene una duración de 3 a 4 horas y se realiza manualmente utilizando la misma agua del sedimentador mediante el principio de sifón. Se utiliza un gasto de aproximadamente 200 L/s, durante tres horas. En la Figura 1.1 se muestra el diagrama de operación de la planta potabilizadora.

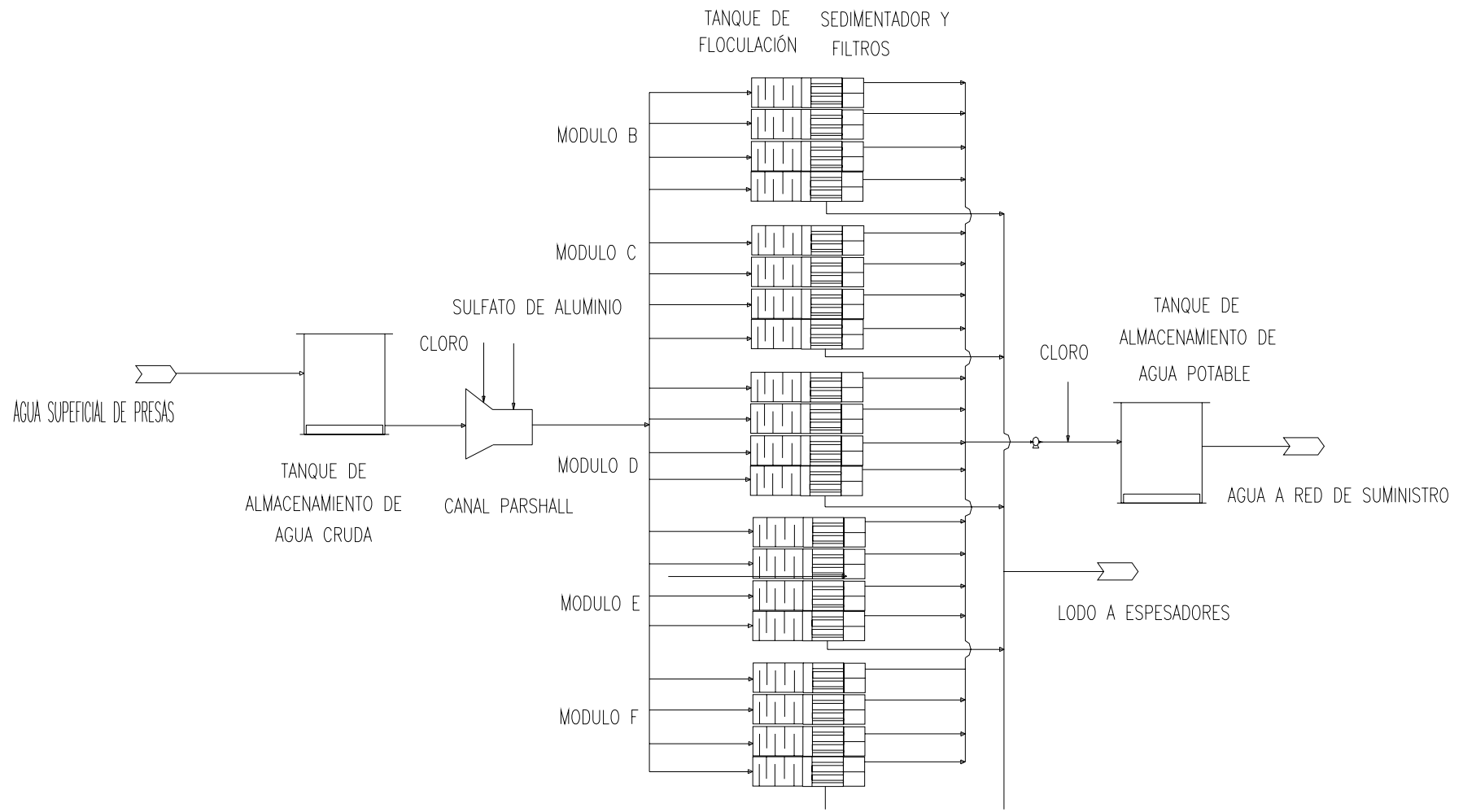


Figura 1.1 Diagrama de Operación de la planta potabilizadora "Los Berros".

## **Descripción del sistema de espesamiento, deshidratación y disposición de los lodos**

### **Espesadores**

La tubería principal de lodos de los sedimentadores descarga a una caja de distribución que envía a los lodos hacia los espesadores. El diámetro de la tubería es de 28" y es de acero al carbón. De esta caja de distribución se divide el flujo en dos líneas; cada una descarga a las cajas de mezclado con polielectrolito que se encuentran a la entrada de los espesadores. Las cajas de mezclado cuentan, cada una, con un agitador de flecha vertical, utilizado para mezclar y homogeneizar el lodo con el polielectrolito.

El polielectrolito es preparado en los cuartos de dosificación en un tanque de 2,950 L de capacidad, fabricado de acero al carbón y con agitador de tipo vertical. Se cuenta con dos cuartos de dosificación, uno para cada dos espesadores. La dosificación del polielectrolito es mediante bombas de tipo pistón diafragma, marca Penwalt y se controla en forma manual.

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

El lodo espesado es purgado periódicamente en cada espesador. La purga se controla mediante válvulas de 12" de diámetro, cuerpo de acero y operación manual. Se cuenta con una caja de recolección de lodo espesado por cada dos espesadores. Finalmente el lodo recolectado es transferido al cárcamo de bombeo de lodos hacia la laguna de almacenamiento de lodos.

### **Laguna de almacenamiento de lodos**

El cárcamo de transferencia de lodos cuenta con cuatro bombas centrífugas tipo sumergible que manejan 250 L/s. Las bombas operan 10 horas por día y la descarga de estas bombas es al canal de distribución de alimentación de la laguna de almacenamiento de lodos.

La laguna de almacenamiento de lodos tiene aproximadamente 40,000 m<sup>3</sup> de capacidad, pero 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 laguna. Para evitar el desborde, los lodos se envían desde esta laguna 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.

Parte de la fase líquida de la laguna se extrae mediante un sifón que descarga en un pequeño cárcamo de bombeo que cuenta con una bomba de retorno. El agua de la laguna es enviada por bombeo a la caja de recuperación de agua del sobrenadante de los espesadores. En La Figura 1.2 se ilustra el diagrama de espesamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora bajo estudio.



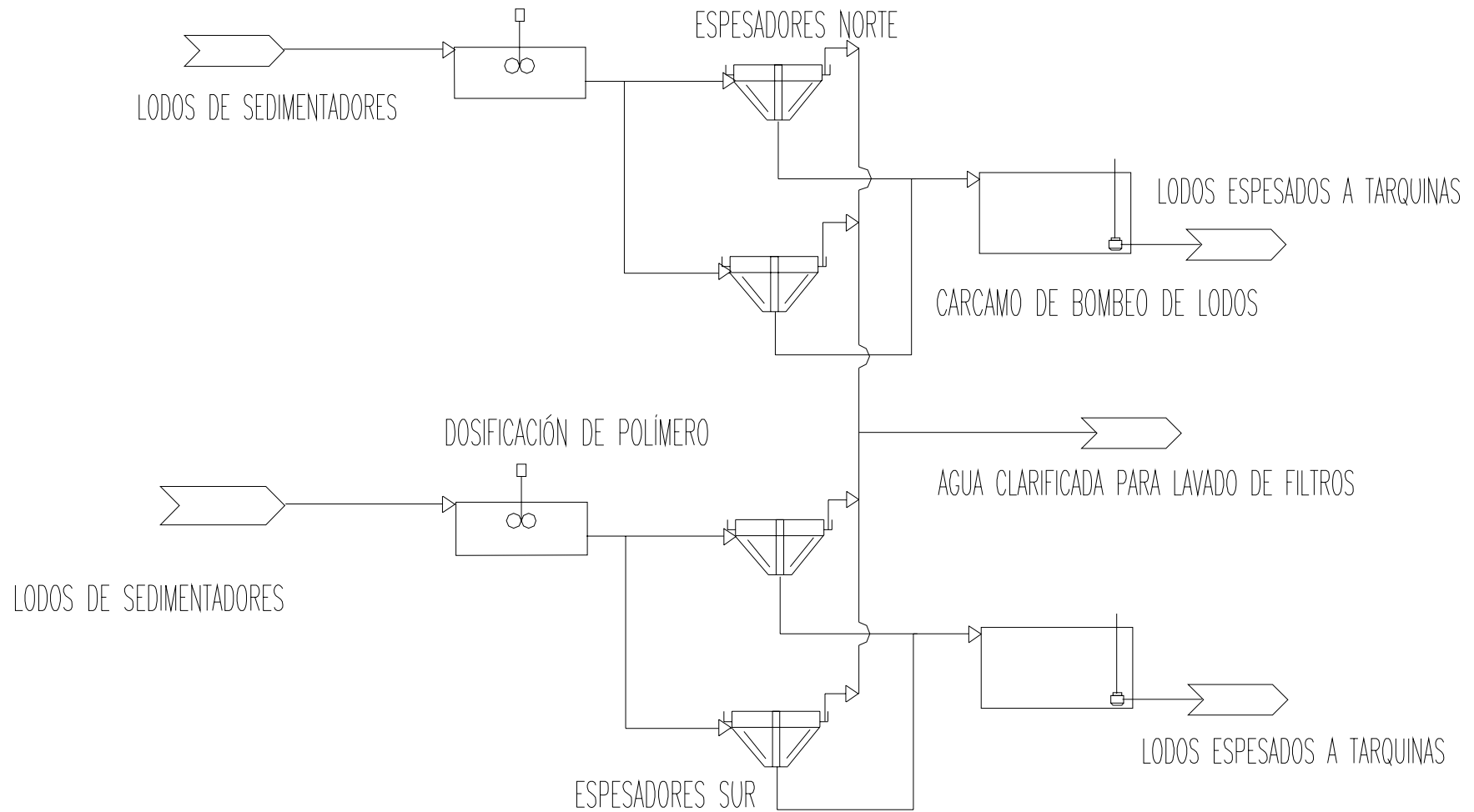


Figura 1. 2. Diagrama de espesamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora “Los Berros”.

## Problemática asociada a la generación y disposición de los lodos de la PPLB

Como se mencionó anteriormente, sólo los módulos de potabilización B, C, D, E y F (Fig. 1.1) están en funcionamiento y queda por concluir el módulo A. Aunque no se tiene en función este último módulo, la producción de lodos es importante, tanto que la laguna de almacenamiento de lodos se encuentra saturada y las denominadas “tarquinas”, se encuentran en un 60% de su capacidad. Esta es una gran preocupación para el personal de operación de la planta pues en poco tiempo estas estructuras serán insuficientes para tratar los 24 m<sup>3</sup>/s que puede tratar la planta. Un problema asociado con esta situación es que el almacenamiento de lodos implica grandes extensiones de terreno dentro de la planta y de mayor personal para su manejo. Se ha pensado en diseñar un sistema que permita el drenado y secado de los lodos para facilitar mejor su manejo y disminuir considerablemente la cantidad de lodos que contienen una humedad importante. Después de drenarlos se busca su aprovechamiento para obtener un beneficio a partir de estos residuos

Para poder estimar la producción futura de lodos en la planta potabilizadora bajo estudio se realizó un cálculo basado en datos históricos y en una campaña de caracterización. En la Tabla 1.1 se presenta la producción de lodos para diferentes condiciones de gasto y diferentes relaciones de sólidos suspendidos totales (SST del agua cruda) Se consideraron los siguientes valores: turbiedad del agua cruda 9.3 UTN; dosis de sulfato de aluminio: 22 mg/L.

Tabla 1.1 Producción de lodos para diferentes condiciones de gasto y diferentes relaciones de sólidos suspendidos totales para la planta potabilizadora bajo estudio

SST (g/L)	Flujo de agua tratada, m <sup>3</sup> /s			
	16	20	24	28
1.3	24.70 ton/día	30.87 ton/día	37.04 ton/día	43.22 ton/día
1.6	28.55 ton/día	35.69 ton/día	42.83 ton/día	49.97 ton/día
1.9	32.41 ton/día	40.51 ton/día	48.61 ton/día	56.72 ton/día
2.2	36.72 ton/día	45.33 ton/día	54.40 ton/día	63.47 ton/día
2.5	40.12 ton/día	50.15 ton/día	60.19 ton/día	70.22 ton/día

De acuerdo con los resultados anteriores se estima una producción de lodos de 1,100 a 1,800 Ton/mes (o bien, de 275 a 450 Ton/semana) cuando se traten 24 m<sup>3</sup>/s de agua (100% de su capacidad).

---

## OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad técnica, económica, social y ambiental, para valorar los lodos depositados y generados en el tren de tratamiento de la planta potabilizadora “Los Berros” del sistema Cutzamala, para utilizarlos como materia prima para la elaboración de productos (ladrillos).

## OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar el potencial de valoración de los lodos de la planta potabilizadora “Los Berros” como materia prima para elaborar productos cerámicos mediante un programa de muestreo y caracterización de estos residuos.
2. Evaluar la influencia de cuatro de los principales factores que influyen en el proceso de producción de ladrillos cerámicos a partir de los lodos de la planta potabilizadora “Los Berros”, mediante pruebas de laboratorio.
3. Desarrollar modelos matemáticos para calcular los valores óptimos de cuatro de los principales parámetros de caracterización de productos cerámicos elaborados con lodos de la planta potabilizadora “Los Berros”, con base en los resultados de pruebas de laboratorio.
4. Determinar las condiciones óptimas de elaboración de productos cerámicos elaborados a partir de los lodos de la planta potabilizadora “Los Berros”, mediante modelos matemáticos desarrollados para cuatro de los principales parámetros de caracterización de esos productos.
5. Estimar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de la valoración de los lodos para producir materiales cerámicos en base en la información obtenida en la literatura y laboratorio.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades de lodos fisicoquímicos producidos en planta de tratamiento de agua potable

#### 2.1.1 Definiciones de lodos fisicoquímicos

En la depuración del agua residual en una planta de tratamiento de aguas residuales y en la potabilización del agua en una planta potabilizadora, se generan significativas cantidades de lodos que, en caso de no darles una adecuada disposición final, se contribuye significativamente a la contaminación del ambiente afectando suelo, agua y aire (Arteaga y Cusidó-Fábregas, 1998).

En la NOM-004-SEMARNAT-2002 se 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), esto es, por la naturaleza química de las sustancias. Por ejemplo, el ablandamiento de aguas duras mediante el proceso calcarbonato 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  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (Fair, *et al.* 1999). También se pueden encontrar sustancias químicas como pesticidas que incrementan más el riesgo de estos residuos.

Godbold, *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. Actualmente también se usan los policloruros de aluminio (PACl) como agentes coagulantes para la potabilización del agua (Sinha, S., *et al.*, 2004).

Otro tipo de residuos que se consideran como lodos fisicoquímicos son los sólidos removidos durante las operaciones de limpieza de diferentes unidades de proceso (filtros y sedimentadores). Estos lodos contienen una cantidad mayor de agua (95%) y presentan menor consistencia (RAS, 2000).

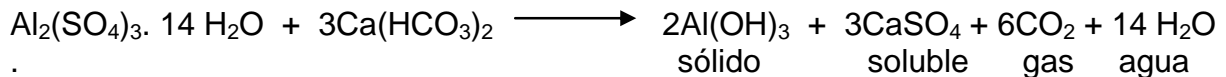
Con base en lo mencionado anteriormente, los lodos generados por los procesos de tratamiento del agua deben clasificarse en los siguientes grupos (RAS, 2000):

- 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

### 2.1.2 Procesos de producción

Se considera que el principal proceso generador de lodos fisicoquímicos es la coagulación-floculación los cuales se separan del agua mediante el proceso de coagulación.

La cantidad de lodos dependerá de la fuente de agua y del coagulante utilizado. La ecuación principal del compuesto de aluminio que se forma en el proceso de coagulación- floculación se presenta a continuación:



La producción de sólidos totales podría ser calculada diariamente usando la ecuación anterior. De acuerdo al reactivo utilizado, se pueden generar diferentes cantidades de sustancias como se presenta en la Tabla 2.1 (AWWA, 1991).

Tabla 2.1 Producción teórica de sólidos en plantas potabilizadoras (AWWA, 1991).

Sustancia	kg de sólidos producidos/ kg de reactivo
Sólidos suspendidos	1.0
Materia orgánica	1.0
Sulfato de aluminio	0.26 como Al(OH) <sub>3</sub>
Cloruro férrico	0.66 como Fe(OH) <sub>3</sub>
Polímero	1.0
Cal	Permite 0.1 como fracción insoluble

Generalmente se concentra entre 0.5 y 20% (5 – 20 g/L) de lodo en los tanques de sedimentación. De acuerdo a la reacción anterior, por cada kg de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> se forma 0.118 kg de hidróxido de aluminio. La cantidad de aluminio que sale del sedimentador y es retenido en el filtro depende del pH (Sánchez, 1999).

### 2.1.3 Características de lodos

Las características de los lodos se dividen en fisicoquímicas y microbiológicas.

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, % de humedad y contenido de sólidos.

La Tabla 2.2 (AWWA, 1991) muestra las características físicas de los lodos producidos según diferentes procesos empleados (ablandamiento reactor-precipitación, coagulación con sales de aluminio, hierro y polímero, aireación, filtración e intercambio iónico).

Tabla 2.2. Características físicas de lodos (AWWA, 1991).

Tratamiento	Químico utilizado	Residuos producidos	Color	Sedimentación	Descripción
Ablandamiento Reactor- Precipitación	Cal y soda	CaCO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub> + Mg(OH) <sub>2</sub>	Bronce- blanco	Buena Regular	Sólidos sedimentados semejante a pasta dentrífica
Coagulación Sales de aluminio Sales de hierro Polímero	Sulfato de aluminio Sales ferrosas o férricas Polímero	Al(OH) <sub>3</sub> Fe(OH) <sub>2</sub> Polímero	Café Rojo/café N/A	Muy pobre Pobre Pobre	Consistencia de chocolate espeso, viscoso Cuando se seca pasa a grumos duros Depende del polímero
Aireación	Aire hasta precipitar el Fe y Mn	Compuesto insoluble de Fe y Mn	Rojo/café	Buena	Sólidos con alto color, podría sedimentar, secar y agrietar
Filtración Agua retrolavado Tierra de diatomeas	---- ----	---- Acabado medio	Café Blanco o bronce	Pobre o regular Buena	Aglomeración de flóculos finos removidos de la superficie del filtro Acabado medio con materia particulada removida del agua
Ablandamiento por intercambio iónico	Resinas	Ácido o salmuera de la regeneración	Claro	N/A	Líquido: altos sólidos disueltos totales

N/A: No aplica.

Las características químicas son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos orgánicos e inorgánicos que pueden provocar efectos nocivos al contacto humano, dependiendo del tipo de disposición final o reuso 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.

En la Tabla 2.3 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.

Tabla 2.3. Composición típica de los lodos producidos con sales de hierro y aluminio 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

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 y establece los límites máximos permisibles y las técnicas analíticas para la cuantificación de patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

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 (1997), para un tratamiento típico con sulfato de aluminio. Las diferencias en la composición, sobre todo en el porcentaje de aluminio se deben a la dosis de coagulante utilizado y está en función de las características del agua a tratar y de su turbiedad.

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 PBC's, fluoranteno y benzopireno. Estos resultados se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Trazas de compuestos orgánicos (Comisión de Distribución del Agua AGHTM, Francia).

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

La concentración de estos compuestos en la muestra está por debajo del límite permitido por el acuerdo publicado en Francia el 8 de enero de 1998 (Comisión de Distribución del Agua AGHTM), 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 2.5 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 2.5 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	Pc
	(%)											
Midmar (S)	54.57	22.60	11.95	1.53	1.92	4.20	0.15	1.47	0.86	0.24	99.49	23.9
Midvaal (S)	53.07	22.36	14.24	0.41	1.83	4.45	0.33	1.89	0.74	0.47	99.79	27.7
Zhi-Thau (T)	51	24	6	-	1.5	< 1	0.5	3	-	-	-	15
Feng Shang (T)	14	36	2	-	<0.5	3	< 1	1	-	-	-	38

- No disponible. Pc. Pérdida por calcinación. (S). Sudáfrica. (T). Taiwan.

Los lodos de aluminio se describen como no Newtonianos, voluminosos, como sustancias gelatinosas, compuestas principalmente de metal hidróxido y de partículas orgánicas e inorgánicas tales como arcilla, arena, coloides, microorganismos y otro tipo de materia removida del agua cruda. Las características de estos lodos se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características químicas reportadas de un lodo coagulado con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (AWWA,1991).

Parámetro	Concentración
Sólidos totales	0.1 – 27 %
Sólidos volátiles	10 – 35% de Sólidos totales
Sólidos suspendidos	75 – 99% de sólidos totales
pH	5.5 – 7.5
Aluminio	4 – 11% de sólidos totales como aluminio
Hierro	6.5% de sólidos totales
Manganeso	< 0.005 – 5% de sólidos totales
Arsénico	<0.004% de sólidos totales
Cadmio	< 0.005% de sólidos totales
Metales pesados	< 0.003% de sólidos totales
Nitrógeno total Kjeldahl	0.7 – 1200 mg/l como nitrógeno
Fosfatos	0.3 – 300 mg/l como fósforo
Conteo total en placa	30 – 30,000/ ml

### 2.1.4 Tratamiento, disposición y manejo

#### Tratamiento

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.

El espesamiento por gravedad tiene un mecanismo basado en el comportamiento de partículas suspendidas en operaciones de sedimentación y de compactación, dependiendo básicamente de su naturaleza y concentración. Los sólidos suspendidos que se retienen por este método están en un intervalo del 80-90% (Metcalf y Eddy, 1991).

El espesamiento por flotación retiene de un 80-95% de sólidos suspendidos y es más eficiente para los lodos ligeros. Los lodos pesados como los obtenidos de sedimentadores primarios, o los lodos combinados (donde la fracción de primarios es mayor) deben manejarse preferentemente por gravedad (Metcalf y Eddy, 1991).

La deshidratación o secado de lodos es un proceso de separación físico que puede reducir la humedad de los lodos y llevarlos hasta un 30% de concentración de sólidos. Existen diferentes métodos de deshidratación, entre los que se encuentran (Henze *et al*, 1995) el proceso de deshidratación más antiguo y más sencillo que usa lechos rectangulares poco profundos con fondos porosos arriba de una red de drenaje subterráneo.

La remoción del lodo seco se hace manualmente en plantas pequeñas pero en otros lugares se tiene que instalar una planta mecánica para el levantamiento de los lodos. El terreno que se requiere para el lodo de agua residual es 0.25 m<sup>2</sup> por persona. Este gran requerimiento hace difícil que los lechos de secado sean factibles a menos que se disponga de terreno a bajo costo.

### **Filtros prensa**

El filtrado de presión es un proceso intermitente en el que se bombea lodo acondicionado con presión creciente en cámaras revestidas con telas de fieltro. Estas cámaras retienen los sólidos pero permiten que el líquido escape por las estrías que tienen las placas metálicas de apoyo y a medida que escapa el líquido, la pasta adyacente a la tela actúa como un filtro adicional para el resto del lodo y la pasta se deshidrata hacia el centro.

### **Filtros al vacío**

Este es un proceso continuo en el cual un tambor giratorio segmentado cubierto con tela de fieltro se sumerge parcialmente en lodo acondicionado. Se forma un vacío de 90 kPa en los segmentos sumergidos para que el lodo se adhiera a la superficie de la tela. Los sólidos en la pasta normalmente son del 20% al 25% con rendimientos de filtro aproximados de 20 kg de sólidos secos por metro cuadrado hora.

## **Centrífugas**

Las centrífugas de operación continua tienen aplicación en el deshidratado de lodos. Las centrífugas son relativamente compactas pero no pueden lograr concentraciones de sólidos mayores del 20% y en muchos casos es difícil separar en forma económica sólidos mayores a un 12 ó 15% de los lodos del agua natural o residual.

El sistema de deshidratación adecuado es función del caudal de lodo, de los recursos económicos, del espacio y del personal disponible entre otros factores. Normalmente se recomiendan los filtros prensa y los filtros banda para llevar a cabo la deshidratación mecánica. Los primeros se refieren para caudales menores, principalmente por su operación intermitente (Schultz y Okun. 1990).

## **Disposición final**

La disposición final del lodo del tratamiento de agua se realiza en un relleno sanitario.

La elección del tipo de método de disposición usado dependerá de las características de los lodos, la legislación aplicable y los costos.

### **Relleno sanitario o terraplén**

La disposición final en relleno sanitario consiste en depositar los residuos en sitios debidamente controlados y operados, ubicados en áreas alejadas de lagos, estanques, ríos, pozos para suministro de agua, carreteras, aeropuertos y zonas habitadas, compactándolos y cubriéndolos con tierra. En este caso, es importante que los lodos estén bien deshidratados para evitar que propicien la formación de lixiviados.

El relleno sanitario es una técnica de eliminación final de residuos sólidos en el suelo, incluidos algunos lodos, que no causa molestias a la comunidad ni riesgos para la salud tanto durante su operación como después de terminado. La técnica se basa en el principio de compactar los residuos en capas, cubriendo cada capa con material adecuado conforme avanza la operación (Reynolds, 1995).

Los principios básicos de operación del relleno sanitario son:

- a) Supervisión permanente del relleno sanitario, mientras se está rociando o recubriendo el residuo.
- b) Los residuos deben compactarse en capas de 15 a 30 cm.
- c) La profundidad del relleno no debe ser excesiva, no más de 2.50 m.
- d) Todo residuo recibido debe quedar cubierto con una capa temporal de tierra o material similar de por lo menos 0.60 m de espesor.
- e) Adoptar medidas para evitar la atracción de vectores, el escurrimiento de lixiviados u otro tipo de desperdicios fuera del relleno sanitario.

Para una correcta operación del relleno, comúnmente se requiere un contenido de 15 a 30 % de sólidos del lodo. La concentración mínima requerida está a menudo determinada por las regulaciones sanitarias locales. Para los lodos del alumbre

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), como los de plantas potabilizadoras, el requerimiento de concentración de sólidos es de por lo menos el 25%. En concentraciones más bajas, la aplicación en suelo es más apropiada (<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/wtprimer/sldg>).

### 2.1.5 Legislación

La legislación ambiental en relación a los lodos se enfoca a la disposición final y al aprovechamiento del lodo proveniente de las PTAR's (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 reutilizarlos 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. Con base en esto, a continuación se mencionan las principales regulaciones enfocadas a la aplicación de lodo que actualmente están vigentes en México, Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea.

#### 2.1.5.1 Nivel Nacional

En México, es escasa la Normatividad federal y estatal que regula el tratamiento y disposición de los sólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Se considera que los lodos generados durante el tratamiento secundario de aguas residuales son residuos peligrosos y, en consecuencia, deben sujetarse a las leyes que rigen la disposición de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales son: la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que entró en vigor en 1988; el Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos Publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de noviembre de 1988, así como la Ley de Aguas Nacionales (LAN), que entró en vigor en 1993, y el Reglamento de LAN publicado en el DOF en 1994. Cabe mencionar que entró en vigor la NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para lodos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal; de las plantas potabilizadoras; y del tratamiento de las aguas residuales, para su aprovechamiento o disposición final.

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.

**NOM-004-SEMARNAT-2002**

Ha sido creada para los responsables que generen lodo proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras, del tratamiento de aguas residuales, y las personas físicas o morales que se dediquen u ofrezcan el servicio de recolección, manejo, transporte o estabilización de lodos y biosólidos para su aprovechamiento o disposición final o reúso, deben demostrar que éstos no son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos e inflamables (CRETIB).

**Clasificación de los biosólidos**

En función del contenido de metales pesados, los lodos se clasifican en Excelente y Bueno, y en función del contenido de patógenos y parásitos en Clase A, B y C. En la Tabla 2.7 se muestran los límites máximos permisibles para metales pesados y en la Tabla 2.8 los límites máximos permisible para patógenos y parásitos.

Tabla 2.7. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

<b>CONTAMINANTE (determinados en forma total)</b>	<b>EXCELENTE mg/kg en base seca</b>	<b>BUENO mg/kg en base seca</b>
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tabla 2.8 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

<b>CLASE</b>	<b>INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN</b>	<b>PATÓGENOS</b>	<b>PARÁSITOS</b>
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella sp NMP/g en base seca	Huevos de helminto/g en base seca
A	Menos de 1,000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helminto viables

**Calidad de los biosólidos en función de su aprovechamiento**

La Tabla 2.9 muestra los sitios para el aprovechamiento de biosólidos en función de su calidad y de su clase.

Tabla 2.9 Límites máximos permisibles para Patógenos y Parásitos en biosólidos y lodos.

Clase	Calidad Excelente	Calidad Buena
Clase A	Jardines y macetas de casas habitación y edificios públicos y privados, áreas verdes para recreación públicas y privadas con contacto, viveros y campos deportivos. Camellones urbanos y en vías de comunicación, panteones y bosques. Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes.	Camellones urbanos y en vías de comunicación, panteones y bosques. Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes
Clase B	Camellones urbanos y en vías de comunicación, panteones y bosques. Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes Camellones urbanos y en vías de comunicación, panteones y bosques.	Camellones urbanos y en vías de comunicación. Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes.
Clase C	Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes.	Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos. Restauración de paisajes.

Para que los lodos provenientes de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras, y del tratamiento de aguas residuales puedan disponerse en forma final o reusarse, deben cumplir con los límites máximos permisibles para el contenido de patógenos y parásitos correspondientes a la Tabla 2.8.

### 2.1.5.2 Nivel Internacional

La EPA desarrolló el reglamento “Estándares para el uso y disposición de lodos provenientes del tratamiento de agua residual doméstica”, que fue publicado en el Capítulo 40 del Reglamento del Código Federal (CFR), a la versión publicada el 19 de febrero de 1993 que se conoce como Parte 503. Este apartado define los requisitos para que los biosólidos sean:

- Aplicados al suelo como acondicionadores o fertilizantes
- Dispuestos en forma superficial en terreno
- Quemados en un incinerador
- Dispuestos en un relleno sanitario

El apartado 503 es de orden federal y se compone de cuatro partes:

- Disposiciones generales
- Requisitos para la disposición en suelo
- Requisitos para la disposición superficial
- Disminución de los vectores de atracción de patógenos

Según esta legislación, los lodos se clasifican en biosólidos clase A y B.

## Biosólidos clase A

Para que un Biosólido sea clase A la densidad de patógenos se debe reducir por debajo de los límites de detección que son:

- Menos de 3 organismos de *Salmonella sp* por 4 gramos de sólidos secos totales, determinados como Número Más Probable (NMP)
- Menos de 1 virus entérico por 4 gramos de sólidos totales
- Menos de 1 huevo de helminto viable por 4 gramos de sólidos totales

Existe el riesgo de que ocurra recrecimiento de los organismos, para evitar esto, todas las opciones para obtener biosólidos clase A requieren el siguiente monitoreo de organismos:

- La densidad de Coliformes fecales en el lodo debe ser menor a 1000 NMP por gramo de sólidos totales, o
- La densidad de preparar los Biosólidos para su distribución en bolsas u otros contenedores para la aplicación en suelos.

Cuando estos biosólidos van a ser aplicados al suelo o dispuestos en forma superficial, deben cumplir una de las opciones de reducción de atracción de organismos vectores (organismos que pueden transportar los patógenos de los lodos; pueden ser insectos, roedores, pájaros, etc.).

## Biosólidos clase B

La obtención de biosólidos clase B implica la reducción adecuada de la densidad de patógenos, lo cual se demuestra por:

- Una densidad de coliformes fecales menor que 2,000,000 (NMP o unidades formadoras de colonias, UFC) por gramo de sólidos totales en base seca
- No es necesaria la reducción de huevos de helminto viables en este tipo de lodos

Los biosólidos de clase B se utilizan para su aplicación a granel en suelos agrícolas, bosques, sitios de contacto público y sitios de restauración. También es necesario que los lodos cuenten con esta calidad si van a ser dispuestos superficialmente, a menos que la unidad activa donde se estén aplicando los sólidos se cubra al final de cada día de operación.

Debido a su contenido de patógenos, la aplicación de biosólidos clase B está restringida para cultivos, pastoreo de animales y lugares de acceso público hasta que los factores ambientales reduzcan sustancialmente los patógenos.

La Tabla 2.10 muestra los procesos y condiciones para reducir los patógenos.

Tabla 2.10 Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción adicional de patógenos.

PROCESO	CONDICIONES DE OPERACIÓN			
	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE RETENCIÓN (MINUTOS)	REDUCCIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES (%)	OTRAS ESPECIFICACIONES
Composteo Reactor Pila estática Pila a cielo abierto	55 o más durante 3 días consecutivos 55 o más durante 15 días o más		38	En el camellón durante el período de digestión se necesita remover el material 5 veces.
Secado por calor	80	30	-	Reducción de humedad de 10% o menos
Tratamiento con calor	180	30	-	-
Digestión aerobia termofílica	55-60	10 días	38	-
Irradiación de rayos beta de un acelerador	20	-	-	Menos de 1.0 megared.
Irradiación de gama (isótopos, Cobalto 60 y Cescio 137)	20	-	-	Menos de 1.0 megared.
Pasteurización	70	30	-	-

## 2.2 Panorama general de las opciones de aprovechamiento y reutilización de lodos

Debido a los problemas ambientales por la descarga directa al suelo o cuerpos de agua, la disposición de lodos residuales se ha desarrollado en rellenos sanitarios, que son construidos bajo normas y estándares que limitan el contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos que controlan escurrimientos de lixiviados hacia el suelo y aguas subterráneas.

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 2.11.



Tabla 2.11. Valores límite de contaminantes en lixiviados para disposición en rellenos sanitarios de materiales no peligrosos (Goldbold et al., 2003).

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. 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 (R.D. 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).

## **2.2 Panorama general de las tecnologías de aprovechamiento y reutilización 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 factibles para la reutilización de los lodos de una forma segura (Armenter *et al.* 2002).

Los costos de la correcta disposición final de los residuos producidos por la actividad humana reafirman la necesidad de su progresiva reducción. La presión social para la preservación del medio natural, con la creciente vertiente económica de los mismos, han promovido un renovado interés en la utilización de productos que emplean como materias primas (Cusidó J. A., 2000).

### **2.2.1 Tipos de opciones de aprovechamiento y reutilización**

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 reutilización 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).
- Reutilización de los lodos como mejoradores o acondicionadores de suelo agrícola.
- Reutilización de los lodos para la fabricación de material cerámico de construcción, según proceso de elaboración convencional (mezcla, extrusión, conformado, secado y cocción).
- Reutilización de los lodos como agentes floculantes en el tratamiento de aguas residuales, para aprovechar su alto contenido en aluminio.
- Reutilización de los lodos para la producción de granulado cerámico mediante procesos de secado.
- Reutilización 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 agregado.

## 2.2.2 Tendencias de aprovechamiento y reutilización

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. 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.

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. 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). El procedimiento que se lleva a cabo para la preparación del lodo es el siguiente: deshidratación del lodo; molienda y mezclado con los demás componentes del cemento y de los ladrillos. En algunos casos se lleva a cabo la incineración (Salazar, A. 2003).

La utilización de los lodos producidos por el tratamiento de agua se ha divulgado; 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, 1999; 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 brechas corta-fuego. Sin embargo, el aluminio del lodo no permite el crecimiento de hierbas indeseables que a la larga pudieran contribuir a propagar los incendios forestales. 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). Estas tendencias se presentan resumidas en la Tabla 2.12.

Si bien la utilización de lodos en alguna actividad específica puede estar determinada por la influencia de factores ambientales, como el origen de las aguas tratadas, la utilización de los lodos en ciertos usos específicos dependerá en las actividades que se lleven a cabo en la zona o zonas de posible aprovechamiento.

Tabla 2.12. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países.

Tipo de aplicación	País	Referencia
<b>Elaboración de cemento</b>	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) ha reportado que el lodo seco y fragmentado puede utilizarse como materia prima en la producción del cemento Portland 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), 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 aquellos que contienen grandes cantidades de hierro son mejores en la elaboración de ladrillos.
	Portugal	Goncalves, <i>et al</i> (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 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 2.12. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países (Continuación).

Tipo de aplicación	País	Referencia
Elaboración de ladrillos	Reino Unido	Anderson (2003) presenta un estudio sobre la viabilidad de obtener ladrillos con un alto contenido de ceniza incinerada del lodo de aguas residuales tratadas.  Un estudio llevado a cabo por WRC (Dillon <i>et al.</i> 1996) 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) reporta que el lodo de las estaciones depuradoras de aguas residuales son excelentes 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.
Elaboración de cerámicos	España	Armenter, <i>et al.</i> (2000), presenta 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) han recuperado 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.
Aplicación en suelo	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 2.12. Tendencias de aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua en diferentes países (Continuación).

Tipo de aplicación	País	Referencia
<p><b>Aplicación en suelo</b></p>	Australia	<p>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 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).</p>
	Canadá	<p>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).</p>
	Canadá	<p>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 et al. 2002).</p>
	Sudáfrica	<p>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.</p>
	Estados Unidos	<p>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.</p>
<p><b>Como adsorbente</b></p>	España	<p>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.</p>
<p><b>Como catalizador</b></p>	Rusia	<p>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.</p>

Tabla 2.12. 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), presenta 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) mencionan 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 $Al_2(SO_4)_3$ .

### 2.2.3 Estudio de casos de aplicación de residuos para elaborar productos cerámicos

A continuación se hace un análisis de diversos estudios donde se reutilizó algún tipo de desecho del tratamiento de aguas residuales y de la industria de la minería para la elaboración de productos de tipo cerámico como ladrillos y losetas. Los datos de estos estudios se utilizaron para el diseño experimental de este trabajo de tesis.

#### ***Elaboración de ladrillos y losetas cerámicas a partir de lodos generados del cortado de granito natural (Ferreira J. M. F. et al., 2001)***

Ferreira J. M. F. *et al.*, (2001), evaluaron el reúso de lodos generados del proceso de cortado de granito natural. El material usado en este estudio fue arcilla roja (PRC) y arcilla de grado bajo (LGC) normalmente usado en la composición de ladrillos (Fábrica Campos, Lda, Portugal). Una arcilla de tipo pizarra (SC) con excelentes propiedades de cocción cuando se sinteriza a 1100° C; y lodo de granito aportado por Eurogranitos, Águeda, Portugal. La arcilla PRC se basa en la Illita, Caolinita, Montmorilonita, Cuarzo y Feldepasto; la arcilla LPG se basa en el Cuarzo y la Illita. En la Tabla 2.13 se muestra la caracterización química de los lodos de granito en fluorescencia de rayos X:

Tabla 2.13. Composición química (FRX) de los lodos secos, en términos de componentes de óxidos (Ferreira J. M. F. et al., 2001).

Óxido	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	PxC
(p/p%)	12.4	0.13	3.6	0.22	0.90	4.1	12.4	6.6	61.2	0.68

Los materiales fueron mezclados con lodos de granito en diferentes proporciones como se muestra en la Tabla 2.14. Las formulaciones contienen un total de 2



kilogramos de sólidos por el método tradicional de mezclar los componentes secos seguida por la adición controlada de agua en las cantidades  $\approx 20\%$  y  $\approx 18\%$  y extrusión bajo vacío en varios hornos de cilindro de 10 mm de diámetro y 120 mm de largo. Las muestras fueron secadas en un cuarto a una temperatura de  $40^\circ\text{C}$  por 24 horas y después completamente a  $120^\circ\text{C}$  por 12 horas.

Tabla 2.14. Composiciones para la elaboración de ladrillos y losetas a partir de lodos generados del cortado de granito natural (Ferreira J. M. F. et al., 2001)

<b>Composición de ladrillos (%p/p)</b>					
Componentes	1	2	3	4	5
PRC	30	35	35	40	45
LGC	70	30	15	0	5
Lodos de granito	0	35	50	60	50
<b>Composición de azulejos (%p/p)</b>					
Componentes	6	4	7	8	9
PRC	30	40	50	0	0
SC	0	0	0	40	50
Lodos de granito	70	60	50	60	50

Para la composición de los ladrillos, 20 piezas fueron cocidas a  $950^\circ\text{C}$  en un horno industrial, siguiendo el ciclo típico de 9 horas. Para las pruebas de producción de losetas, las composiciones fueron cocidas a  $1100^\circ\text{C}$  en un horno eléctrico de laboratorio, usando una tasa de calentamiento de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  con un tiempo de temperatura máxima de 1 hora.

La caracterización del material cocido se realizó determinando la contracción lineal, la absorción de agua y la resistencia a la flexión. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Propiedades relevantes de los productos cerámicos cocidos y elaborados a partir de lodos generados del cortado de granito natural (Ferreira J. M. F. et al 2001).

<b>Temperatura de las composiciones</b>		<b>Propiedades de cocción</b>		
		<b>Contracción lineal (%)</b>	<b>Absorción de agua (%)</b>	<b>Resistencia a la flexión (%)</b>
950° C (ladrillos)	1	0.15 (6.33 total)	13.02	13.4
	2	0.18 (6.73 total)	12.97	12.3
	3	0.16 (6.33 total)	12.92	10.3
	4	0.21 (8.02 total)	13.00	11.8
	5	0.29 (8.29 total)	13.01	11.7
1100° C (losetas)	6	0.17 (13.6 total)	6.04	39.8
	4	0.19 (14.8 total)	1.60	53.8
	7	0.28 (15.7 total)	0.43	57.4
	8	0.26 (14.8 total)	0.10	68.2
	9	0.30 (16.5 total)	0.00	74.6

En la Tabla 2.15 se observa que al aumentar la cantidad de PRC se incrementa el total de contracción excepto para la composición 2 y 3 en la cual 35% y 50% de LGC reemplaza al granito. Los cambios en los valores de contracción se explican por que el PRC está constituido por finas partículas de la Illita, la Caolinita y la Montmorillonita que son arcillas finas muy sensibles al secado. Después del secado completo absorben agua de la atmósfera. Estas características hacen posible la obtención de materiales sin daño en las piezas en la etapa de secado. Esto también es responsable de la disminución de la tendencia al esfuerzo por la tensión (incrementando la cantidad de PRC). Las proporciones de PRC en el intervalo 30-40 %p/p hacen que la cantidad de agua absorbida disminuya cuando la arcilla LGC es reemplazada parcialmente o en su totalidad por los lodos de granito. Se vio que una baja cantidad de agua usada en las composiciones muestran que la baja condición de resistencia a la flexión se incrementan con el reemplazo de la arcilla SC por a PRC.

La fabricación de productos cerámicos de alta resistencia, como ladrillos y losetas, a las temperaturas normales de cocción de 1100° C con un nivel de lodos de entre 50-60% combinado con arcilla SC o de 50% en el caso de la combinación con PRC, da buenos resultados (Ferreira J. M. F. *et al.*, 2001).

***Elaboración de ladrillos y losetas a partir de lodos generados en la industria del aluminio de los ánodos (Ribeiro M. J. *et al.*, 2002a)***

Ribeiro M. J. *et al.*, (2002a) trabajaron con lodos ricos en aluminio de la industria de los ánodos (Extrusal S. A., Aveiro). En la Tabla 2.16 se muestra la composición química de los lodos secos y de los lodos calcinados a 1600° C tomados con fluorescencia de rayos X (FRX). Es superior el contenido de aluminio en comparación con los valores de los demás elementos.

Tabla 2.16. Composición química (XRF) de los lodos secos y calcinados con respecto a los elementos relevantes (Ribeiro M. J. *et al.*, 2002a)

Elemento (%)	Fe	Cl	Na	P	S	Mg	Sn	Al	Ca	Si	Cr(t)
Seco	0.4	0.15	0.6	0.2	4.5	0.07	0.3	23.0	0.6	0.4	0.25
Calcinado a 1600° C	0.5	n.d.	0.9	n.d.	n.d.	0.12	n.d.	30.5	1.1	0.7	0.18

n.d. : no determinado

En la Tabla 2.17 se resumen los efectos de la adición de los lodos en la formulación de losetas y ladrillos. Se observa que una pequeña adición (cerca del 5%) de los lodos pretratados no influye significativamente sobre las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de cerámicas.

Tabla 2.17. Efecto de la adición de lodos en las características de losetas y ladrillos (Ribeiro M. J. et al., 2002a).

Composición	Encogimiento en secado (%)	Encogimiento en cocción (%)	Porosidad aparente (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la compresión Kg/cm <sup>2</sup>
Cerámico puro	7.6	8.1	27.9	15.8	280
+ 5% Lodo húmedo	10.5	12.9	35.2	20.9	228
+ 15% Lodo húmedo	15.0	20.0	41.5	26.9	174
+ 2% Lodo seco	7.5	8.3	28.1	16.0	274
+ 5% Lodo seco	7.5	9.8	31.3	18.2	245

Si se comparan las características del cerámico puro y de la mezcla con 2% de lodo seco, se observan valores muy similares.

**Elaboración de ladrillos y losetas a partir de lodos generados del tratamiento de aguas residuales (Ribeiro M. J. et al 2002b)**

Ribeiro M. J. et al., (2002b), utilizaron lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de desechos sanitarios generados en el lavado de los molinos y colectados en pruebas de aplicación de vidrios a cabinas con la siguiente composición según la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Composición porcentual por elemento de los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales (Ribeiro M. J. et al., 2002b)

Elemento	Si	Zr	Ca	Al	Ba	K	Zn	S	Fe	Na	Sr
(%)	29.5	9.5	8.8	8.1	7.1	6.0	3.4	0.78	0.42	0.40	0.15

Al hacer diferentes formulaciones con arcilla para fabricar losetas y ladrillos, se encontraron las siguientes características de los productos cerámicos (Tabla 2.19).

Tabla 2.19. Efecto de adición de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en la producción de vasijas de gres (Ribeiro M. J. *et al.*, 2002).

Composición	Contracción por secado (%)	Contracción por cocción (%)	Perdidas por ignición	Absorción de agua (%)	Resistencia a la flexión Kg/cm <sup>2</sup>
0% Lodo (100% arcilla)	2.32	9.15	6.29	0.18	757
5% Lodo	2.06	9.61	6.66	0.18	681
10% Lodo	2.30	9.69	6.97	0.24	629
10 % Lodo seco	2.10	10.36	6.92	0.30	533

En general la adición de lodos de un 5% de lodo hasta un 10%, no produce cambios significativos en las características funcionales en los productos cerámicos (ladrillos y losetas). Por arriba del 10% se comienzan a encontrar cambios que desfavorecen las características de los productos elaborados.

***Elaboración de agregados para la construcción y ladrillos a partir de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales (Weng C. H. et al., 2003)***

Weng C. H., *et al.*, (2003), evaluaron la factibilidad de aplicar los lodos provenientes de 34 plantas de tratamiento de agua residual de tipo industrial para utilizarlos como agregados para la construcción y para elaborar ladrillos. El objetivo fue darles una utilidad a estos residuos y así aliviar el problema de la disposición final en rellenos sanitarios. Con esto se logra la inmovilización de metales pesados en la matriz de tipo cerámica, oxidación de materia orgánica y reducción de patógenos (por temperatura de cocción).

Para este trabajo se utilizó el lodo seco variando la proporción de los materiales y, la temperatura de cocción del ladrillo. Además se evaluó la capacidad de lixiviación de los metales. En la Tabla 2.20 se muestran las características del lodo deshidratado y seco además de la arcilla utilizada para la elaboración de ladrillos.

Tabla 2.20. Características de lodo y la arcilla (Weng C. H. et al., 2003).

Características	Lodo deshidratado	Lodo seco	Arcilla
pH	7.19	7.27	8.09
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.16	1.75	2.52
Materia volátil (combustión a 550±50° C por 3 h) (%)	56.9	61.3	5.9
Contenido de humedad (%)	84.1	41.0	1.4
Pérdida por ignición (800±50° C por 3 h) (%)	94.6	76.6	7.9
<b>Metales (mg/Kg)</b>			
Cd	3	5	<0.1
Cr	537	1713	16
Cu	29	212	85
Co	10	24	5
Fe	5265	18070	8530
Ni	167	1131	20
Pb	3	35	<0.1
Zn	264	628	98

Al eliminar el agua del lodo, se concentra en contenido de metales pesados y, al perder agua, aumenta su densidad en un 50% aunque no llega a alcanzar el valor de densidad de la arcilla utilizada para elaborar ladrillos.

La Tabla 2.21 muestra las formulaciones realizadas además de los parámetros que se utilizaron para evaluar la calidad de las mezclas.

Tabla 2.21. Efectos de la proporción de lodos en el área específica y en el índice de plasticidad en las mezclas (Weng C. H. et al., 2003).

% de lodo	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	Contenido óptimo de humedad (%)	Límite de líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad
0	0.51	23	38	20	18
10	0.514	24	39	22	17
20	0.521	26	41	25	16
30	0.53	29	45	30	15
40	0.532	33	46	33	13
100	0.564	---	----	----	---

Existe un estándar (AASHTO, 1982) para evaluar la prueba de compactación que se utiliza para determinar el contenido óptimo de humedad (COH). Al incrementar la proporción de lodo en las mezclas, se incrementa la COH. Para este estudio se vio que el COH óptimo fue de un 24%.

La prueba de Atterberg's (Wray, 1985) indica que en las mezclas de lodo y arcilla, el valor de la plasticidad límite es inversamente proporcional a la cantidad de lodo en el ladrillo. Un valor límite de plasticidad de 18 (0 % de lodo) indica que la arcilla tiene una baja plasticidad. En las siguientes Figuras se presentan los valores de % de adsorción de agua, % de encogimiento por cocción, % de pérdida de peso por ignición, densidad y de resistencia ala compresión (Weng C. H., et al., 2003).

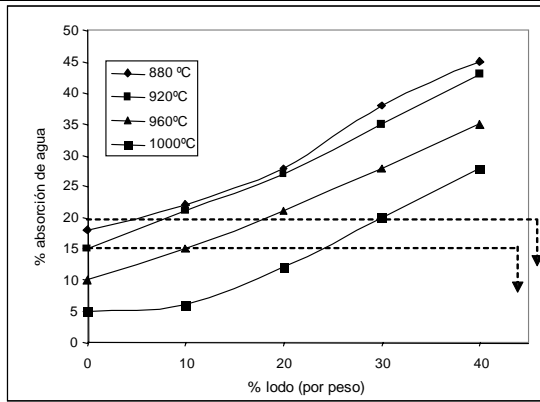


Fig. 2.1. % de absorción de agua de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).

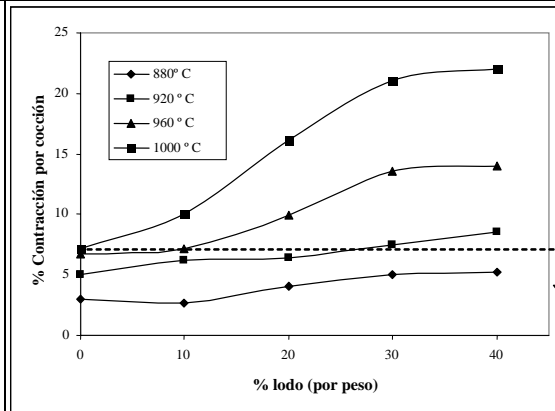


Fig. 2.2. % de contracción por secado de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).

La absorción de agua está relacionada con la durabilidad del ladrillo: a menor absorción de agua, mayor durabilidad y resistencia a las situaciones del ambiente. La absorción de agua para ladrillos incrementa con la adición de lodos y disminuye con la temperatura de cocción, esto hace que disminuya la resistencia (Figura 2.1). Cuando la mezcla contiene una cantidad significativa de lodo, las fuerzas de adhesión disminuyen lo cual crea poros. Para la contracción por cocción, por criterio, se recomienda un valor menor al 8%. Como se ve en la Figura 2.2, la contracción por cocción incrementa con el aumento de la cantidad de lodo en la mezcla y con la temperatura de cocción.

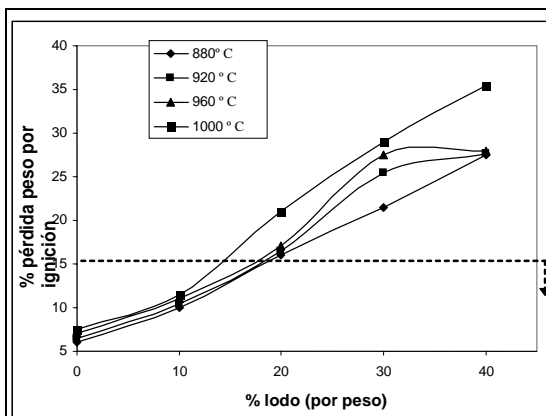


Fig. 2.3. % de pérdida por ignición de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).

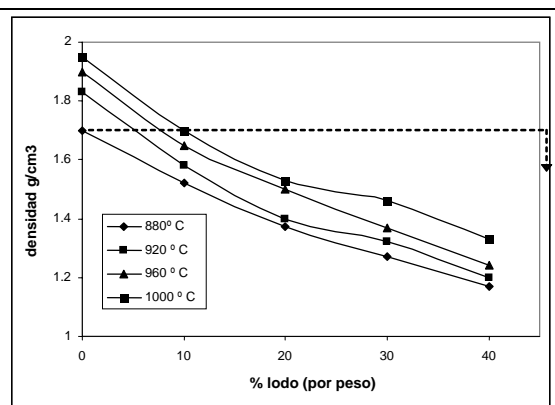
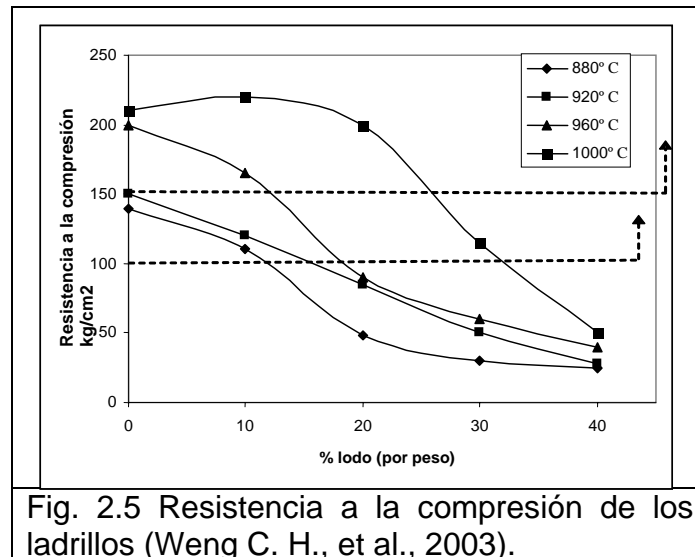


Fig. 2.4 Densidad de los ladrillos (Weng C. H., et al., 2003).

Lo que respecta a la pérdida de peso por ignición, ésta aumenta con la cantidad de lodo en la mezcla y con la temperatura de cocción, como se ve en la Figura 2.3. Por criterio se recomiendan valores de % de pérdida por ignición por abajo del 15%. Se pueden atribuir estos valores a la materia orgánica presente en el lodo que se pierde por calcinación. Esta calcinación de materia orgánica aumenta conforme aumenta la temperatura de cocción. Por lo tanto, se entenderá que la densidad baja al aumentar la pérdida por calcinación por las mismas razones antes expuestas (Figura 2.4). La densidad recomendada para la obtención de un buen ladrillo oscila entre 1.8 y 2.0 g/cm<sup>3</sup> (NMX-C-006-1976).



La resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta la cantidad de lodo en la mezcla como se observa en la Figura 2.5. Para este parámetro, los ladrillos se clasifican en dos formas: de primera clase y de segunda clase. Para los primeros la resistencia a la compresión aceptable está por arriba de los 150 kg/cm<sup>2</sup> y para los segundos, por arriba de los 100 kg/cm<sup>2</sup>.

Con lo anterior, se determinó que, para obtener un ladrillo de buena calidad, se tenía que preparar una mezcla con 10 % de lodo, con 24 % de contenido de humedad y cocerlo entre 880° C y 960° C.

***Elaboración de especímenes de cerámica a partir de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales de la industria de la curtiduría (Basegio T. et al., 2002)***

En otro estudio realizado por Basegio T. *et al.*, (2002), utilizaron lodo proveniente del tratamiento de aguas de la industria de la curtiduría para elaborar especímenes de cerámica. En este estudio, en primer lugar se caracterizó el lodo. Los resultados se presentan en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22. Caracterización de lodos provenientes de la industria de la curtiduría (Basegio T. et al., 2002).

Componente	Porcentaje en peso
Carbono orgánico	6.51
Nitrógeno total	0.98
NH <sup>4+</sup>	0.42
NO <sup>3+</sup> NO <sub>2</sub>	0.682
Fósforo total	0.20
Potasio total	0.01
Calcio total	2.00
Magnesio total	0.024
Azufre total	1.33
Cobre total	1.90
Zinc total	11.2
Hierro total	0.63
Manganeso total	26.2
Sodio total	0.84
Cromo total	0.81
Cadmio total	0.0138
Níquel total	1.50
Plomo total	1.50

La arcilla utilizada presentó los siguientes contenidos de óxidos (Tabla 2.23).

Tabla 2.23 Caracterización de la arcilla utilizada para la elaboración de especímenes de cerámica (Basegio T. et al., 2002).

Componente	Porcentaje en peso
SiO <sub>2</sub>	69.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75
K <sub>2</sub> O	2.60
MgO	1.09
TiO <sub>2</sub>	0.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21
CaO	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.12
MnO	0.08
Pérdida por calcinación	6.31

Cabe destacar el alto contenido de sílice que alcanza casi el 70% del contenido de óxidos; en segundo término se encuentra la alúmina con un 13.94% y el óxido de hierro con un 5.75%. Los demás componentes se encuentran en cantidades menores que solo representan el 11.45% del contenido de óxidos. Por otra parte, las pérdidas por calcinación (materia orgánica) están presentes en un 6.31%.



El lodo y la arcilla se mezclaron con CaO siguiendo las siguientes proporciones para elaborar especímenes con las siguientes medidas: 3 cm de ancho; 10 cm de largo y 1 cm de altura (Tabla 2.24)

Tabla 2.24 Composiciones empleadas para elaborar especímenes de cerámica (Basegio T. et al., 2002)

Muestra	Materiales, (% en peso)		
	Arcilla	Lodo seco	CaO
M1	100	0	0
M2	90	10	0
M3	80	20	0
M4	70	30	0
M5	81	9	10

Los especímenes se evaluaron de acuerdo a los siguientes parámetros: absorción de agua, porosidad, contracción lineal y esfuerzo cortante transversal. La absorción de agua y la porosidad se midió usando el método Arquímedes de acuerdo al estándar ASTM C373/94 y la densidad aparente de acuerdo al estándar ASTM C-134/95 (densidad aparente). La contracción lineal se determinó por la diferencia entre la longitud inicial y final (ASTM C210/95).

En las Figuras 2.6 a 2.9 se presentan los resultados obtenidos en el estudio de Basegio T. *et al.*, (2002)

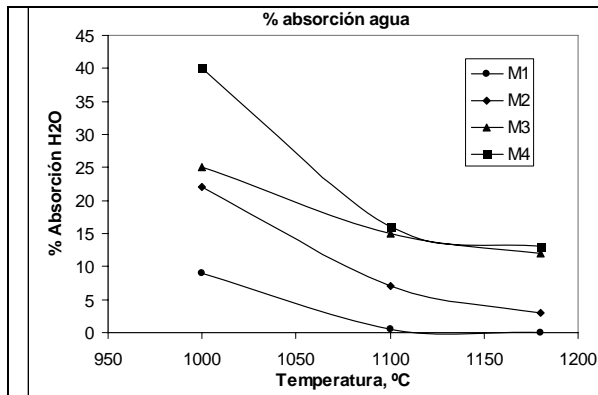


Fig. 2.6 % de absorción de agua para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. *et al.*, 2002).

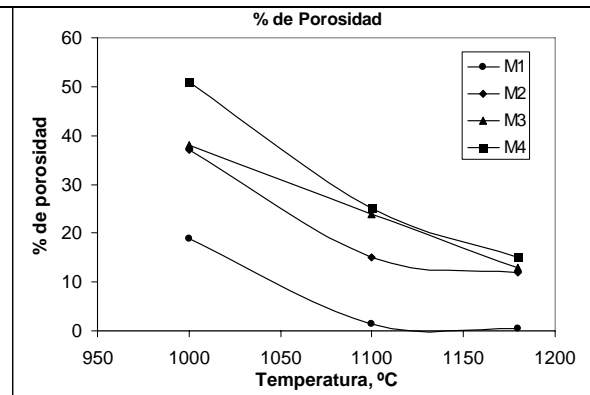
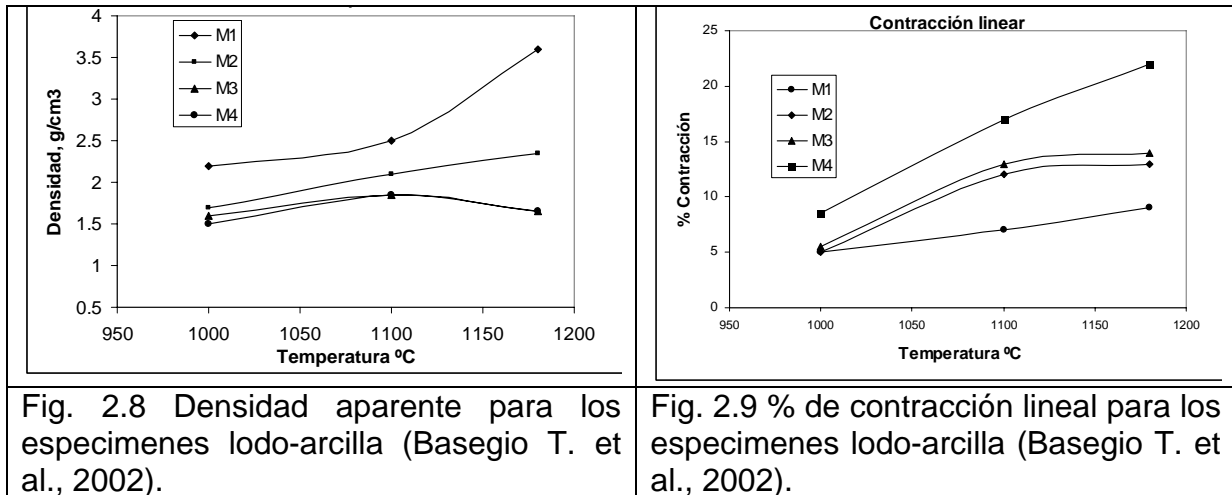


Fig. 2.7 % de porosidad para los especímenes lodo-arcilla (Basegio T. *et al.*, 2002).

Como en el estudio de Weng C. H., *et al.*, (2003), en este trabajo se observó que la absorción de agua aumentó conforme aumentó la cantidad de lodo en la mezcla (30 % de lodo). También se observó un aumento de este parámetro cuando se emplea la menor temperatura de cocción (1000 ° C). Con respecto al % de porosidad, este es mayor a una temperatura de cocción menor y decrece con la disminución de lodo en la mezcla. Este resultado también se observa en el estudio de Weng C. H., *et al.*, (2003). Lo anterior también se atribuye al alto contenido de materia orgánica.



Por otra parte, se observó que la densidad aumentó cuando la proporción de lodo en la mezcla disminuyó y la temperatura de cocción también se incrementó. Para la contracción lineal, se vio un incremento cuando aumentó la cantidad de lodo en la mezcla. Con esto se reafirmó que la cantidad de materia orgánica es considerable al haber un incremento de esta en un 10% comparada con un espécimen elaborado solo con arcilla (temperatura de cocción de 1000° C). Pero aumenta en un 44% cuando la temperatura de cocción aumentó también (1180° C).

Con base a los resultados obtenidos en los estudios se pueden elaborar las siguientes conclusiones sobre la influencia de los parámetros más importantes sobre la elaboración de productos cerámicos a base de lodos fisicoquímicos de diferente origen (Tabla 2.25).

Tabla 2.25. Conclusiones relevantes en la elaboración de productos cerámicos con diferentes residuos.

<b>Ladrillos y losetas cerámicas</b>		
Parámetro de influencia	Conclusiones	Referencias
% de lodo	50-60 %	Ferreria J. M. F. <i>et al.</i> , 2001.
% de arcilla	50-40 %	
Temperatura de cocción	1100° C	
<b>Agregados para la construcción y ladrillos</b>		
Parámetro de influencia	Conclusiones	Referencias
% de lodo	10 %	Weng C. H., <i>et al.</i> , 2003.
% de arcilla	90 %	
Temperatura de cocción	880 – 960° C	
Contenido Óptimo de Humedad (COH)	24 %	
<b>Especímenes de cerámica</b>		
Parámetro de influencia	Conclusiones	Referencias
% de lodo	30 %	Basegio T, <i>et al.</i> , 2002.
% de arcilla	70 %	
Temperatura de cocción	1000° C	

## 2.3 Aspectos Generales de los Productos Cerámicos

Se puede definir a la cerámica a la ciencia y el arte de hacer y usar artículos sólidos que tienen como componentes principales a materiales inorgánicos no metálicos. Esta definición no sólo incluye a la alfarería, porcelana, refractarios, productos de arcillas estructurales, abrasivos, esmaltes porcelanizados, cementos y vidrio; sino también materiales magnéticos no metálicos como los elementos ferroeléctricos, cristales simples, vidrio-cerámica y un gran variedad de materiales de uso reciente.

Las propiedades de los cerámicos son determinadas por la microestructura cristalina y la composición química de los constituyentes esenciales y de la naturaleza y la cantidad de los materiales minerales presentes. La caracterización mineralógica de estos materiales y por tanto de las propiedades de los cerámicos está sujeta a la variación de la cantidad de los materiales que puede ser alterada por las condiciones ambientales y geológicas del lugar donde se extraen los minerales (Kingery, 1976).

### 2.3.1 Silicatos

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo. Su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación.

Los silicatos están formados por cristales regulares y tienen como unidad básica al tetraedro (Figura 2.10 que está compuesto por un átomo central de silicio, Si, y cuatro átomos de oxígeno en los vértices).

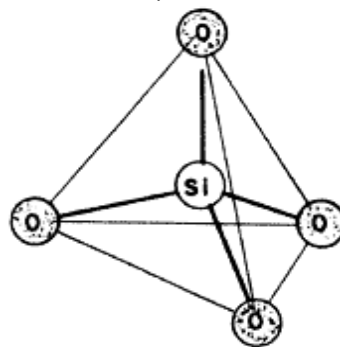


Figura 2.10. Tetraedro elemental o la pirámide triangular de los silicatos (Domínguez y Schiffer, 1995).

Cada átomo de silicio tiene cuatro carga de 4+ y los átomos de oxígeno tienen una carga de 2-. El silicio ocupa sus cuatro cargas mientras que cada oxígeno sólo una, entonces el tetraedro no está en equilibrio. Los silicatos se pueden clasificar según su estructura como se ve en la Tabla 2.26.

Tabla 2.26 Clasificación de los silicatos según su estructura.

CLASE DE SILICATO	GRUPO FUNCIONAL
NESOSILICATOS Tetraedros (SiO <sub>4</sub> ) aislados o independientes unidos por puentes de cationes metálicos	(SiO <sub>4</sub> ) (Si <sub>4-k</sub> Al <sub>k</sub> O <sub>16</sub> ) <sup>-(16+k)</sup>
INOSILICATOS Tetraedros (SiO <sub>4</sub> ) en cadenas o en cintas (dobles cadenas)	(SiO <sub>3</sub> ) <sup>-2</sup> (Si <sub>4-k</sub> Al <sub>k</sub> O <sub>12</sub> ) <sup>-(8+k)</sup>
CICLOSILICATOS Tetraedros (SiO <sub>4</sub> ) en anillos triples, cuádruples o séxtuples	(Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> ) <sup>-12</sup> (Si <sub>6-k</sub> Al <sub>k</sub> O <sub>18</sub> ) <sup>-(12+k)</sup>
TECTOSILICATOS Tetraedros (SiO <sub>4</sub> ) dispuestos en redes tridimensionales	(SiO <sub>2</sub> ) (Si <sub>4-k</sub> Al <sub>k</sub> O <sub>8</sub> ) <sup>-k</sup>
SOROSILICATOS Formados dos tetraedros SiO <sub>4</sub> compartiendo un oxígeno, la proporción Si-O es 7:2.	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
FILOSILICATOS Tetraedros (SiO <sub>4</sub> ) dispuestos en redes planas	(Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sup>-</sup> (Si <sub>4-k</sub> Al <sub>k</sub> O <sub>10</sub> ) <sup>-(4+k)</sup>

De esta clasificación, los filosilicatos comprenden a los materiales utilizados en la elaboración de productos cerámicos. A su vez los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos. Como puede verse pertenecen a los filosilicatos grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas (Tabla 2.27).

Tabla 2.27. Clasificación de los filosilicatos.

TIPO	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS	
Bilaminares T:O 1:1	CANDITAS	Caolinita	SERPENTINA	Antigorita
		Nacrita		Crisotilo
		Dichita		Lizardita
		Hallosita		Bertierita
Trilaminares T:O:T 2:1	PIROFILITA		TALCO	
	ESMECTITAS	Montmorillonita	ESMECTITAS	Saponita
		Beidellita		Hectorita
		Nontronita		
	VERMICULITAS		VERMICULITAS	
	ILLITAS			
MICAS	Moscovita	MICAS	Biotita	
	Paragonita		Flogopita	
				Lepidolita
T:O:T:O 2:1:1	CLORITAS			

Cada mineral tiene características propias según el origen mineralógico y la estructura, ya sean octaédricos o dioctaédricos, y la sustitución existe entre cationes dentro de las estructuras. Las importantes aplicaciones industriales del grupo de las arcillas radican en sus propiedades fisicoquímicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)

- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

La composición de las arcillas está basada en la estructura de la Caolinita,  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ . Otras composiciones que a menudo son posibles de encontrar se presentan en la Tabla 2.28.

Tabla 2.28. Fórmulas químicas de los minerales de las arcillas (Kingery, 1976)

Mineral	Fórmula Química
Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$
Halosita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4 \cdot 2H_2O$
Pirofilita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_2$
Montmorilonita	$\left( \begin{matrix} Na_{0.33} \\ Al_{1.67} & (Si_2O_5)_2(OH)_2 \\ Mg_{0.33} \end{matrix} \right)$
Mica	$Al_2K(Si_{1.5}Al_{0.5}O_5)_2(OH)_2$
Illita	$Al_{2-x}Mg_xK_{1-x-y}(Si_{1.5-y}Al_{0.5+y}O_5)_2(OH)_2$

El término arcilla se emplea para definir a la roca sedimentaria dispersa y compuesta de partículas de minerales hojosos compuestos esencialmente de silicatos de aluminio hidratados, y que, en su mayor parte, se hallan como fracción de tamaños de 1 a 0.1 micras, e impurezas de otros minerales acompañantes (Avgustinik A. I., 1983).

Por ejemplo, el cuarzo, que esta presente en granos rodados coloreados o incoloros. A menudo se encuentran feldespato, preferentemente de ortosa y microlina. Otras impurezas de baja calidad son los carbonatos de calcio y magnesio (fundentes energéticos). La pirita y el yeso también se consideran fundentes energéticos

Con frecuencia también se pueden encontrar fracciones de rutilo ( $TiO_2$ ) que, junto con el óxido de hierro, le imprimen al artículo después de la cocción tonalidades pardo-amarillentas; la presencia de óxidos de calcio y magnesio suelen debilitar esta coloración. En el microscopio también se pueden encontrar pequeñas cantidades de circón, turmalina, augita, leucoxina, granate, hornblenda, clorita, distena, talco y otros que no afectan para nada la calidad del producto.

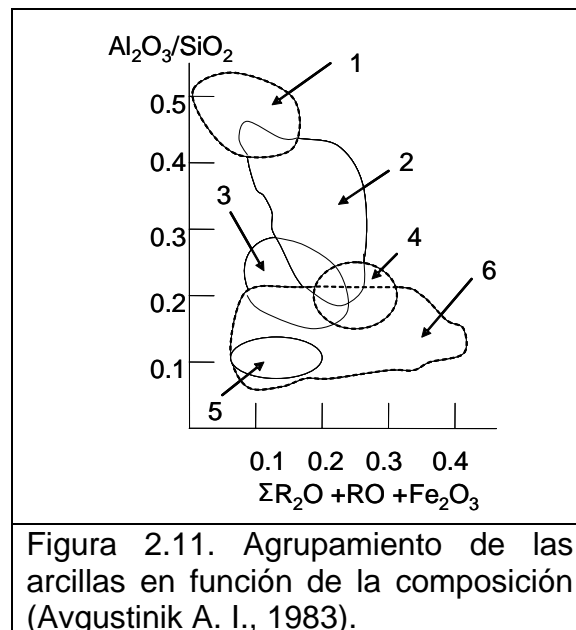
Los sulfatos de sodio, magnesio, calcio y hierro, por ejemplo, provocan decoloración en el artículo (Avgustinik A. I., 1983). En la mayoría de las arcillas se encuentran sustancias orgánicas que les dan coloraciones de distintas tonalidades desde el gris hasta el negro

El análisis químico permite determinar la composición química, y con ciertos ensayos de rayos X (difracción de rayos X), la estructura mineralógica de la arcilla para con ello hacer una estimación previa de sus propiedades técnicas y realizar los cálculos técnicos precisos para la elaboración de las pastas, esmaltes y barnices. En la Tabla 2.29 se presentan las concentraciones de algunos compuestos, sus efectos y las posibles ventajas o desventajas para ser utilizados como materia prima en la elaboración de productos cerámicos:

Tabla 2.29 Principales efectos de algunos compuestos en las arcillas (adaptada de Avgustinik A. I., 1983).

Compuesto	Propiedad
Alto contenido de sílice	Arcilla muy enarenada. Baja plasticidad en la pasta. La sílice actúa como fundente.
Alto porcentaje de alúmina (39.4%)	Refractariedad de la materia prima.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y TiO <sub>2</sub> menor al 1%	Debajo de esa concentración se pueden hacer artículos de tonalidades blancas
Arcillas con poca alúmina y muchos óxidos alcalinos y alcalinotérreos	De baja fusión y solo se emplean para elaborar artículos cerámicos para la construcción.
Arcilla con gran cantidad de óxidos alcalinos y alta cantidad de alúmina	Capacidad de la arcilla para sinterizarse sin perder la refractariedad.

Valiéndose de los datos del análisis químico, las arcillas pueden agruparse de acuerdo a su designación técnica. Este agrupamiento se presenta en la Figura 2.10, en el que se ha admitido como indicadores la relación de moles Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> y la suma de moles de los fundentes (Avgustinik A. I., 1983).



De la Figura, los caolines y las arcillas que se utilizan en la elaboración de productos refractarios, se sitúan en el sector 1, aproximadamente; las arcillas utilizadas para la producción de baldosas, tubos de canalización, artículos acidorresistentes, piedras artificiales, en el sector 2; las arcillas de alfarero y de terracota, en el sector 3; las arcillas de tejas, en el sector 4; las arcillas para la elaboración de clinker para pavimentación, en el sector 5; las tierras de ladrillos abarcan el mayor sector 6 que incluye parcialmente los sectores 3 y 4, y totalmente el 5.

### 2.3.2 Definición y Clasificación (ordinarios y refractarios)

Los materiales cerámicos pueden clasificarse de acuerdo al proceso que son sometidos, por esto se pueden clasificar como sigue:

- Cerámica ordinaria: se utiliza a temperatura ambiente.
- Cerámica refractaria: se utiliza a temperatura elevada. Sus componentes fundamentales son: sílice, alúmina y algunos óxidos metálicos.

Además, los productos cerámicos se clasifican en cerámicos ordinarios (tradicionales) y avanzados. En contraste con los cerámicos tradicionales (basados principalmente de arcilla) los cerámicos avanzados, técnicos o de ingeniería están constituidos principalmente por compuestos puros o casi puros, óxidos, nitruros o carburos (alúmina el nitruro de silicio, carburo de silicio y circonia, entre otros). Muchos cerámicos avanzados comienzan en forma de polvo para después ser mezclados con algún lubricante para mejorar su compactación y por último se le aplica presión para darles forma. Tras este proceso se lleva a cabo el sinterizado que desarrolle la microestructura y las propiedades necesarias.

#### 2.3.2.1 Generalidades de los productos cerámicos ordinarios (tradicionales)

Los cerámicos ordinarios se clasifican según su capacidad de absorción de agua en:

- a) Cerámicos permeables: Son aquellos que poseen arcilla de grano grueso, áspero, permeables y absorben la humedad (ladrillos, tejas, etc.).
- b) Cerámicos semicompactos: Poseen arcilla de grano fino, poco permeable y no absorben humedad.
- c) Cerámicos compactos: Poseen estructura microcristalina, son impermeables (lozas finas, porcelanas), suaves y no absorben humedad.
- d) Cerámicos tenaces: Soportan altos esfuerzos y temperaturas elevadas

Pauld. R., (1990) hizo una clasificación de los materiales cerámicos en porosos y densos (el barnizado puede o no ser realizado), como se muestra en las Tabla 2.30.

Tabla 2. 30. Clasificación de los materiales cerámicos porosos (Pauld. R. 1990).

CERAMICA POROSA		CERAMICA DENSA	
TIPO	MATERIAS PRIMAS (%)	TIPO	MATERIAS PRIMAS (%)
Alfarería común	Arcilla (impura)	Gres	Arcilla (de fusión natural) o arilla + fundentes y materiales de sílice
Mayólica	Arcilla (impura) + arena y fundentes	China vítrea	Bolos + arcilla china (50) Minerales feldespáticos (10-20) Cuarzo (35-45)
Loza	Arcilla Bola (50); Arcilla China (50); Minerales feldespáticos (5-20); Sílex u otros minerales de sílice (30-45)	Porcelana dura y blanda	Arcilla china (30-40) Feldespato (30-40) cuarzo (25-35)

### 2.3.3 Materias primas y procesos de producción de ladrillos cerámicos

La materia principal es la sílice y la alúmina, con pequeñas cantidades de otros materiales tales como óxidos metálicos. Existen varios tipos de ladrillos, que se clasifican en sus propiedades mecánicas y refractarias. En la Tabla 2.31 se presenta una clasificación de ladrillos con algunas características (Valverde M E., 2001).

Tabla. 2.31. Clasificación de ladrillos cerámicos y algunas características (Valverde M E., 2001).

Tipo de ladrillo	% de absorción de agua	Peso específico	Peso por unidad de volumen	Resistencia a la compresión, kg/cm <sup>2</sup>
Ordinario	12 - 15	2.6 – 2.7	1.6 – 1.9	> 150
Hueco				
De parámetro (liso)	2 - 4			> 150
Poroso				
Vitrificado o clinas		2.6 – 2.7	1.8 – 2.1	1700-2000

Los ladrillos cerámicos deben tener las características especificadas en la Tabla 2.32.

Tabla 2.32. Materia prima para la elaboración de ladrillo.

Óxido	Arcilla (Diatomea)	Valores recomendados	Observaciones
SiO <sub>2</sub>	69.00%	50-60%	Ayuda en la contracción y firmeza de la pieza pero un exceso disminuye la cohesión entre partículas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.0%	20-30%	Imparte plasticidad y un exceso provoca contracciones altas por secado
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20%	2.2	Su exceso puede causar coloración rojiza
Na <sub>2</sub> O	1.18%	1.18	Su exceso causa eflorescencia*
K <sub>2</sub> O	1.04%	1.18	Su exceso causa eflorescencia*
CaO	4.68%	1.04	Su exceso puede causar agrietamiento
TiO <sub>2</sub>	0.34%	0.34	
MgO	6.50%	---	Imparte coloración amarilla; ayuda a disminuir la deformación pero un exceso produce deterioro por expansión de la superficie

(\*) La eflorescencia es un depósito salino, usualmente de colores blanco, amarillento o pardo, que se produce en la superficie del concreto endurecido o en los muros de ladrillos cerámicos. Esto ocurre por la migración de la cal y otros aniones como los cloruros, sulfatos, etc., a través de los poros capilares que tienen el concreto y los ladrillos en ciclos de humedad y sequedad.



Además algunas sustancias solubles como sales (sulfato sódico, sulfato de magnesio) deben ser menores al 0.04%. Un porcentaje mayor produce eflorescencias. La arcilla debe tener un bajo contenido de material orgánico para que en el proceso de la cocción no queden espacios vacíos por el consumo de este material.

La norma NMX-C-006-1976 LADRILLOS BLOQUES CERAMICOS DE BARRO, ARCILLA Y/O SIMILARES, especifica las dimensiones nominales para la elaboración de ladrillos como se ve en la Tabla 2.33.

Tabla 2.33. Dimensiones nominales para la elaboración de ladrillos (NMX-C-006-1976).

<b>Dimensiones</b>			
Medidas nominales		Medias de fabricación (mm)	
TIPO		Mq	Mn
Largo	300	290	380
	200	190	180
Ancho	100	90	---
	150	140	135
	200	190	185
	300	290	---
Altura o peralte	50	45	---
	75	65	60
	100	90	85
	150	140	---
	200	190	---
	300	290	---

Donde Mq se refiere a los ladrillos fabricados con maquinaria y los Mn son elaborados a mano. Ambos ladrillos deben tener un control de calidad como se especifica en la Tabla 2.34 (NMX-C-006-1976). En general, la materia prima son arcillas locales fácilmente obtenibles junto con arena, chamota y cenizas.

Tabla 2.34. Grados de calidad de los ladrillos elaborados en máquina y a mano (NMX-C-006-1976).

Tipo	Mq	Designación	Grados de calidad
Subtipo	MqM	Ladrillos macizos	A -B -C - D
Subtipo	MqP	Ladrillos perforados	B -C - D
Subtipo	MqHv	Ladrillos huecos verticales	C - D
Subtipo	MqHh	Ladrillos huecos horizontales	D - E
Tipo	Mn	Ladrillos macizos	E

El proceso de elaboración de productos cerámicos sigue los siguientes pasos principalmente (Kingery, 1976):

## **Preparación y moldeo**

El proceso de moldeo puede llevarse a cabo de tres diferentes formas: a) moldeo a mano; b) prensado mecánico y c) prensado en galletera (Valverde M E., 2001)

### **Moldeo a mano.**

La arcilla se coloca en moldes de madera para después ser almacenados en plataformas donde se secan los ladrillos ya moldeados. La arcilla sobrante se retira mediante una tablilla de madera o de alambre. El molde se remoja o se recubre de arena para evitar que la arcilla se pegue al desmoldar la pieza.

### **Prensado mecánico.**

La arcilla amasada se coloca en moldes de acero y se comprime. De esta forma se obtiene un ladrillo de forma regular en forma y tamaño, con aristas perfectas y superficies lisas. Los ladrillos tienen características mecánicas aceptables. Para la quemada, los ladrillos se distribuyen sobre vagonetas especiales que los desplazan lentamente a través del horno.

### **Prensado en galletera.**

La arcilla amasada es extrusionada a través de una apertura rectangular. Por este proceso se obtiene una barra continua que se hace descansar sobre una masa de acero y se corta en piezas elementales por medio de un alambre para después secarlos y quemarlos.

## **Secado**

Tiene por objeto eliminar la humedad libre y parte de la combinada por exposición al ambiente, lo cual se hace así por costos y velocidad de contracción, lo que da una mejor calidad. El secado consiste en colocar los ladrillos en un lugar de amplia ventilación, protegidos del agua y del sol, con la finalidad de que pierdan el agua que obtuvieron en el amasado, antes de entrar en el horno, para así evitar una evaporación brusca, que traería como consecuencias grietas, roturas o deformaciones. También se usan las máquinas de desecado, las cuales son más rápidas pero incrementan el costo. El secado se puede dar de las siguientes formas:

1. Secado en baldas al aire libre o en cobertizos no calentados
2. Solera caliente
3. Secados en cámaras
4. Secaderos de túnel

## **Cocción**

Proceso mediante el cual se somete al fuego la arcilla moldeada y seca, para producir una sinterización intensa de la arcilla, y una vitrificación adecuada. Estos procesos de cocción se deben llevar a cabo manejando una curva de temperaturas de la cual dependerán varias de las características del ladrillo, ya que si es mal manejada esta curva puede haber problemas con el ladrillo, por ejemplo la generación de esfuerzos residuales en el ladrillo, produciendo agrietamientos. La cocción, que es lo que le da resistencia a los ladrillos, se realiza en hornos, que pueden ser de hormiguero, intermitentes, los Hoffman, los hornos de bóveda

transversal, hornos de túnel, etc. (Kingery, 1976). La temperatura oscila entre los 960-1180° C.

### **2.3.4 Productos cerámicos tradicionales (alfarería)**

Por alfarería se entienden aquellos objetos realizados con arcilla y posteriormente cocidos en una sola cocción. Normalmente, se aplica a las piezas realizadas sin esmalte o con barniz aplicado en una sola cocción. Las ollas o pucheros (en inglés este término se traduce como pottery), platos, vasos, botijos y una lista interminable de piezas son las que tradicionalmente se denominan alfarería.

La persona que hace alfarería es conocida como alfarero y se diferencia del ceramista en que este continúa elaborando la pieza mediante el añadido de esmaltes y otras técnicas que requieren una o más cocciones. Alfarería es un término antiguo que comprende también lo que aquí se define como cerámica.

Materias primas para la producción de productos cerámicos (alfarería).

Las características obtenidas por las distintas pastas son:

- a) Cuando tienen un color rojo o amarillento y su textura es porosa, recibe el nombre de terracota o de alfarería. Representan una pasta compuesta por grano fino y de gran plasticidad, cuecen a baja temperatura entre 950° y 1100° C.
- b) Cuando el color tiende al blanco y su textura es porosa recibe el nombre de loza.
- c) Cuando presenta un color entre el amarillento y el gris, habiéndose vitrificado algunos elementos de su composición, presentando una textura poco porosa, recibe el nombre de gres.
- d) Cuando presenta un color blanco semitransparente, mostrando una textura impermeable, recibe el nombre de porcelana.

Para poder saber si una arcilla puede ser empleada para fines cerámicos, hay que realizar análisis de los parámetros como: densidad (peso específico); granulometría (finura de grano); plasticidad; contracción por secado y por cocción; humedad y porcentaje de absorción de agua.

### **2.3.5 Impacto ambiental de la producción de productos cerámicos**

Durante el proceso de fabricación de productos cerámicos se generan, en las diversas etapas, una serie de residuos de diversa índole: residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Cabe destacar que ésta industria tiene la característica de poder reutilizar sus propios residuos sólidos generados. Además es un medio para valorizar residuos provenientes de muchas industrias.

Desde el punto de vista del medio ambiente, es necesario realizar un análisis de los residuos para evaluar su potencial de impacto al medio. Por ejemplo, es obligado realizar pruebas de lixiviación a estos residuos por la presencia de metales pesados en las materias primas para la elaboración de pastas y esmaltes.

Dentro de los residuos sólidos, estos se pueden clasificar en crudos (generados antes de la cocción) y cocidos, utilizados comúnmente como desengrasante en las pastas cerámicas. Los residuos pueden ser absorbidos en el proceso, como es el caso de la chamota. El término que se utiliza para emplear residuos e introducirlos en una matriz cerámica es la ceramización que es una adecuada forma de absorber residuos provenientes de otras industrias que no sean la cerámica y la cerámica misma. Por otro lado, la industria de la cerámica genera residuos líquidos y gaseosos provenientes de la diferentes etapas como se muestra en la Figura 2.12.

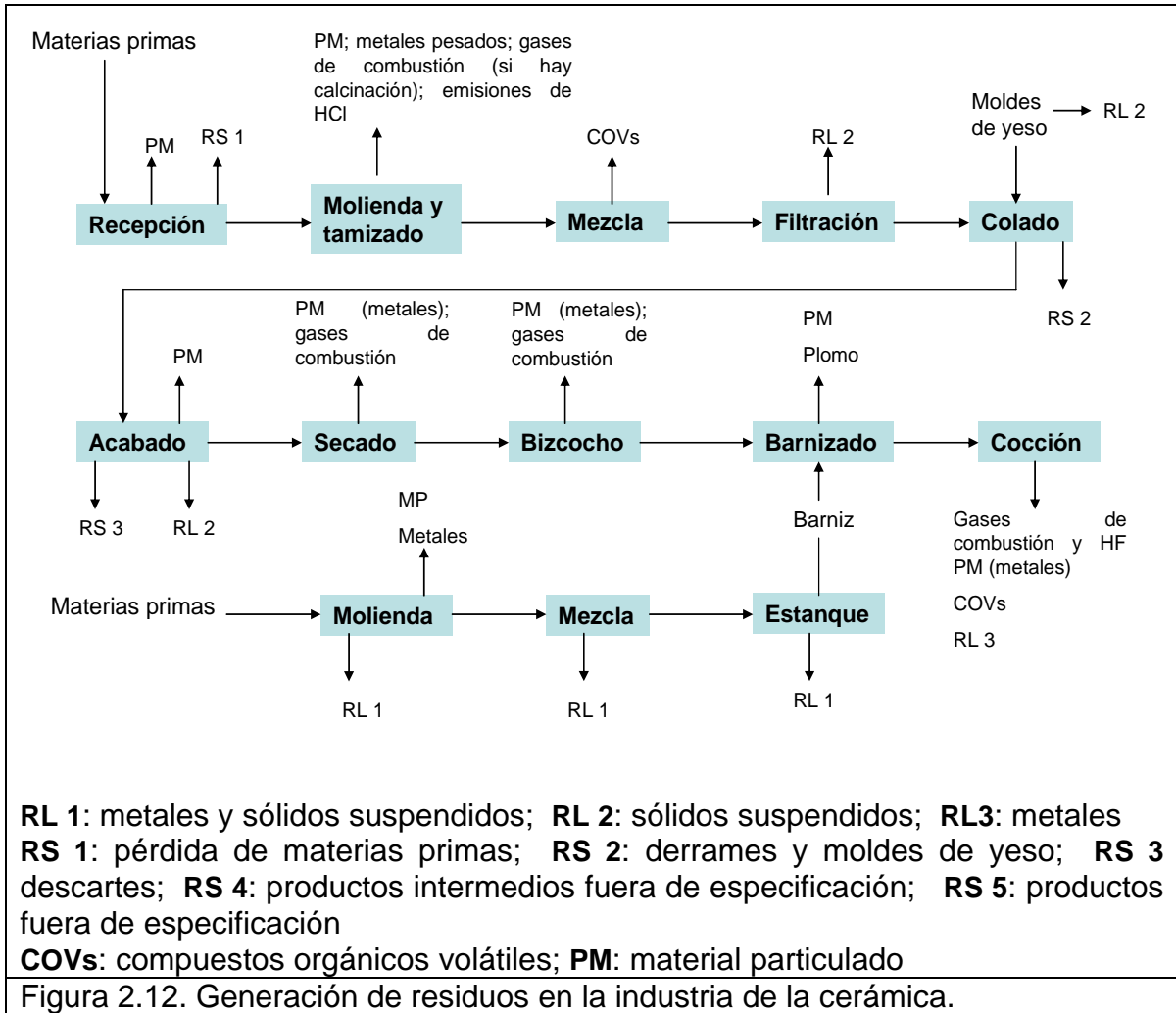


Figura 2.12. Generación de residuos en la industria de la cerámica.

De la Figura anterior, las partículas se generan por el viento en las pilas del material en bruto en los almacenes y en la manipulación y transferencia del mismo. Cabe señalar que dentro de este material particulado, suele haber partículas de metales pesados como plomo. Los gases de combustión suelen ser SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HF, COVs, entre otros gases.

En la Tabla 2.35 se presenta el listado de Normas Oficiales Mexicanas aplicables a las emisiones de contaminantes a la atmósfera producidos en la industria cerámica.

Tabla 2.35. Normas Oficiales Mexicanas en relación de los contaminantes atmosféricos producidos en la industria cerámica.

Norma	Contaminante	Límite máximo permisible
NOM-021-SSA1-1993	Monóxido de carbono, (CO)	11 ppm ó 12.595 µg/m <sup>3</sup> (8 horas)
NOM-022-SSA1-1993	Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 hrs.)
NOM-023-SSA1-1993	Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm ó 395 µg/m <sup>3</sup> (1 hora)
NOM-025-SSA1-1993	Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 hrs.)
NOM-026-SSA1-1993	Plomo (Pb)	1.5 µg/m <sup>3</sup> (3 meses) (exposición crónica)

Los residuos sólidos provienen del rechazo de moldes de yeso que no se pueden utilizar, a la mala manipulación de la materia prima y a los residuos generados en el proceso. Se pueden encontrar diferentes cantidades de generación de residuos dependiendo del tipo de cerámica a utilizar. Así se estima un 20% de rechazo en porcelana, 0% en loza de barro y un 6% en productos sanitarios.

Los residuos líquidos están compuestos de solventes cuando estos se emplean para limpiar la línea de pintura y los equipos de aplicación. Cuando la base de los productos de limpieza es de agua, ésta debe de ser regulada por contener metales pesados como plomo, mercurio y boro. El líquido generado de las descargas de la industria cerámica se caracteriza por su alto contenido de sólidos suspendidos. En la NOM-002-SEMARNAT-1996, se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. En la Tabla 2.36 se puede observar los límites máximos permisibles de descarga de metales pesados hacia el sistema de alcantarillado.

Tabla 2.36. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Parámetro, (mg/L)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo (VI)	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	5	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

La industria de la cerámica contiene en sus aguas residuales metales pesados como plomo, cadmio, mercurio, etc. Es por ello que se debe de apegar a lo establecido en dicha norma.

## CAPITULO III. METODOLOGIA

### 3.1 Metodologías de las pruebas de elaboración de productos cerámicos a partir de lodo de plantas potabilizadoras

Como parte de la evaluación técnica, económica, social y ambiental de la valoración de los lodos para poder aprovecharlos, se realizaron pruebas de elaboración de ladrillos con materia prima convencional y con lodo procedente de la planta potabilizadora “Los Berros”, del Sistema Cutzamala, localizada en el municipio de Villa Victoria, Estado de México.

La parte experimental de este trabajo está dividida en dos etapas principales:

- 1) Muestreo y caracterización de lodos de sedimentadores y de los sistemas de almacenamiento de lodos, denominados tarquinas.
- 2) Realización de pruebas exploratorias y finales de elaboración de materiales cerámicos. Las pruebas exploratorias se realizaron con el fin de que, con los resultados obtenidos y la revisión de la bibliografía referente a pastas cerámicas, se planteara un diseño experimental de tipo superficie respuesta con dos valores centrales para optimizar las condiciones de elaboración de ladrillos tradicionales.

El objetivo de las pruebas finales fue aumentar la viabilidad técnica de esta opción de valoración de reúso de lodos generados en la PPLB para elaborar materiales cerámicos.

Los reactivos, materiales, técnicas experimentales y analíticas empleadas en este trabajo, además de la descripción de la técnica de evaluación utilizada, se presentan en los siguientes incisos de este capítulo.

#### 3.1.1 Materiales y Reactivos

##### 3.1.1.1 Lodo

El lodo utilizado en este estudio por sus características, se denomina fisicoquímico según Goldbold, *et al.* (2003), que los define 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.

##### Muestreo y caracterización

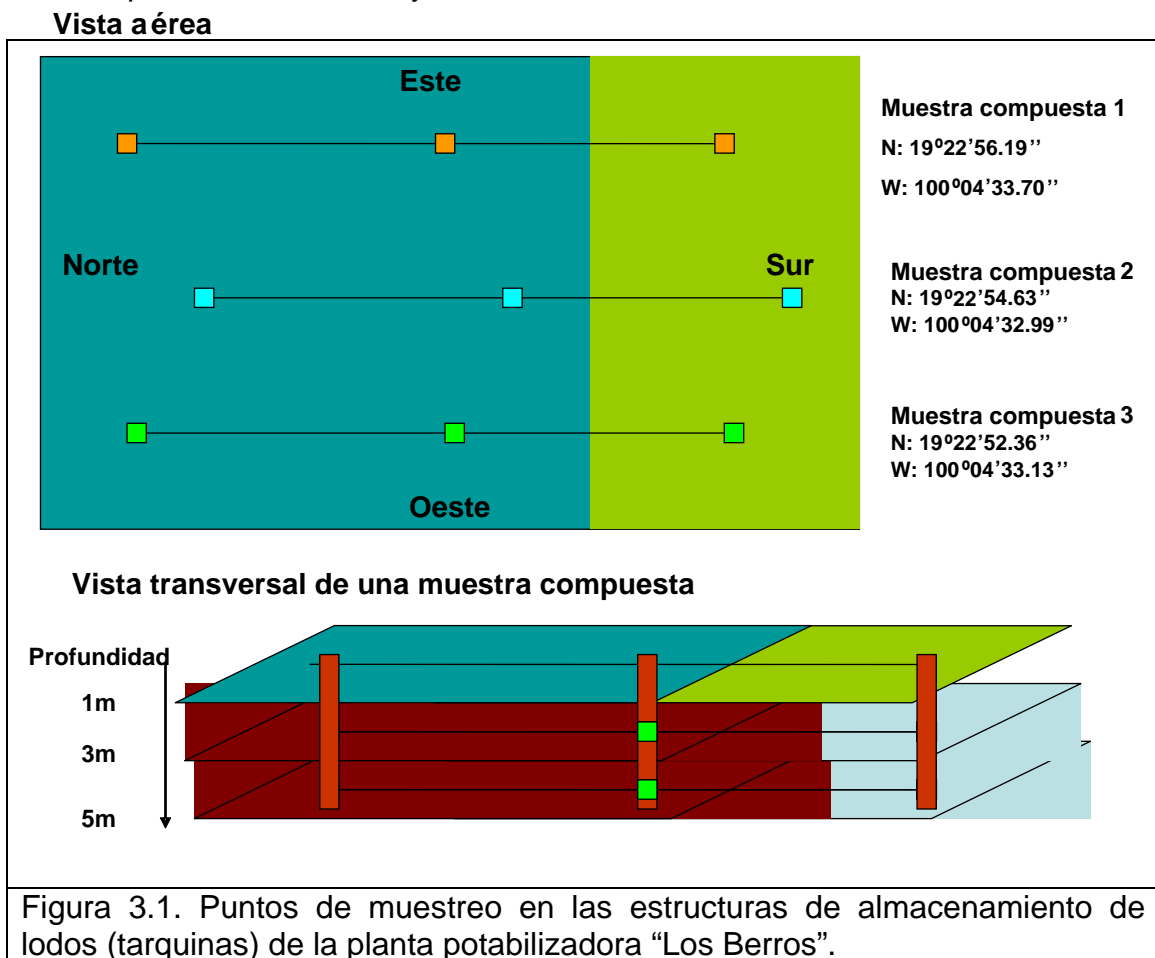
El muestreo de los lodos se llevó a cabo en los sedimentadores y en los sistemas de almacenamiento de lodos denominados tarquinas en época de estiaje ( noviembre a mayo) y de lluvias (junio a octubre). Lo anterior fue realizado para determinar si existen cambios en las características del lodo a lo largo del año que pudiera afectar la elaboración de los productos elaborados con el lodo como materia prima.

En las tarquinas se colectaron tres muestras compuestas formadas a partir de tres muestras simples tomadas a tres diferentes alturas (uno, tres y cinco metros de profundidad), para formar cada muestra compuesta.

A continuación se describen e ilustran (Figura 3.1), los puntos de muestreo y muestras colectadas de los lodos depositados en las tarquinas (en época de estiaje):

Tres muestras compuestas para la tarquina 1. Estas muestras compuestas se formaron a partir de tres muestras diferentes las cuales fueron tomadas a tres diferentes profundidades: uno, tres y cinco metros.

Tres muestras compuestas para la tarquina 2. Estas muestras compuestas se formaron a partir de tres muestras diferentes las cuales fueron tomadas a dos diferentes profundidades: uno y tres metros.



En la caracterización de lodos se determinaron: los principales parámetros fisicoquímicos (pH, humedad, metales, nitrógeno, densidad, contenido de óxidos, composición mineralógica) y microbiológicos (coliformes fecales, Salmonella y huevos de helminto), que permitirían determinar el potencial de aprovechamiento de los lodos como materia prima para elaborar productos cerámicos.

## Lodo para pruebas de elaboración de cerámicos

El lodo utilizado en las pruebas de elaboración productos cerámicos se extrajo de los sistemas de almacenamiento de lodos denominados “tarquinas” de la planta potabilizadora “Los Berros”. El lodo fue secado, triturado y tamizado para realizar las pruebas. La descripción de este acondicionamiento se presenta en el inciso 3.2.2.1.

El lodo, aproximadamente 500 L, fue colectado de la parte superficial de la tarquina con una humedad del 96.5%. El proceso de acondicionamiento de lodo consistió en el secado durante quince días expuesto a los rayos del sol. Una vez seco se procedió a la molienda de éste hasta obtener un tamaño de partícula de 0.68, 0.12, 0.305, 0.49 y 0.54 mm (de acuerdo a los valores del diseño experimental).

### 3.1.1.2 Arcilla Roja

La arcilla roja se extrajo de los campos de cultivo del municipio de San Andrés Chiautla, zona oriente del Estado de México, con coordenadas: 19° 34' 21.12" latitud Norte y 98° 53' 34.85" longitud Este. Esta arcilla, denominada por los campesinos de la región como “Tierras de barro”, es de origen aluvial con aluviones activos intermitentes y estables (Segura Castruita M. A. *et al.*, 2000), con arcillas esmectíticas que se orientan aleatoriamente.

La arcilla se caracterizó realizando análisis de contenido de óxidos y de composición mineralógica. Se secó colocándola al sol por un lapso de 5 días. Después se molió y se tamizó para obtener los tamaños de partícula descritos anteriormente (0.68, 0.12, 0.305, 0.49 y 0.54 mm).

## 3.2 Sistemas y Técnicas Experimentales

### 3.2.1 Caracterización de lodo

Las caracterización se realizó aplicando las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998) y el Standard Methods for Water and Effluents Analysis (Ademoroti, 1996). Cuando no fue posible el análisis inmediato, se preservó la muestra para evitar su biodegradación. Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico.

El contenido de óxidos se determinó por la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Las muestras en polvo fueron calcinadas a 1000° C por una hora para determinar la pérdida por calcinación (PxC). Con este material se preparó la perla para medir elementos mayores mediante el programa analítico FULLMDILQAN. Para el análisis de composición mineralógica por Difracción de Rayos X (DRX) se utilizó un difractómetro Philips mod. 1130/96 (generador) y PW 1050/25 (goniómetro) utilizando radiación Cu K $\alpha$ .

### 3.2.2 Pruebas Exploratorias

Se llevaron a cabo una serie de pruebas exploratorias que consistieron en elaborar piezas de alfarería tradicional, probetas y esferas para soporte de cultivos hidropónicos con una arcilla tipo “ball clay”.



Para las pruebas de alfarería, las piezas se hicieron mezclando el lodo con un contenido de humedad del 85% y un barro denominado plástico en proporciones 1:1 y 1:4. Las piezas se moldearon manualmente y se secaron durante dos semanas a temperatura ambiente para después ser cocidas a una temperatura de 450°-850° C en un horno de leña tradicional. Una vez cocidas las piezas se evaluó la trabajabilidad de las pastas y la resistencia a la temperatura de cocción.

La prueba de elaboración de probetas cerámicas consistió en mezclar el lodo con arcilla ball clay en proporción 1:1 en peso y su posterior cocción a una temperatura de 1,280° C en un horno de gas. Finalmente, las piezas resultantes se caracterizaron analizando el porcentaje de contracción por secado, densidad y el porcentaje de absorción de agua.

Las esferas para soporte de cultivos hidropónicos fueron elaboradas con 50% de lodo y 50% de una arcilla caolinítica, mezclando ambas partes y formando las esferas para después quemarlas a 900° C. A las esferas se les midió el porcentaje de absorción de agua para estimar si los valores estaban dentro de los recomendados para soportes hidropónicos.

**3.2.3 Pruebas Finales**

**3.2.3.1 Diseño experimental**

Las pruebas de elaboración de los ladrillos con el lodo procedente de la planta potabilizadora y con la arcilla procedente del municipio de San Andrés Chiautla se realizaron con base en el diseño experimental tipo superficie de respuesta aplicando el programa estadístico Statgraphics versión 5.1. El diseño experimental específico fue de composición central (Biles y Swan, 1980) con cuatro factores o variables:

- X<sub>1</sub>= Porcentaje de lodo en la mezcla, (% p/p)
- X<sub>2</sub>= Tamaño de partícula, (µm)
- X<sub>3</sub>= Temperatura de cocción, (° C)

Los valores extremos de estas variables, se eligieron con base en una revisión bibliográfica realizada en este estudio sobre elaboración de materiales cerámicos y a partir de materiales con características similares a las de los lodos, además de considerar los resultados de las pruebas exploratorias que se llevaron a cabo.

Los parámetros de respuesta o de optimización principales son:

- Y<sub>A</sub>= Resistencia a la compresión, (kg/cm<sup>2</sup>)
- Y<sub>B</sub>= % de absorción de agua, (% p/p)
- Y<sub>C</sub>= % de contracción por quemado, (%)
- Y<sub>D</sub>= densidad de los productos, (g/cm<sup>3</sup>)

El número de experimentos se determinó empleando la siguiente ecuación (Biles y Swain, 1980):

$$N = 2^k + 2k + n_c \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

N= número de experimentos a realizar

k= número de factores

n<sub>c</sub>= número de repeticiones del experimento con puntos centrales

Para tres factores y dos repeticiones o réplicas del experimento con puntos centrales se tiene que:

$$N = 2^3 + (2 * 3) + 2 = 16 \text{ experimentos}$$

La distancia del punto axial del centro (α), es dada por la siguiente ecuación:

$$a = \left[ \frac{(NF)^{1/2} - F}{2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.2})$$

con:

$$F = 2k$$

$$\alpha = 1.28$$

Si se considera un diseño experimental tipo 2k, se tendrían 16 experimentos; considerando solo dos niveles de investigación (-1 y 1). Este tipo de diseño es básico y no permite obtener suficiente información, por lo tanto se prefirió un diseño más robusto como es el de superficie de respuesta (Fotis, 2003) que permitirá hacer 16 experimentos con un intervalo amplio de valores; -1.28, -1, 0, +1 y +1.28. Estos valores se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores centrales y extremos en el diseño experimental desarrollado para realizar las pruebas de elaboración de materiales cerámicos.

FACTORES	Niveles				
	-1.28	-1	0	1	1.28
X <sub>1</sub> , Porcentaje de lodo, % p/p	17.2	20	30	40	42.8
X <sub>2</sub> , Tamaño de partícula, μm	0.0682	0.12	0.305	0.49	0.5418
X <sub>3</sub> , Temperatura de cocción, °C	835.2	880	1040	1200	1244.8

Para construir la Tabla 3.2, se eligieron valores reales de cada factor para el nivel central codificado central (que es el cero) y después los valores extremo -1 y +1 (valores recomendados de acuerdo a la investigación que se desarrolló). Por último, se calcularon los valores reales de alfa utilizando las siguientes expresiones:

$$+ a = \left[ \frac{(\text{valor} - 1) + (\text{valor} + 1)}{2} \right] + \left[ \frac{a * (\text{valor} + 1) - (\text{valor} - 1)}{2} \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.3})$$

$$-a = \left[ \frac{(valor - 1) + (valor + 1)}{2} \right] + \left[ \frac{-a * (valor + 1) - (valor - 1)}{2} \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.4})$$

El programa Statgraphics 5.1 automáticamente calculó las combinaciones de los niveles o valores de cada factor, obteniendo las condiciones experimentales para cada experimento para elaborar ladrillos cerámicos. En la Tabla 3.3 se muestran las combinaciones de los valores codificados y de los reales de cada factor.

Tabla 3.3. Valores reales y valores codificados del diseño experimental planteado para la elaboración de ladrillos cerámicos.

No. Exp.	VALORES CODIFICADOS			VALORES REALES		
	Composición de lodo, %	Tamaño de grano, μm	Temperatura, °C	Composición de lodo, % p/p	Tamaño de grano, μm	Temperatura, °C
1	1	1	-1	40	500	880
2	-1	-1	1	20	125	1200
3	1	-1	1	40	125	1200
4	1	1	1	40	500	1200
5	0	0	1.28	30	300	1244.8
6	-1	1	-1	20	500	880
7	1	-1	-1	40	125	880
8	1.28	0	0	42.8	300	1040
9	0	0	0	30	300	1040
10	0	1.28	0	30	600	1040
11	0	0	-1.28	30	300	835.2
12	-1	-1	-1	20	125	880
13	-1	1	1	20	500	1200
14	-1.28	0	0	17.2	300	1040
15	0	0	0	30	300	1040
16	0	-1.28	0	30	75	1040

De la matriz del diseño experimental, se elaboraron probetas (barras cerámicas). La elaboración de las probetas y de ladrillos fue llevada de acuerdo con la siguiente metodología.

**3.2.3.2 Descripción de pruebas finales**

**Secado de la arcilla roja y del lodo**

El secado de 500 kg de lodo aprox., con una humedad inicial de 96.5%, se realizó colocándolo en una capa de cinco a siete centímetros de espesor sobre un área de aproximadamente 15 m<sup>2</sup>. 200 kg de arcilla roja con una humedad de 4.95% aproximadamente, se colocaron también en una capa de cinco a siete centímetros sobre un área de 6 m<sup>2</sup>. Ambos materiales se colocaron bajo los rayos del sol y cuando fue necesario el secado se hizo en un área cubierta para protegerlos de la lluvia. Cada día se hizo la medición de la humedad para estimar el tiempo de secado necesario de los materiales. El tiempo de secado para el lodo fue de 25 días pues existieron malas condiciones para el secado (época de lluvias). La humedad final fue

de 4.84%. Para la arcilla roja, la humedad final fue de 2.14% con un tiempo de secado de 15 días aproximadamente con las mismas condiciones en el ambiente.

### **Molienda de la arcilla roja y del lodo**

La molienda del lodo y de la arcilla roja se realizó en las instalaciones de los laboratorios de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica, ubicados en el Edificio D de la Facultad de Química. Primeramente, las partículas de mayor tamaño se pasaron por una trituradora de minerales y después se pasaron por un pulverizador marca McCool Pulverizar 6 1/2 F donde se controló el tamaño de partícula mediante la perilla que abre y cierra los discos internos de molienda.

### **Tamizado de la arcilla roja y del lodo**

El tamizado se llevó a cabo utilizando una serie de tamices con tamaños de apertura de acuerdo a la ASTM para llegar a la granulometría requerida en el diseño experimental. La agitación de los tamices se hizo en un equipo ROTAP Modelo: RX-29; colocando no más de cien gramos por tamizado por un tiempo de 10 minutos de agitación. Los tamices utilizados fueron los siguientes:

- Malla No. 30, diámetro de apertura de 600  $\mu\text{m}$ .
- Malla No. 35, a diámetro de apertura de 500  $\mu\text{m}$ .
- Malla No. 50, diámetro de apertura de 300  $\mu\text{m}$ .
- Malla No. 120, diámetro de apertura de 125  $\mu\text{m}$ .
- Malla No. 200, diámetro de apertura de 75  $\mu\text{m}$ .

### **Elaboración de probetas y ladrillos**

Las probetas y ladrillos cerámicos se elaboraron utilizando moldes de madera, lodo y arcilla roja (tamizados), y agua. Para los ladrillos además se utilizó estiércol de caballo como material aglutinante (aproximadamente 4 - 5% p/p).

Las medidas de los moldes para la elaboración de las probetas fueron de 15 cm X 3 cm X 1cm (largo, ancho y alto). La pasta se preparó en unos recipientes de plástico utilizando la cantidad de lodo, arcilla roja y estiércol señalados en el diseño experimental y una cantidad de agua que correspondió entre un 30 a un 40% p/p de agua de la masa total. El mezclado de la pasta se hizo con una espátula de metal hasta obtener una consistencia homogénea. Las probetas se desmoldaron un día después.

Para los ladrillos, las medidas fueron estimadas con los valores obtenidos de contracción por cocción de las probetas, teniendo como medidas promedio 20 cm X 6 cm X 4.5 cm (largo, ancho y alto). Además se estimó el agua necesaria para que todos los experimentos tuvieran valores similares de agua de plasticidad en las mezclas (del 30 al 45% aproximadamente).

El lodo y la arcilla roja se mezclaron en un recipiente de plástico de acuerdo a la cantidad especificada para cada experimento señalado por el diseño experimental y se le agregó entre un 4 y un 6% de estiércol de caballo (como material aglutinante). El estiércol de caballo fue agregado eliminando las partículas de mayor tamaño y

utilizando sólo la parte con restos de paja. Mezcladas en seco las materias primas, se agregó agua. El contenido de agua varió de experimento a experimento, oscilando entre un 30 y un 44.5% p/p. El mezclado se realizó mediante una espátula de metal y también con la mano para obtener una mejor homogeneidad.

El vaciado en los moldes se hizo colocando una capa de pasta y presionando con la espátula para después colocar otra capa de lodo y ejercer de nuevo presión. Una vez lleno el molde, con la misma espátula, se eliminó la pasta restante.

### Secado de las probetas y ladrillos cerámicos

Una vez desmoldados las probetas y los ladrillos se procedió a colocarlos bajo el sol durante cinco días para su secado. Con esto se logró una evaporación lenta del agua en las piezas a fin de que, en la cocción, no existiera un desprendimiento brusco de ésta que pudiera fracturar las piezas.

### Cocción de las piezas (probetas y ladrillos)

La cocción de las probetas y ladrillos se realizó en un horno eléctrico con perfil de temperatura programable (Marca Nabertherm, Modelo Program Controller SB) (Figura 3.2).

El perfil de temperatura siguió las etapas descritas en la Tabla 3.4 y Figura 3.2.

Tabla 3.4. Intervalo y tiempos de cocción para las probetas cerámicas (Kingery, 1976).

Fase	Intervalo Temperatura / Hora	Temperatura final, ° C	Observaciones
Desprendimiento de agua higroscópica	80° C / 2.5 horas	200° C	---
Deshidratación- inicio de la reacción	300° C / 2 horas	800° C	Esperar más de una hora al incrementar la temperatura
Aparece fase vítrea	100° C / 1 hora	950-1200	---
Temple	< 150° C / 2 horas	750° C	Evita cuarteaduras
Temple	---	500° C	Aumentar en intervalos cortos descenso de temperatura

La Tabla 3.4 muestra los intervalos de temperatura empleados en la cocción de las probetas. Para los ladrillos (piezas de mayor tamaño), los intervalos fueron similares, solo que en la fase donde aparece la fase vítrea, el tiempo destinado fue de 5 horas.

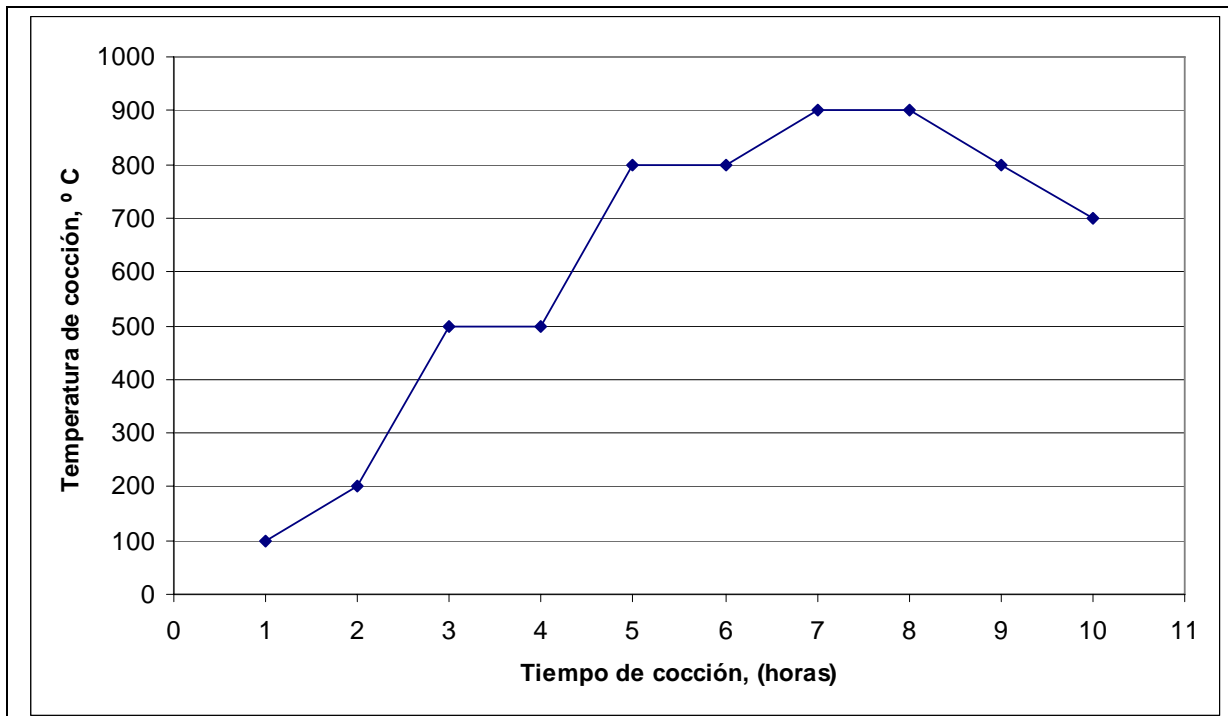


Figura 3.2 Perfil de temperatura desarrollado en la cocción de las probetas y ladrillos cerámicos.

Las probetas se elaboraron con la finalidad de obtener los valores de contracción por cocción que permitieran conocer el tamaño de los ladrillos a elaborar y éstos mantuvieran el tamaño mínimo requerido que establece la prueba de resistencia a la compresión ASTM C126-99 (Ceramic glazed structural clay facing tile, facing brick and solid masonry units).

### 3.2.4 Técnicas analíticas

La caracterización de las probetas y ladrillos cerámicos se llevó a cabo midiendo los parámetros que corresponden a las variables de respuesta del diseño experimental: resistencia a la compresión, porcentaje de absorción de agua, porcentaje de contracción por cocción y densidad.

#### Resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión se realizó siguiendo lo establecido en la norma ASTM-C-126-99 Ceramic Structural Clay Facing Tile, Facing Brick, and Solid Masonry Units. Esta norma aplica para ladrillos y losetas estructurales y otros "sólidos de albañilería" elaborados a partir de arcilla, pizarra, o mezclas con o sin la adición de grog (arcilla refractaria especialmente calcinada y molida para su uso como componente no plástico de una carga refractaria); o de otras mezclas que presentan una consistencia cerámica fundidas por arriba de los 655° C.

El cuerpo de los especímenes debe estar libre de grietas y otras imperfecciones que le puedan dar una menor resistencia. Las caras de los especímenes deben tener una uniformidad libre de virutas e imperfecciones.

El tamaño del cuerpo cerámico debe estar bien especificado como en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Dimensiones de los especímenes (ASTM C126-99).

Dimensiones de las caras		Grosor , mm
Altura, mm	Largo,mm	
60.3	196.9	44.5

Para realizar la prueba de resistencia, ésta no debe ser menor a los valores reportados en la norma ASTM C126-99 (Ceramic glazed structural clay facing tile, facing brick and solid masonry units); los cuales se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Esfuerzos mínimos a soportar para ladrillos (ASTM C126-99).

Dirección de base	Media mínima para cinco pruebas, kg/cm <sup>2</sup>	Mínimo individual, kg/cm <sup>2</sup>
Vertical	210.92	175.76
Horizontal	140.61	105.46

El cuerpo de los especímenes debe estar libre de grietas y otras imperfecciones que le pudiera dar menos resistencia. Las caras de los especímenes deben tener una uniformidad libre de virutas, imperfecciones.

**Prueba de cabeceo**

En un recipiente de forma rectangular metálico, se calentó el azufre (grado industrial) a una temperatura aproximadamente de 150° C, manteniéndolo en forma líquida. Una vez líquido, el azufre se vació en un molde donde después se colocó la pieza a cabecear. El molde contaba con grasa en la base para evitar que se pegara el ladrillo. El espécimen se colocó en forma horizontal teniendo la precaución de no sumergirlo en exceso (aproximadamente 6.35 mm, ¼ de pulgada).

La velocidad de las pruebas se ajustó a los controles de la carga media, comprendiendo los tiempos de no menos de un minuto ni más de dos minutos.

La resistencia a la compresión se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C = \frac{W}{A} \dots\dots\dots(Ec. 3.5)$$

Donde:

- C= resistencia a la compresión de los especímenes, kg/cm<sup>2</sup>.
- W= carga máxima indicada por la prueba en la máquina universal, kgf.
- A= media del área bajo la cual se aplicó la fuerza, cm<sup>2</sup>.

**Porcentaje de absorción de agua**

Para la determinación del porcentaje de absorción de agua, se siguió la metodología descrita en la norma ASTM C20-97 (Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent

Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water).

Los especímenes no deben tener partículas adheridas en su superficie. En primer lugar se determina el peso seco. Esto se realiza colocando los especímenes durante 24 horas a una temperatura de 110° C para después pesarlos.

Una vez pesados se sumergen totalmente, en agua hirviendo durante dos horas y después se dejan durante 12 horas en agua. Con esto se conoce el peso de saturación. El porcentaje de absorción de agua se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{100(P_m - P_s)}{P_s} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

P<sub>m</sub> = peso suspendido del espécimen, gramos

P<sub>s</sub> = peso seco del espécimen, gramos

**Porcentaje de contracción por cocción**

La contracción por cocción se determinó siguiendo la metodología descrita en Vázquez Malagón (2001). Una vez elaborados los especímenes se realizó la marca de encogimiento, trazando una línea recta atravesada por dos líneas perpendiculares (como se puede ver en la figura 3.3).

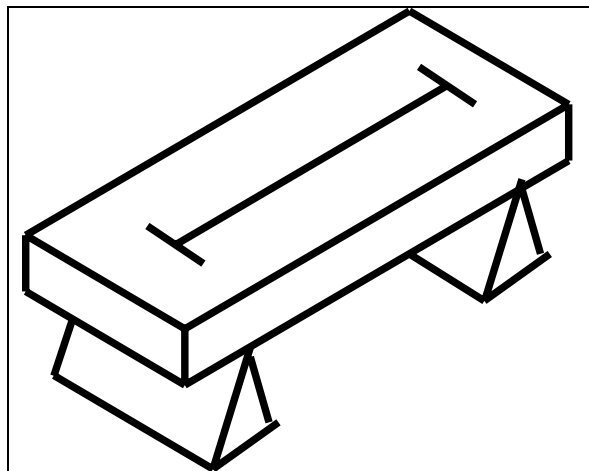


Figura 3.3. Trazado de línea de encogimiento para determinar el porcentaje de contracción por cocción (Vázquez Malagón, 2001).

La longitud inicial fue medida al terminar de elaborar el espécimen y trazar su correspondiente línea de encogimiento. La longitud final se midió después de haber cocido los especímenes. El valor de porcentaje de contracción por cocción se calculó de acuerdo a la ecuación 3.7.



$$\% \text{Contracción} = \frac{100(L_i - L_f)}{L_i} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

$L_i$  = longitud inicial, cm

$L_f$  = longitud final, cm

**Densidad**

La prueba para determinar la densidad de especímenes se llevó a cabo con base en la norma estandarizada ASTM C 20-97 (Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water).

Primero se removieron las partículas adheridas en cada espécimen. Después se mantuvieron a peso constante los especímenes calentándolos a 110° C durante 24 horas para después pesarlos y así obtener el peso seco, Ps.

Se tomaron los especímenes y se colocaron en agua hirviendo durante dos horas estando cubiertos totalmente. Después se mantuvieron por un lapso de 12 horas como mínimo sumergidos en el agua. A continuación se determinó el peso suspendido.

Para determinar el peso suspendido (S) primeramente se colocó un recipiente con agua sobre la balanza y se pesó. En el recipiente con agua se sumergió el espécimen atado con un hilo teniendo el cuidado de que no tocara ni el fondo y las paredes del recipiente y se pesó. El peso del recipiente con el espécimen suspendido menos el peso del recipiente con agua da el peso suspendido del espécimen.

Después de medir el peso suspendido (S), se secó el espécimen solo con un pedazo de algodón para remover las gotas de agua de la superficie. Se pesó y de esta manera se obtuvo el peso saturado (W).

El volumen exterior, V, se calculó sustrayendo el peso suspendido del peso saturado, ambos en gramos:

$$V (\text{cm}^3) = W - S \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.8})$$

El volumen de los poros abiertos y porciones impermeables se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de los poros abiertos } (\text{cm}^3) = W - D \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.9})$$

$$\text{Volumen de la porción impermeable, } (\text{cm}^3) = D - S \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

D = peso seco del espécimen, gramos

La porosidad aparente, P, se expresa como un porcentaje que relaciona el volumen de los poros abiertos en el espécimen y el volumen exterior. Se calculó de la siguiente manera:

$$P(\%) = [(W - D) / V] \times 100 \dots \dots \dots (\text{Ec. 3.11})$$

La absorción de agua, A, se expresó como porcentaje que relaciona el peso del agua absorbida y el peso del espécimen seco; se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$A (\%) = [(W - D) / D] \times 100 \dots \dots \dots (\text{Ec. 3.12})$$

La densidad, B, en gramos por centímetro cúbico es el cociente de el peso seco dividido por el volumen exterior, incluyendo los poros. Se calculó de la siguiente manera:

$$B (\text{g/cm}^3) = D / V \dots \dots \dots (\text{Ec. 3.13})$$

### **3.2.5 Evaluación de la Factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental de la opción de reúso planteada**

Para la evaluación de la Factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental se utilizó la técnica de matriz de interacción causa y efecto de gran valor cualitativo (Rojas León, F. J., 2005). Se establecieron los factores impactados positiva como negativamente y las características adecuadas para evaluar lo más objetivamente posible cada ámbito. Por ejemplo, para la evaluación de la Factibilidad Técnica, los factores impactos fueron en dos sitios (en la PPLB y el sitio de aprovechamiento); y de ahí se plantean las características como son: el grado de adecuación de los lodos y en específico los resultados de las pruebas realizadas para elaborar materiales cerámicos. A continuación se describen las características evaluadas.

#### **Evaluación de la Factibilidad Técnica**

La caracterización del lodo fue útil para establecer las características que pudieran influir en la elaboración de productos cerámicos y la variabilidad de éstas características durante el año. Además, se calculó la producción anual para conocer si ésta cubre la demanda de la materia prima que va a ser sustituida por el lodo.

Con base en lo anterior se estableció si el lodo cumple o no con las características de la materia prima a sustituir. Si no cumple, se estableció el o los procesos para adecuar el lodo a las condiciones necesarias para su valoración como materia prima para elaborar productos cerámicos. Además se analizaron los espacios físicos necesarios para llevar a cabo estos procesos de adecuación.

Se ubicaron los posibles sitios de aprovechamiento y las modificaciones que se tendrían que hacer para incorporar los lodos como materia prima, estimando la cantidad de lodo que pudiera ser aprovechado.

Cabe señalar que las pruebas realizadas en la elaboración de ladrillos cerámicos se realizaron para encontrar las condiciones óptimas en cuanto al proceso de producción y poder implementar el proceso a escalas mayores.

### **Evaluación de la Factibilidad Económica**

La evaluación de la Factibilidad Económica comprende principalmente cinco aspectos que se mencionan a continuación:

- Costos de inversión, en los cuales se incluyen los materiales necesarios para el acondicionamiento y aprovechamiento de los lodos.
- Costos de operación, son los que tienen en cuenta el aprovechamiento y acondicionamiento de los lodos en el proceso de elaboración de materiales cerámicos.
- Costos de transporte, evaluando las distancias de la PPLB hasta los sitios de aprovechamiento.
- Costos totales, la suma de los costos de inversión, operación y transporte.

Por último se hizo el análisis de costos y beneficios por parte del lugar o lugares de aprovechamiento de los lodos.

### **Evaluación de la Factibilidad Social**

Está dividida en tres partes principalmente:

- Los beneficios generados a las comunidades cercanas a la PPLB y al sitio de aprovechamiento
- Aceptación de la actividad por parte de las comunidades cercanas a la PPLB.
- Cambios sobre las actividades económicas de las comunidades cercanas a la PPLB y al sitio de aprovechamiento.

Todo lo anterior se estimó considerando el acondicionamiento para su aprovechamiento de los lodos y la ubicación de los sitios de aprovechamiento.

### **Evaluación de la Factibilidad Ambiental**

La evaluación ambiental realizada fue tanto para las comunidades cercanas a la PPLB y al sitio de aprovechamiento de los siguientes tipos de contaminación:

- Contaminación auditiva
- Contaminación del aire
- Contaminación del agua
- Contaminación del suelo

Se evaluaron los impactos producidos en los cuatro aspectos anteriores tanto del lugar destinado para el acondicionamiento de los lodos cercano a la PPLB, el transporte de los mismos de la PPLB a los sitios de aprovechamiento y las actividades realizadas en los sitios de aprovechamiento. Además se considera la contaminación ambiental provocada por el proceso de cocción de los ladrillos.

**CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este capítulo se presenta en la primera parte los valores de flujos (estimados y determinados) de producción de lodo de la planta potabilizadora “Los Berros” y los resultados de la determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de muestras colectadas en época de lluvias y de estiaje. Además, se realiza una comparación de la producción de lodos reportada de otras plantas potabilizadoras. En la segunda parte se presentan los resultados de las pruebas exploratorias de elaboración de productos de alfarería y de tipo cerámicos a partir de mezclas de lodo-barro y lodo arcilla tipo “ball clay”. También se presentan los resultados de las pruebas de elaboración de probetas y ladrillos con el lodo y la arcilla convencional (basados en un diseño experimental de tipo superficie respuesta). Por último, se presenta la matriz utilizada en la Evaluación de la Factibilidad Técnica, Ambiental, Social y Económica del presente estudio.

**4.1 Estimación de volúmenes de los flujos de los lodos generados.**

La estimación de la producción de lodos se realizó con el fin de conocer la cantidad de lodos generados al año por la PPLB que pueda satisfacer la demanda de lodo, como materia prima, para los sitios de aprovechamiento seleccionados en el presente estudio.

Para estimar el flujo másico de lodos generados se utilizaron la ecuación de Kawamura (Ec. 4.1) y los datos históricos de flujo de agua cruda, dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  suministrada y turbiedad del agua cruda reportados entre mayo 2003 a mayo de 2005) de la planta potabilizadora “Los Berros” (Tabla 4.1).

La fórmula de Kawamura (2000), se presenta a continuación:

$$P_L = (Dc \times fp) + (T \times R_{SST:T}) \dots \dots \dots (Ec.4.1)$$

Donde:

T = turbiedad del agua, UNT

$P_L$  = lodos generados,  $g/m^3$  de agua tratada

Dc = dosis del coagulante, mg/L

fp = lodo producido por el coagulante; varía de acuerdo al coagulante utilizado. Para el  $Al_2(SO_4)_3$ , se calcula como sigue:

$$fp = \frac{2 \times PMAI(OH)_3}{PMAI_2(SO_4)_3} = 0.262484 \dots \dots \dots (Ec. 4.2)$$

$R_{SST:T}$  = relación del valor de Sólidos Suspendidos Totales SST (mg/L) y la turbiedad del agua cruda (UNT). Puede estar comprendido entre 1 y 2; usualmente se utiliza el valor de 1.3.

$$R_{SST:T} = \frac{SST(mg / L)}{T(UNT)} \dots \dots \dots (Ec. 4.3)$$

Tabla 4.1. Datos históricos de flujo y turbiedad del agua cruda y de la dosis de coagulante suministrado en la planta potabilizadora “Los Berros” (mayo 2003 a mayo 2005).

Año	Mes	Flujo de agua cruda (m <sup>3</sup> /s)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Turbiedad Agua cruda U. N. T.
2003	May	17.66	23.97	n/p
	Jun	16.48	32.96	40.89
	Jul	15.95	32.96	34.8
	Ago	16.16	36.82	n/p
	Sep	16.16	36.82	n/p
	Oct	16.56	31.47	18.16
	Nov	16.23	16.75	5.99
	Dic	17.23	17.37	1.41
2004	Ene	15.15	18.5	6.99
	Feb	17.25	19	7.04
	Mar	17.63	20.3	6.6
	Abr	n/p	n/p	n/p
	May	18.42	23.94	7.36
	Jun	17.82	25.62	15.74
	Jul	17.92	27.78	16.93
	Ago	17.77	33.15	17.39
	Sep	16.56	34.69	28.82
	Oct	16.59	31.79	10.27
	Nov	16.51	21.45	2.1
	Dic	17.23	17.37	1.41
2005	Ene	16.8	18.93	1.41
	Feb	17.73	20	1.04
	Mar	18.13	19.08	0.93
	Abr	19.14	17.73	1.14
	May	18.42	17.26	0.92

n/p\*: dato no proporcionado

Los valores de flujo de agua tratada para este intervalo de tiempo presentan una media de 17.14 m<sup>3</sup>/s, con una desviación estándar de 0.9477 y una varianza de 0.8982. Se observa un aumento en los tres últimos meses donde el flujo de agua tratada rebasó los 18 m<sup>3</sup>/s (sólo en mayo de 2004 el flujo estuvo por arriba de los 18 m<sup>3</sup>/s). No se aprecia una diferencia entre los meses de estiaje y de lluvias aunque los valores de la turbiedad aumentan considerablemente en los meses de lluvias (de junio a septiembre).

La Tabla 4.2 presenta los resultados de la estimación de flujos máxicos de lodos generados de mayo de 2003 a mayo de 2005 en la planta potabilizadora “Los Berros”.

Tabla 4.2. Estimación de flujos máxicos de lodos generados en el periodo de mayo de 2003 a mayo de 2005 en la PPLB mediante la ecuación de Kawamura.

Año	Mes	Flujo de lodos, Ton/mes (base seca)	Año	Mes	Flujo de lodos, Ton/mes (base seca)	Año	Mes	Flujo de lodos, Ton/mes (base seca)
2003	Ene	--	2004	Ene	547.52	2005	Ene	296.18
	Feb	--		Feb	590.04		Feb	283.16
	Mar	--		Mar	656.75		Mar	301.90
	Abr	--		Abr	s/d		Abr	304.40
	May	s/d		May	782.06		May	282.52
	Jun	2640.22		Jun	1255.74		Jun	--
	Jul	2302.26		Jul	1406.34		Jul	--
	Ago	s/d		Ago	1490.12		Ago	--
	Sep	s/d		Sep	1999.01		Sep	--
	Oct	1413.49		Oct	964.02		Oct	--
	Nov	512.54		Nov	357.76		Nov	--
	Dic	294.99		Dic	294.99		Dic	--

s/d: sin determinar

Hay una variación significativa entre los resultados de un mes de un determinado año comparado con el mismo mes pero de diferente año, debido a que se verificó una diferencia de hasta un 52% como en el caso de Febrero de 2004 y 2005 y junio de 2003 y 2004. Sólo en los meses de diciembre de 2003 y 2004 se observó una similitud en estos valores. En la Figura 4.1 se presenta la tendencia de los valores calculados teóricamente por la fórmula de Kawamura de los lodos generados en la PPLB.

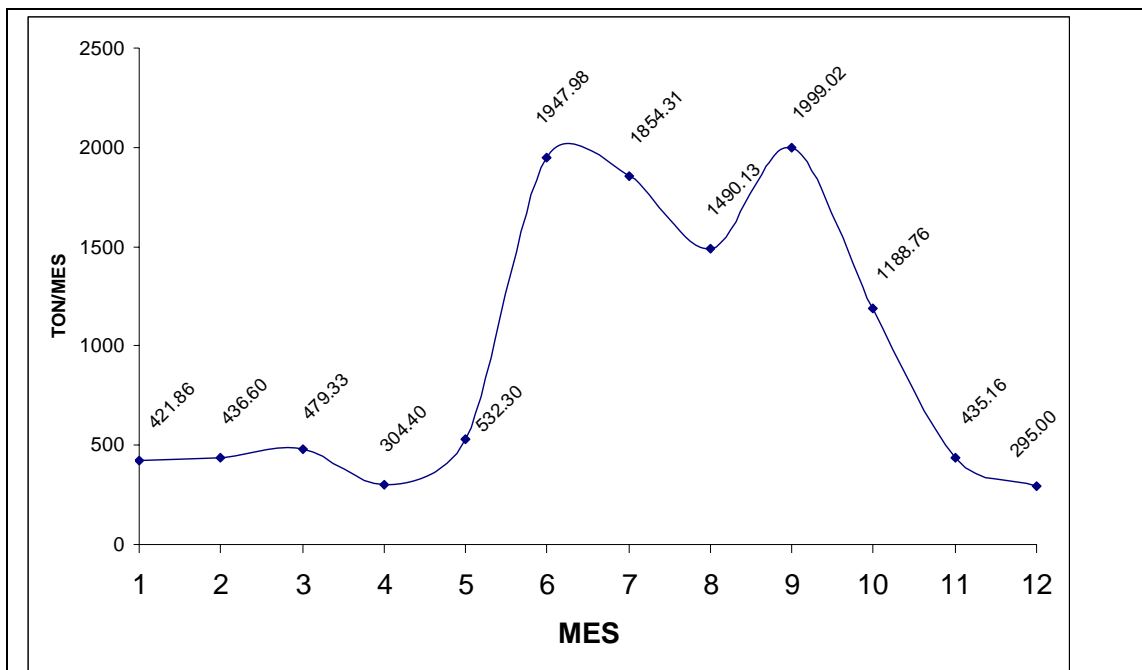


Figura 4.1. Tendencia anual en la generación de lodos en la Planta potabilizadora “Los Berros” (valores calculados teóricamente).

En la Figura 4.1 se aprecia una tendencia a aumentar significativamente la producción de lodos para los meses de junio a octubre, que corresponde a la época de lluvias. Los meses con menor producción de lodos son abril y diciembre que correspondería aproximadamente a un 85% del valor más alto de producción de lodos (mes de septiembre). Considerando un valor promedio, al año se producen 11,384.84 Ton de lodo en base seca.

**Determinación de volumen de lodos depositados y flujo de lodos generados**

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, los cuales son removidos durante la etapa de lavado de estos equipos. La determinación el flujo total másico de lodos generados se realizó mediante un balance de materia en sedimentadores. Partiendo de la expresión general de balance materia (Ec. 4.4) para un reactor a régimen continuo (sin reacción química):

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.4})$$

En términos de las corrientes de entrada y salida de un sedimentador de la PPLB (figura 4.5), la ecuación 4.4 se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Corriente 1} = \text{Corriente 2} + \text{Corriente 3} + \text{Corriente 4} \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.5})$$

$$\text{Influente} = \text{Efluente} + \text{Lodos acumulados} + \text{Lodos succionados por sistema Clarivac}$$

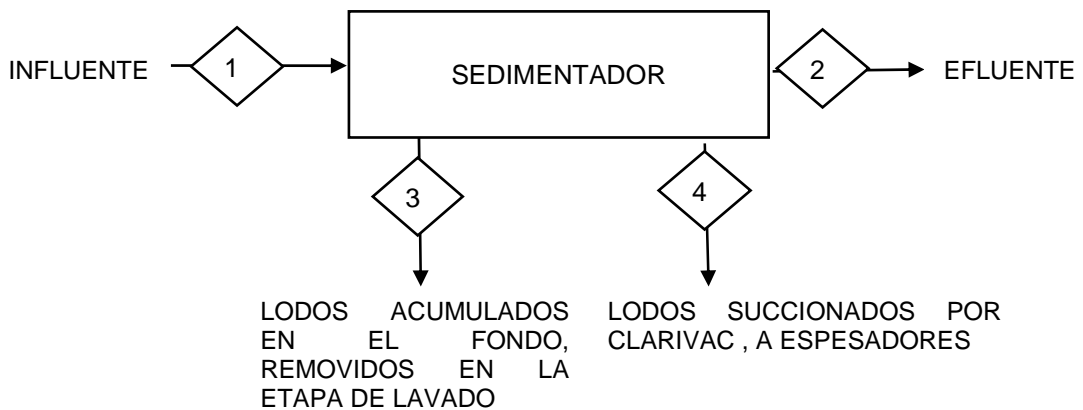


Figura 4.2. Diagrama de bloques utilizado para establecer el balance de materia en un sedimentador de la planta potabilizadora “Los Berros” (PPLB), Sistema Cutzamala.

Incorporando a la Ec. 4.6 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 PPLB), así como el número total de sedimentadores igual a 20, se tiene:

$$MSST SI = MSST SE + MSST LAS + MSST LSS. \dots\dots\dots (Ec. 4.6)$$

Donde:

MSSTSI = Flujo másico de Sólidos Suspendidos Totales del influente de sedimentadores, en kg/mes.

MSSTSE = Flujo másico de Sólidos Suspendidos Totales del efluente de sedimentadores, en kg/mes.

MSSTLAS = Flujo másico de Sólidos Suspendidos Totales de lodos acumulados en sedimentadores, en kg/mes.

MSSTLSS = Flujo másico de Sólidos Suspendidos Totales de lodos succionados por clarivac en sedimentadores, en kg/mes.

Las corrientes 1, 2 y 4 se pueden calcular en la Ec. 4.5, en términos del flujo volumétrico total mensual tratado en la PPLB y el contenido de sólidos totales, de cada una:

$$MSSTSI = QSI (m^3/s) * SSTSI (g/L) * 1000 L/m^3 * kg/1000 g * 86,400 s/día * 30 días/mes = (kg/mes)$$

$$MSSTSE = QSE (m^3/s) * SSTSE (g/L) * 1000 L/m^3 * kg/1000 g * 86,400 s/día * 30 días/mes = (kg/mes)$$

$$MSSTLSS = QLSS (m^3/s) * SSTLSS (g/L) * 1000 L/m^3 * kg/1000 g * 86,400 s/día * 30 días/mes = (kg/mes)$$

Donde:

QSI = Flujo volumétrico del influente de sedimentadores o tratado por la PPLB = 17.24m<sup>3</sup>/s (dato histórico promedio, en época de estiaje, del período de operación 2003-2005, proporcionado por personal de la PPLB).

QLSS = Flujo volumétrico de lodos succionados por clarivac en sedimentadores = 0.0427m<sup>3</sup>/s Clarivac \* 20 clarivacs = 0.854 m<sup>3</sup>/s (dato promedio de tres mediciones realizadas en la PPLB).

QSE = 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) = QSI - QLAS = 17.24 - 0.854 = 16.386 m<sup>3</sup>/s

SSTSI = Sólidos Suspendidos Totales en el influente de sedimentadores = 0.0235 g/L (dato promedio calculado a partir de 24 análisis de muestras diferentes, 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).



SSTSE = Sólidos Suspendidos Totales en el influente de sedimentadores = 0.0055 g/L (dato promedio calculado a partir de 24 análisis de muestras diferentes, 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).

SSTLAS = 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 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. 4.3 y substituyendo los valores correspondientes a cada término se tienen los siguientes resultados (Tabla 4.4). Los resultados de la Tabla 4.4 muestran que, en temporada de estiaje, cerca del 25% del total de lodos generados se remueven en el lavado de sedimentadores, 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%).

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 bajo estudio. Se calcularon los valores promedio medidos (utilizando más del 90% de datos) de 12 muestras de influente, efluente y clarivac. Aplicando las mismas ecuaciones del balance de materia, en términos de SST, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4.5):

Tabla 4.4. Resumen de datos y resultados obtenidos del balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la PPLB (removidos y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de estiaje (junio 2005).

Datos	Clave	Unidad	Valor
FLUJO INFLUENTE	QSI	m <sup>3</sup> /s	17.24
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOT. INFLUENTE	SSTSI	kg/m <sup>3</sup>	0.0235
FLUJO MÁSIKO SÓLIDOS SUSP. TOTALES INFLUENTE	MSSTSI	kg/mes	1,050,122.88
FLUJO EFLUENTE	QSE	m <sup>3</sup> /s	16.386
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOT. EFLUENTE	SSTSE	kg/m <sup>3</sup>	0.0055
FLUJO MÁSIKO SÓLIDOS SUSP. TOTALES EFLUENTE	MSSTSE	kg/mes	233,598.816
FLUJO CLARIVAC	QLSS	m <sup>3</sup> /s	0.854
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOTALES CLARIVAC	SSTLSS	kg/m <sup>3</sup>	0.252
FLUJO MÁSIKO SÓLIDOS SUSP. TOTALES CLARIVAC	SSTLSS	kg/mes	557,819.136
LODOS ACUMULADOS EN SEDIM.	MSSTLAS	kg/mes	258,704.928

Tabla 4.5. Resumen de datos y resultados obtenidos del balance de materia para estimar la generación de lodos en sedimentadores de la planta potabilizadora “Los Berros” (removidos y enviados a espesadores), en términos de sólidos suspendidos totales en época de lluvias (agosto 2005).

Datos	Clave	Unidad	Valor
FLUJO INFLUENTE	QSI	m <sup>3</sup> /s	17.870
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOT. INFLUENTE	SSTSI	kg/m <sup>3</sup>	0.026
FLUJO MÁSICO SÓLIDOS SUSP. TOTALES INFLUENTE	MSSTSI	kg/mes	1,204,295.040
FLUJO EFLUENTE	QSE	m <sup>3</sup> /s	17.016
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOT. EFLUENTE	SSTSE	kg/m <sup>3</sup>	0.007
FLUJO MÁSICO SÓLIDOS SUSP. TOTALES EFLUENTE	MSSTSE	kg/mes	286,685.568
FLUJO CLARIVAC	QLSS	m <sup>3</sup> /s	0.854
CONC. PROM. SOL. SUSP. TOTALES CLARIVAC	SSTLSS	kg/m <sup>3</sup>	0.196
FLUJO MÁSICO SÓLIDOS SUSP. TOTALES CLARIVAC	SSTLSS	kg/mes	433,859.328
LODOS ACUMULADOS EN SEDIM.	MSSTLAS	kg/mes	483,750.144

Los resultados del balance de materia en temporada de lluvia, el porcentaje de lodos generados que se remueve en el lavado de sedimentadores aumenta a 40% del total, mientras que el 36 % es conducido hacia espesadores y un 23% 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, 24.76 y 40.1%, respectivamente, revelan que los sistemas de evacuación de los lodos no están 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.

Con los anteriores datos se obtienen los volúmenes de lodos que se generan por el método de medición de SST que se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Estimación de la producción de lodos en La Planta potabilizadora “Los Berros” mediante la medición de Sólidos Suspendidos Totales.

Época del año	Producción de lodos, (Ton/año)
Estiaje	12,599.266
Lluvia	14,451.087

De los sitios de aprovechamiento estimados, se tienen contempladas 300 ladrilleras con una producción diaria de 6,600 ladrillos. Se estima que cada ladrillo estará compuesto por 26% de lodo, para producir esa cantidad de ladrillos se necesitarán 298 Toneladas diarias de lodo las cuales se extraerán de las tarquinas. Además, si se estima que las tarquinas tienen un volumen de almacenamiento de 97,521.8 m<sup>3</sup>

(151,314.8 Toneladas en base seca), se considera que el lodo será suficiente para 508 días.

Considerando la producción anual promedio estimada en este estudio de 12,811.731 Toneladas al año, se tiene una producción diaria de 35 Toneladas. Luego entonces, con la cantidad almacenada de lodo, se estima que la oferta de este residuo como materia prima en la elaboración de ladrillos será suficiente para un tiempo de 568 días (1.79 años aproximadamente).

**4.1.1 Comparación respecto a producción promedio estimada con la ecuación de Kawamura y datos reportados para otras plantas potabilizadoras.**

En la Tabla 4.7 se presentan los datos de la producción de lodos de la PPLB estimada por la fórmula de Kawamura y por la medición de Sólidos Suspendidos Totales, además de los datos de producción de lodos para otras plantas potabilizadoras.

Tabla 4.7 Comparación de datos de producción de lodos para la PPLB y otras plantas potabilizadoras.

Planta potabilizadora	Estimación Ton/año		Valor reportado, Ton/año	Volumen de agua tratada, m <sup>3</sup> /s	Lodo producido por volumen de agua tratada, Ton/m <sup>3</sup>
	Kawamura	Balance de materia			
Los Berros, Sistema Cutzamala	11,384.84	Estiaje: 12,599.266	---	17.14	1.422x10 <sup>-3</sup>
		Lluvias: 14,451.087			
	Promedio: 12,811.731				
De Sant Joan Despí (Barcelona, España)	---		4,500	6	1.4269x10 <sup>-3</sup>
Planta potabilizadora de Annet-sur-Marne (Francia)	---		1,340	1.505	1.694x10 <sup>-3</sup>

Como se puede apreciar, la cantidades de agua tratada en la PPLB es mayor comparable a las plantas reportadas, sin embargo la cantidad de lodo producido por m<sup>3</sup> de agua tratada es muy similar para la planta de España. En la planta potabilizadora de Annet-sur-Marne (Francia), la producción de lodo por volumen de agua tratada es 16% mayor comparado a la producción de lodo de la PPLB.

## 4.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras colectadas en la época de estiaje y de lluvias en la planta potabilizadora “Los Berros”.

La caracterización fisicoquímica y microbiológica se realizó para determinar las características que pudieran afectar en el proceso cerámico de producción tales como humedad, contenido de materia orgánica, contenido de arcillas, arena, así como para determinar el contenido de metales pesados y de contaminación microbiológica para compararlos a la NOM-004-SEMARNAT-2004. Además, se realizó un análisis de contenido de óxidos y de composición mineralógica para conocer la forma de la presencia de los óxidos y, de esta manera, conocer en que tipo de material se pueden clasificar los lodos (plastificantes, fundentes o refractarios), de acuerdo a la formulación de pastas cerámicas.

A continuación se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica realizados a las muestras de lodo de la PPLB. El muestreo se llevó a cabo en dos épocas del año: estiaje y lluvias, en los espesadores de lodo y en las estructuras de almacenamiento de éstos. En las estructuras de almacenamiento, se colectaron muestras por triplicado a tres alturas para preparar una mezcla compuesta de tres puntos localizados dentro de la estructura de almacenamiento de estos residuos. Los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica se presentan en la Tabla 4.7 (época de estiaje).

Se observa en la composición de la textura, que el contenido de arena comprendió el 56.16 y 46.83 % para los lodos que se generan (sedimentadores y espesadores) y los almacenados respectivamente. Lo anterior podría contribuir a aumentar el contenido de sílice en la matriz cerámica. Sólo el 17.12 % (lodos que se generan) y el 20.20 % (lodos almacenados) corresponde a la arcilla presente. Un estudio de composición mineralógica permitió determinar las fases mineralógicas presentes tanto en la arcilla como en la arena. Es importante destacar el alto contenido de humedad de ambas muestras el cual se tomó en cuenta para la manipulación de los lodos (Tabla 4.7).

Los valores de N-amoniaco, Nitratos y Nitritos demostraron que hay presencia de degradación biológica anaerobia en la tarquina al aumentar los valores de N-amoniaco y disminuir la cantidad de Nitratos, Nitritos; además hubo disminución de Fosfatos. Se nota una disminución del carbono total en un 50% aproximadamente de los lodos generados a los almacenados debido al posible desprendimiento de CO<sub>2</sub>. Cabe señalar que a mayor degradación biológica, habrá menor contenido de materia orgánica.

Tabla 4.7. Valores promedio de las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos generados y almacenados de la PPLB en época de estiaje.

PARÁMETROS	Lodos generados en sedimentadores y espesadores		Lodos almacenados (tarquinas)	
	Promedio	D. E.	Promedio	D. E.
	n=6		n=9	
<b>FISICOQUÍMICOS</b>				
pH (unidades de pH)	7.05	0.23	5.94	2.8
Textura:				
Arena (%)	56.16	5.46	46.83	3.83
Limo (%)	26.72	5.23	32.64	4.50
Arcilla (%)	17.12	2.34	20.20	2.45
Porosidad (%)	28.43	6.09	39.41	6.73
Humedad (%)	95.96	3.17	86.18	2.43
Densidad Real (g/mL)	1.50	0.13	1.80	0.19
N-amoniaco (mg/kg)	195	41.99	250.46	68.44
N-orgánico (mg/kg)	13037.67	2223.19	5194.78	1980.46
Nitratos (mg/kg)	55.85	35.90	32.30	20.07
Nitritos (mg/kg)	3.39	1.64	1.29	0.49
Sulfatos (mg/kg)	3617.20	2974.76	2865.50	1132.59
Fosfatos (mg/kg)	23.38	12.63	5.55	---
Carbono total (%)	10.02	1.48	5.54	0.28
<b>METALES</b>				
Aluminio (mg/kg)	82,336.33	6391.29	88,392.22	5039.32
Hierro (mg/kg)	142.17	31.45	194.33	22.68
Manganeso (mg/kg)	40.58	14.10	17.15	2.20
Calcio (mg/kg)	22.83	13.36	5.81	6.37
Magnesio (mg/kg)	106.18	29.96	177.94	212.47
Potasio (mg/kg)	278.00	63.36	372.89	52.29
Sodio (mg/kg)	314.53	86.26	222.09	42.64
<b>METALES PESADOS</b>				
Cobre (mg/kg)	11.36	2.47	13.94	0.66
Cromo (mg/kg)	< 2	< 2	2.86	0.53
Arsénico (mg/kg)	1.23	0.12	1.30	0.18
Cadmio (mg/kg)	0.21	0.25	0.17	0.07
Mercurio (mg/kg)	0.70	0.08	0.46	0.20
Níquel (mg/kg)	7.71	3.94	10.75	2.13
Plomo (mg/kg)	14.44	7.07	16.06	2.16
Titanio (mg/kg)	< 15		< 15	
Zinc (mg/kg)	108.84	193.79	192.32	267.29
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>				
Coliformes fecales (NMP/g)	28,400.00	45981.52	3,666.67	1802.78
<i>Salmonella sp.</i> (NMP/g)	23.00	0.00	416.67	515.06
Huevos de helminto (HH/2g)	0.60	0.89	3.44	1.01

El alto contenido de aluminio es debido a que el  $Al_2(SO_4)_3$  se adiciona en la PPLB como coagulante; el aluminio precipita en forma de  $Al(OH)_3$ . La cantidad de hierro presente se puede deber a la presencia de trazas de este metal en el coagulante utilizado. Es necesario conocer la fase mineralógica en la cual esta presente el

aluminio para poder determinar su potencial de aprovechamiento en la elaboración de productos cerámicos.

Por el bajo contenido de metales pesados presentes, comparando con los valores de NOM-004-SEMARNAT-2002 (Tabla de límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos, ANEXO I), los lodos procedentes de la PPLB se pueden clasificar como excelentes (con contacto directo durante su manipulación o aplicación). En cuanto al valor de los parámetros microbiológicos Coliformes fecales, Salmonella sp., y Huevos de Helminto y los valores límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002), estos residuos se clasifican en la clase C, excelente o bueno (usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas).

### 4.3 Resultados del análisis de contenido de óxidos y de composición mineralógica

#### 4.3.1 Análisis de contenido de óxidos para los lodos depositados en la PPLB y la arcilla roja utilizada en las pruebas de elaboración de materiales cerámicos

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados del análisis de contenido de óxidos de los lodos procedentes de la PPLB en dos épocas del año (lluvia y estiaje); además se comparan los valores con los lodos deshidratados de potabilizadoras para la elaboración de ladrillos y cemento en Taiwán y con una arcilla típica para elaborar ladrillos convencionales.

Tabla 4.8. Contenido de óxidos de los lodos de la PPLB, de la arcilla proveniente de los campos de cultivo del municipio de San Andrés Chiautla utilizada para elaborar las probetas y ladrillos; y comparación con ceniza de lodo para elaborar ladrillos en este trabajo.

Óxido	Época de estiaje	Época de lluvias	Pan y Tseng (2001) Ceniza de lodo residual para elaboración de ladrillos y cemento en Taiwán	Arcilla roja empleada en el estudio	Arcilla típica para elaborar ladrillos (Avgustinik A. I., 1983)
SiO <sub>2</sub> %	19.58	29.68	49.55	58.26	50-60
TiO <sub>2</sub> %	0.19	0.32	---	0.88	0.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	33.01	32.46	14.00	19.44	20-30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> %	3.34	4.45	7.75	5.769	2.2
MnO %	0.80	0.37	---	0.09	---
MgO %	0.46	0.49	1.73	1.23	6.5
CaO %	0.65	0.54	2.78	2.47	4.68
Na <sub>2</sub> O %	0.26	0.35	0.30	1.75	1.18
K <sub>2</sub> O %	0.23	0.33	1.80	0.94	1.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	0.70	0.52	3.48	0.08	---
P X C %	39.97	30.40	---	9.28	3-5

P X C: Pérdidas por Calcinación

Se observa una diferencia importante entre el contenido de óxidos de los lodos de la PPLB y el estudio de Pan y Tseng (2001). En los primeros existe hasta un 60% menos de sílice y 57% menos de óxido de hierro comparados con los utilizados para elaborar ladrillos y cementos en Taiwán. Lo contrario ocurre con la alúmina al haber hasta un 100% más para los lodos de la PPLB. El contenido de pérdidas por calcinación para los lodos del estudio de Pan y Tseng (2001) es nulo al haber calcinación de los mismos. Cabe destacar que los valores del estudio de Pan y Tseng (2001) son más similares a los reportados para una arcilla típica para elaborar ladrillos.

En la Tabla 4.8 se puede observar que el contenido de  $\text{SiO}_2$  en el lodo procedente de la PPLB está por debajo en un 40% de lo recomendado para una arcilla típica para elaborar ladrillos. El contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en los lodos de la PPLB está dentro de lo recomendado para la arcilla típica. Se nota un exceso de hasta un 1.22 veces más en el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  en los lodos comparado con el establecido para la arcilla típica para elaborar ladrillos.

Los valores de contenido de óxidos entre la arcilla utilizada en este estudio y la arcilla típica varían muy poco. Para la sílice, la arcilla roja está dentro de los valores recomendados, al igual que la alúmina. Sin embargo se nota un exceso de óxido de hierro de hasta 2.6 veces para la arcilla roja comparada con la arcilla típica. Las pérdidas por calcinación ( $P \times C$ ) de la arcilla roja es 1.85 veces el valor recomendado para la arcilla típica para elaborar ladrillos.

#### **4.3.2 Análisis de composición mineralógica de los lodos generados y almacenados en la PPLB y de la arcilla roja empleada en la elaboración de materiales cerámicos**

A continuación, en la Tabla 4.9 se presentan los resultados de los análisis obtenidos por difracción de rayos X realizadas a las muestras de lodos provenientes de la planta potabilizadora “Los Berros”. Los difractogramas obtenidos se presentan en el ANEXO II.

Del análisis de composición mineralógica de los lodos de la PPLB, se observan los tres componentes principales de una pasta cerámica: plastificantes (grupo de la Caolinita); fundentes (Feldespato, Albita y Anortita); y refractarios (Sílice, Cuarzo). Aunque solo se hace el análisis cualitativo de las fases presentes, es de gran utilidad conocer en que forma están presentes los óxidos estimados en la Tabla 4.8. En los difractogramas se notan zonas de picos de poca intensidad y abundantes debido al alto contenido de material amorfo (materia orgánica, que concuerda con los resultados del análisis de contenido de óxidos).

Tabla 4.9. Fases identificadas en el análisis de composición mineralógica de los lodos procedentes de la PPLB.

Fase Identificada	Lodo de espesador	Lodo Almacenado (“Tarquina”)	Arcilla Típica para elaborar ladrillos	Función de cada fase mineralógica en la pasta
Arcilla del grupo de la Caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ )	Presente	Presente	Presente	Plastificante
Plagioclasa de composición intermedia (entre Albita y Anortita)	Presente	Presente	Presente	Fundente
Cristobalita ( $SiO_2$ )	Presente	Presente	Presente	Refractario
Cuarzo ( $SiO_2$ )	Presente	Presente	Presente	Refractario
Material amorfo	Presente	Presente	Presente	---

En la Tabla 4.9 observa que existen presentes minerales del grupo de la Caolinita (dioctaédricos) que pudieran ser cualquiera de los siguientes minerales: Caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), Halloysita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), Nacrita 2M2 ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) o Dikita 2M1 ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) siendo los dos primeros los más comunes en productos de alteración de rocas volcánicas.

Si se estima que los minerales presentes son la Caolinita o la Halloysita, se debe tener presente que estos son minerales arcillosos los cuales, dentro de una pasta cerámica, son componentes que dan plasticidad a la mezcla. En las tres muestras se observa que hay feldespato en forma de Albita y Anortita (Plagioclasa de composición intermedia). Los Feldespatos son materiales que se utilizan en las pastas cerámicas para reducir el punto de fusión por lo que se llaman materiales fundentes.

También se encuentra presente sílice en forma de Cristobalita y de Cuarzo (posiblemente). La Sílice se utiliza en las pastas cerámicas para aumentar el punto de fusión. Por lo que se les denomina materiales refractarios. También se utilizan para evitar deformaciones de los materiales en el proceso de secado.

El análisis de composición mineralógica realizado a la arcilla roja empleada en el estudio identificó las siguientes fases cristalinas: Caolinita 1T  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ , Anortita sódica ordenada,  $(Ca, Na)(Al, Si)_2Si_2O_8$  y Cuarzo,  $SiO_2$ . El difractograma correspondiente se presenta en el ANEXO II.

Como en las pastas cerámicas, la arcilla roja utilizada presenta los tres componentes de una pasta cerámica: los materiales plásticos representados por la Caolinita; los materiales fundentes (Feldespatos en forma de Anortita sódica ordenada); y los



materiales refractarios (presentes en forma de cuarzo). Realizando el análisis cuantitativo de los minerales presentes se tiene la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Contenido de minerales del lodo y de la arcilla roja para elaborar ladrillos cerámicos.

Lodo		Mezcla arcilla/arena	
Mineral	%	Mineral	%
		Snidina	8.355
Anortita	3.02	Anortita Sódica	10.7
Albita	5.56	Albita	11.31
Caolinita	27.76	Caolinita	13.98
Cristobalita Cuarzo	16.53		
		Cuarzo	46.015
Material Amorfo	40.45	Material Amorfo	3.265
Rutilo	0.29	Rutilo	0.65
Óxidos de Hierro	4.48	Óxidos de Hierro	4.215
Óxidos de Magnesio y Manganeso	1.22	Óxidos de Magnesio y Manganeso	1.405
Óxidos de Fósforo	0.70	Óxidos de Fósforo	0.105
TOTAL	100.01	TOTAL	100

En cuanto a los materiales que dan plasticidad (Caolinita), se nota que el lodo comparado con la mezcla arcilla/arena, no varían las cantidades significativamente y si lo hacen los materiales refractarios (cuarzo y cristobalita) siendo hasta 2.78 veces superior para la mezcla arcilla/arena comparado con el lodo. Se nota también una menor cantidad de materiales fundentes (Anortita y Albita) para el lodo: hasta 2.5 veces superior para la mezcla arcilla/arena.

#### 4.4 Resultados obtenido en las pruebas preliminares de elaboración de productos cerámicos

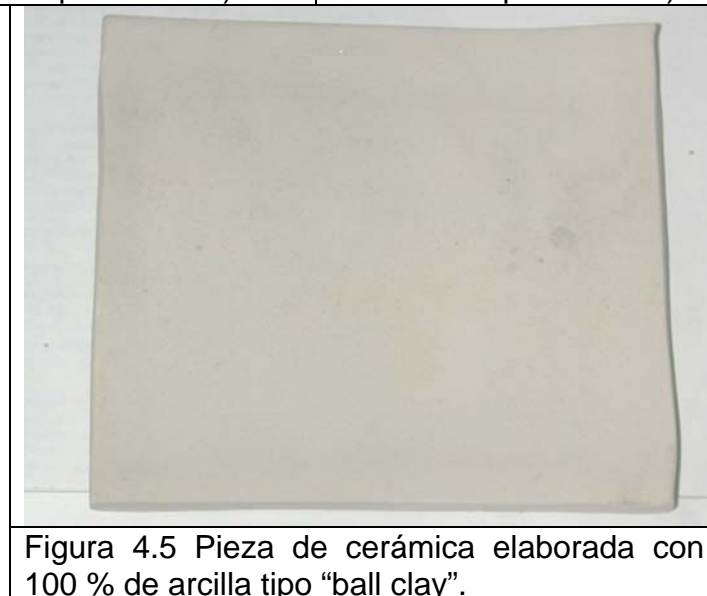
##### 4.4.1 Probetas cerámicas

Para esta etapa del estudio, los mejores resultados de caracterización se obtuvieron con una mezcla con lodo y una arcilla comercial tipo "ball clay" (1:1; p/p), con la cual se fabricaron probetas cerámicas. Las barras fueron caracterizadas midiendo la contracción por secado, porcentaje de absorción de agua y densidad. Los resultados se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Características de las barras cerámicas elaboradas a partir de lodos y arcilla ball clay (Temperatura de cocción de 1,280 ° C).

Prueba	Composición en peso de lodo:arcilla	Contracción por secado (%)	Densidad (g/mL)	Absorción de agua (%)
1	1:4	14	1.03	21.16
2	1:1	14	1.55	29.09
3	0:1 (blanco)	0.5	2.55	0.65

La Tabla 4.10 muestra que los valores de densidad comprenden un 40.7 y un 61% del valor de la densidad del blanco (prueba 3). Debido a esto podrían presentar una resistencia mecánica muy baja. Se pudieron manipular las probetas y observar a simple vista una porosidad significativa que afectó negativamente la resistencia de las probetas. Esta porosidad también se ve reflejada en el alto valor del porcentaje de absorción de agua que fue de hasta 1.75 y 2.41 veces mayor respecto a los valores mínimos recomendados para ladrillos ordinarios que es del 12-15%. La densidad de las probetas elaboradas representó el 60% con respecto al valor de densidad para el blanco utilizado. En las figuras 4.3 a la 4.5 se aprecian las piezas elaboradas con el lodo y la arcilla comercial tipo “ball clay” 1:1 p/p.



En las figuras 4.3 y 4.4 se observan fracturas en las probetas con 75 y 50 % de lodo además de puntos negros que representan los poros y algunas imperfecciones

sobre la superficie a diferencia de la pieza elaborada con 100% de arcilla ball clay la cual presenta su superficie lisa (Figura 4.5).

#### 4.4.2 Esferas para soporte de cultivos hidropónicos

En la elaboración de esferas para soporte de cultivos hidropónicos, las pruebas funcionaron presentando una adecuada plasticidad de la pasta (lodo-arcilla caolinítica 1:1), y un índice de retracción menor al 5% después de la cocción a 900° C. Las esferas presentaron porosidad y una capacidad de absorción de agua cercana a 40%. Este valor está dentro del intervalo recomendado para este tipo de materiales (10-40%).

#### 4.4.3 Productos de Alfarería

Una tercera prueba preliminar consistió en realizar mezclas con el lodo y un barro tradicional de Texcoco, Estado de México (1:1 p/p), para elaborar productos de alfarería tradicional (plato de 15 cm de diámetro superior y una máscara prehispánica plana). El parámetro evaluado de las mezclas fue su plasticidad. La Tabla 4.12 muestra los mejores resultados de las pruebas realizadas para elaborar alfarería tradicional.

Tabla 4.12 Resultados de pruebas de elaboración de piezas de alfarería a partir de lodos y un barro tradicional.

Concepto	Plato 1	Máscara	Plato 2 (testigo)
Composición	1:1	1:1	0:1
1era. Temperatura de cocción, 450° C	✓	✓	✓
2da. Temperatura de cocción, 850° C	✓	✗	✓
Trabajabilidad de la mezcla	✓	✓	✓
Resistencia a la cocción	✓	✗	✓

✓ Acceptable  
 ✗ No Acceptable

Los resultados muestran que la pasta, resultado de la mezcla con el lodo, presentó una trabajabilidad que permitió moldear las piezas manualmente, aunque éstas ya terminadas presentaron algunos poros y fracturas producto del alto contenido de materia orgánica. La máscara elaborada no resistió la segunda temperatura de cocción (850° C) debido quizás al efecto del contenido de arena (en forma de cuarzo), que limitó en gran cantidad la plasticidad de la pieza. Por resistencia a la cocción se debe entender como la capacidad de la pieza de mantener su forma sin que existan fracturas debidas al incremento de temperatura. En las Figuras 4.6 a la 4.8 se observan las piezas elaboradas.



Figura 4.6. Pieza elaborada con 50% de lodo de tarquina y 50% de barro tradicional.



Figura 4.7. Pieza elaborada tradicionalmente por los alfareros de Texcoco.



Figura 4.8. Pieza de mayor tamaño elaborada con 50% de lodo y 50% de barro tradicional.

En la Figura 4.6 (lodo, barro 1:1) se observa una ligera deformación y también presenta porosidad debida al alto contenido de materia orgánica. Esto no se nota en la Figura 4.7, la cual fue elaborada con barro tradicional únicamente. En la Figura 4.8 se observa una máscara prehispánica que no soportó la temperatura de cocción de 850° C al fracturarse como se observa en la parte superior de la pieza.

Una explicación de la fractura de la pieza antes descrita, es de que al no haberse dado una homogenización de la pasta lo suficientemente adecuada como para evitar que los trozos de lodo con una consistencia más dura (posiblemente por la aglomeración de pedazos de rocas), éstos estuvieran en la pasta y, al aumentar la temperatura de cocción, no se sinterizaran completamente provocando fisuras en la pieza.

Estos resultados muestran que los lodos tienen un alto potencial para ser usados en mezclas para elaborar productos cerámicos. Los altos valores de absorción de agua y baja densidad pueden utilizarse para realizar pruebas para elaborar ladrillos tipo porosos. Por tal motivo, se vio la necesidad de realizar pruebas en las cuales las condiciones de elaboración de los materiales cerámicos se realizaran haciendo un acondicionamiento del lodo.

#### 4.5 Resultados obtenidos en las pruebas finales de elaboración de probetas y de ladrillos cerámicos con lodo proveniente de la PPLB y una arcilla convencional

##### 4.5.1 Diseño experimental

En la Tabla 4.13 se observan los resultados obtenidos de la caracterización de los productos cerámicos elaborados, bajo condiciones definidas por el diseño experimental de tipo superficie respuesta planteado. Esta caracterización consistió en medir el porcentaje de contracción por cocción, porcentaje de absorción de agua, densidad y resistencia a la compresión de las piezas cerámicas. Es importante mencionar que los tres primeros parámetros se determinaron a probetas de 15 x 3 x 1 cm y el último (resistencia a la compresión), a ladrillos elaborados bajo las mismas condiciones que las probetas pero de mayor longitud (20x 6 x 4.5 cm) Además, también se incluyen los valores de éstos parámetros para un testigo elaborado con la arcilla roja convencional.

Tabla 4.13. Caracterización de las probetas elaboradas con lodo y la arcilla convencional de acuerdo al diseño experimental de tipo superficie respuesta.

No. Exp.	Factores			Probetas (15x3x1 cm)			Ladrillos (20x6x4.5 cm)
	Composición, (%) (X <sub>1</sub> )	Tamaño grano, (µm) (X <sub>2</sub> )	Temperatura, (°C) (X <sub>3</sub> )	Contracción por cocción, (%)	% Absorción de agua, (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la compresión, (kg/cm <sup>2</sup> )
1	40	500	880	4	34.375	1.150	4.956
2	20	125	1200	16.5	0.225	1.813	0.000
3	40	125	1200	11.5	6.485	1.649	0.000
4	40	500	1200	3	25.95	1.208	133.449
5	30	300	1244.8	18.5	4.61	1.824	0.000
6	20	500	880	10.3	26.2	1.130	7.374
7	40	125	880	7	54.27	0.934	3.211
8	17.2	300	1040	8.5	26.14	1.244	18.132
9	30	300	1040	12.5	24.96	1.160	0.000
10	30	600	1040	4	30.755	1.180	0.000
11	30	300	835.2	5	35.42	1.133	6.789
12	20	125	880	4	35.46	1.135	0.000
13	20	500	1200	4	20.44	1.314	147.606
14	42	300	1040	8	23.45	1.120	0.000
15	30	300	1040	5.5	32.855	1.383	0.000
16	30	75	1040	9.5	30.325	1.191	18.917
***	0	n/r	800-1200	7 a 10	12 a 15	1.6 a 1.9	23.569

n/r = dato no reportado en literatura.

De la Tabla 4.12 puede observarse que varios especímenes de prueba elaborados (experimentos 1, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16) con lodo presentaron aceptables valores de porcentaje de contracción por cocción. Esto es bastante bueno desde el punto de vista técnico pues no se requieren moldes muy grandes en el proceso de elaboración para tener las dimensiones requeridas.

Los valores de porcentaje de absorción de agua fueron entre 1.5 y 3.6 veces superiores respecto al valor del testigo (especimen de prueba preparado con los materiales de ladrillos convencionales). Estos valores son muy grandes si se tiene en cuenta que el porcentaje de humedad absorbida es un parámetro para determinar la calidad de los ladrillos: a menor absorción de agua, mayor durabilidad de los ladrillos. Se atribuye los altos valores de absorción de agua a la porosidad observada en los ladrillos.

Además, estos productos de cerámica tuvieron un valor de densidad menor si se compara con la densidad convencional del ladrillo y bajas resistencias de compresión. Solo los experimentos 4 y 13 tuvieron resistencias a la compresión superiores a la del testigo ensayado.

El lodo y la mezcla de arcilla-arena fueron molidos hasta obtener los tamaños de grano especificados en el diseño experimental para después ser mezclados en las proporciones señaladas en el mismo. Una vez realizadas las mezclas, se procedió a vaciar las pastas en los moldes y puestos a secar a temperatura ambiente aproximadamente 5 días y después cocerlos a las temperaturas señaladas en el diseño experimental.

A las probetas elaboradas se les midieron los siguientes parámetros de respuesta: porcentaje de absorción de agua, contracción por cocción y densidad; y con los ladrillos se midió la resistencia a la compresión.

Se realizó el análisis estadístico para, 1) determinar la validez de los resultados mediante el ANOVA, 2) determinar las variables que influyen significativamente al proceso de elaboración de productos cerámicos (gráfica de Pareto) y, 3) obtener un modelo matemático en función de las variables significativas para cada parámetro o respuesta que permita calcular las condiciones óptimas de las variables.

A continuación se presenta el análisis estadístico realizado para el porcentaje de absorción de agua. El análisis estadístico por separado para el porcentaje de contracción por cocción y la densidad se presentan en el ANEXO III.

En primer lugar se presenta la Tabla de ANOVA para validar los resultados obtenidos en las pruebas. El porcentaje de absorción de agua es un valor indicativo de la durabilidad de los materiales, a menor cantidad de agua absorbida, mayor durabilidad del material en las condiciones ambientales. La Tabla 4.14 presenta el análisis de varianza (ANOVA) de los resultados de porcentaje de absorción de agua para cada probeta elaborado con las mezclas lodo-arcilla/arena.

Tabla 4.14. Tabla de ANOVA para el porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	Valor de P
X <sub>1</sub> = composición del lodo	110.374	1	110.374	4.75	0.0721
X <sub>2</sub> = Tamaño de grano	10.7602	1	10.7602	0.46	0.5216
X <sub>3</sub> = Temperatura de cocción	1656.5	1	1656.5	71.28	0.0002
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	5.95393	1	5.95393	0.26	0.6308
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	16.0745	1	16.0745	0.69	0.4374
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	28.8041	1	28.8041	1.24	0.3082
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	32.3949	1	32.3949	1.39	0.2824
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	591.336	1	591.336	25.45	0.0023
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	84.64	1	84.64	3.64	0.1049
Error total	139.43	6	23.2384		
Total (corr.)	2676.27	15			

$R^2 = 94.79 \%$

Error Estandar de Estudent = 4.82062

Error medio absoluto = .32541

Estadístico Durbin-Watson = 2.22683 (P= 0.1282)

De la Tabla 4.14 se tiene que, los valores de P más bajos (menor a 0.1282) tendrán un efecto significativo a un nivel de confianza del 95%. Los valores de X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> y las interrelaciones de X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> y X<sub>3</sub>X<sub>3</sub> tienen un efecto significativo (Tamaño de grano Temperatura, Tamaño de grano/Temperatura y Temperatura/Temperatura). En la Figura 4.9 se presenta la gráfica de Pareto que indica las variables que afectan significativamente al proceso.

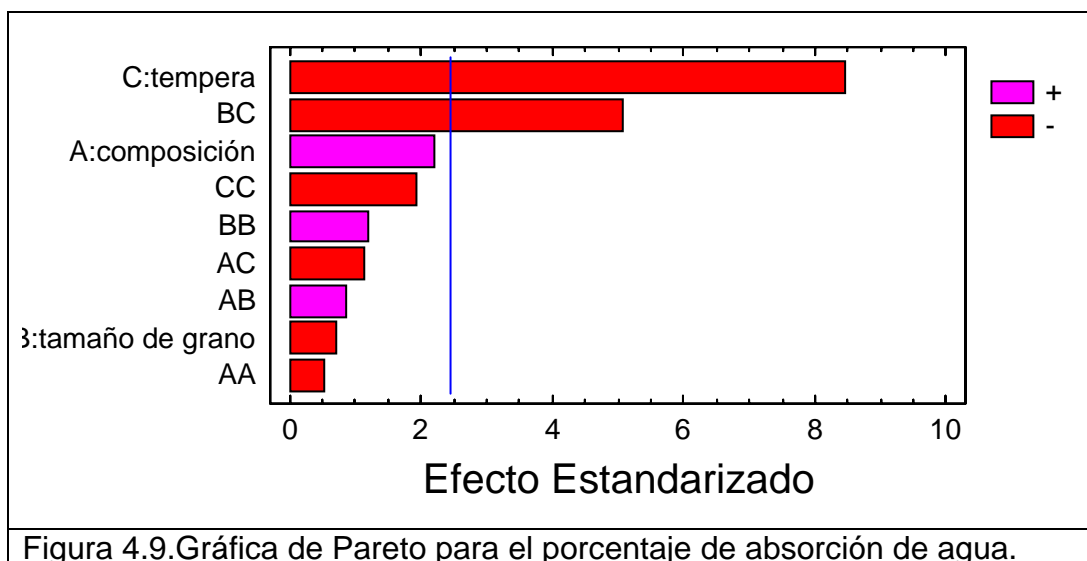


Figura 4.9. Gráfica de Pareto para el porcentaje de absorción de agua.

En la gráfica se observa que la Temperatura y la interacción Tamaño de grano/Temperatura afectan significativamente al valor de porcentaje de absorción de agua.

La  $R^2$ , el coeficiente de correlación al cuadrado, indica la variabilidad de los valores predichos por el modelo matemático y los resultados experimentales. La  $R^2$  del análisis para el porcentaje de absorción de agua es del 94.79%. Esto es que el 94.79% de los valores experimentales son predichos por el modelo. Con base en lo anterior se tiene que el modelo matemático reducido que permitirá estimar las condiciones con las cuales se obtiene el menor porcentaje de absorción de agua se presenta en la Ecuación 4.7.

$$\text{Absorción} = 25.7441 - 12.1002 * X_3 - 8.5975 * X_2 * X_3 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.7})$$

En la Figura 4.10 se presenta el diagrama de Pareto con las variables que afectan significativamente a la absorción de agua de los materiales cerámicos.

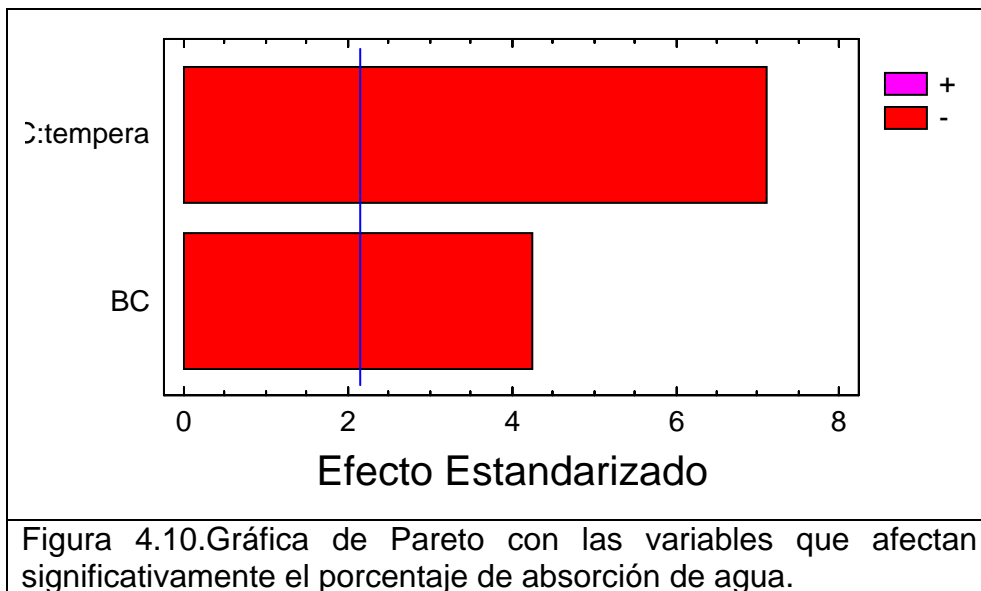


Figura 4.10. Gráfica de Pareto con las variables que afectan significativamente el porcentaje de absorción de agua.

De lo anterior se tiene que los valores de las variables para obtener un valor de absorción de agua del 15% son los que se presentan en la Tabla 4.15 (valores reales y codificados).

Tabla 4.15. Minimización del porcentaje de absorción de agua.

Factor	Óptimo (valor codificado)	Óptimo (valor real)
$X_1$ = Composición del lodo (% p/p)	-0.33648	26.63
$X_2$ = Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	0.100352	323
$X_3$ =Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.828826	1172.6

Con los datos medidos para cada parámetro y utilizando el programa Statgraphics versión 5.1 se realizó el análisis estadístico simultaneo con las tres variables (absorción de agua, contracción por cocción y densidad) para obtener el modelo



matemático que permitió optimizar los parámetros de respuesta. Solamente la resistencia a la compresión no fue analizada siguiendo el diseño factorial debido a que se obtuvieron valores discontinuos (al tener algunos experimentos valores de cero). A continuación se presenta el análisis estadístico de los tres primeros parámetros de respuesta utilizando una optimización múltiple.

En primer lugar se presentan los modelos matemáticos por separado para cada una de las variables analizadas. Los modelos matemáticos que optimizan las respuestas son los siguientes (Tabla 4.16):

Tabla 4.16. Modelos matemáticos que optimizan a cada parámetro de respuesta.

Respuesta	Valor a optimizar	Modelo
Absorción (Y <sub>A</sub> ), %	15	$Y_A = 25.7441 - 12.1002 \cdot X_3 - 8.5975 \cdot X_2 \cdot X_3$
Contracción (Y <sub>B</sub> ), %	10	$Y_B = 8.2375 + 2.19022 \cdot X_2 + 2.3933 \cdot X_3 + 3.0375 \cdot X_2 \cdot X_3$
Densidad (Y <sub>C</sub> ), g/cm <sup>3</sup>	1.6	$Y_C = 1.19682 + 0.223132 \cdot X_3 + 0.143875 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.125411 \cdot X_3^2$

Donde, X<sub>2</sub>= Tamaño grano, (µm) y X<sub>3</sub>= Temperatura, (° C), fueron las variable que afectaron significativamente al proceso. Se descarta el porcentaje de lodo en la pasta (X<sub>1</sub>), al no tener efectos significativos.

Realizando el análisis múltiple se obtiene el modelo matemático que optimiza al proceso. De esta manera se obtienen los datos observados y predichos para cada experimento mediante este modelo matemático (valores codificados). La Tabla 4.17 muestra estos valores predichos y observados.

Tabla 4.17. Valores predichos y observados por el modelo matemático (valores codificados).

No. Exp.	Valores predichos	Valores Observados
1	0.598591	0.508265
2	0.598591	0.563344
3	0.630817	0.602253
4	0.303593	0.344763
5	0.393667	0.0157543
6	0.538201	0.286298
7	0.598591	0.538965
8	0.538201	0.587651
9	0.694894	0.0
10	0.393667	0.648566
11	0.121922	0.0
12	0.121922	0.274358
13	0.598591	0.639863
14	0.581408	0.0
15	0.581408	0.41272
16	0.462655	0.31612

Este procedimiento ayuda a determinar las combinaciones de los factores experimentales el cual optimiza a las variables de respuesta. El valor óptimo del modelo matemático fue: 0.962266. En la Tabla 4.18 se presentan los valores de las variables (codificados y reales), que optimizan al proceso de elaboración de productos cerámicos.

Tabla 4.18. Valores codificados y reales de las variables que optimizan al proceso de elaboración de productos cerámicos.

<b>Factor</b>	<b>Óptimo (valor codificado)</b>	<b>Óptimo (valor real)</b>
X <sub>1</sub> = Composición del lodo (% p/p)	-0.374506	26.25
X <sub>2</sub> = Tamaño de grano (µm)	-0.181271	271
X <sub>3</sub> =Temperatura (° C)	1.17194	1227.5

Con estos valores se obtienen los siguientes valores de respuesta:

<b>Respuesta</b>	<b>Valor óptimo obtenido</b>
Absorción (Y <sub>A</sub> ), %	13.3897
Contracción (Y <sub>B</sub> ), %	10.0
Densidad (Y <sub>C</sub> ), g/cm <sup>3</sup>	1.6

El análisis estadístico (usando el software Statgraphics 5.1) demostró que la variabilidad de los resultados para el porcentaje de contracción por cocción son debido a variaciones de tipo estadísticas (con un nivel de confianza de  $\alpha= 10\%$ ). Aunque se pueden ver que tienen grandes variaciones dentro del intervalo del testigo, los valores de contracción por cocción experimentales en las muestras son comparables en magnitud a la del testigo.

Para la absorción de agua y la densidad, solo la temperatura y el tamaño de grano tienen un efecto significativo (a  $\alpha= 10\%$ ). La interacción y los términos no lineales no se pueden determinar en el nivel observado de la variabilidad estadística. En la Figura 4.9, se ve claramente que la absorción disminuye y la densidad aumenta con el incremento de la temperatura. Esto también se ve para las altas temperaturas, también se observa algo similar para el testigo. Como se observo, la Temperatura de cocción es una variable que afecta considerablemente al proceso, además del tamaño de grano. En la Figura 4.11 se presenta la curva de superficie de respuesta con las dos variables que afectan significativamente al proceso.

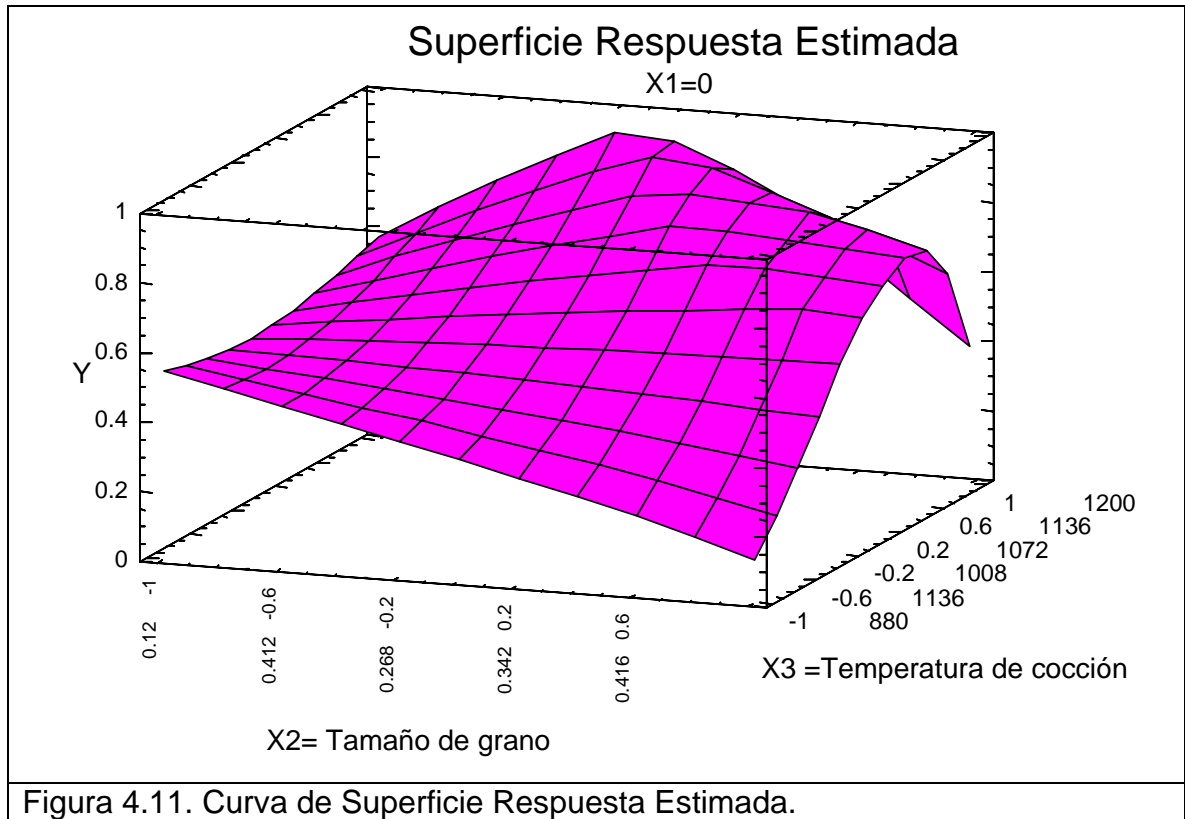


Figura 4.11. Curva de Superficie Respuesta Estimada.

Se observa una correlación entre la contracción por secado y la densidad con respecto a la temperatura de cocción. Se tiene que, a mayor temperatura de quema, mayor densidad y menor valor de absorción de agua como se observa en la Figura 4.12.

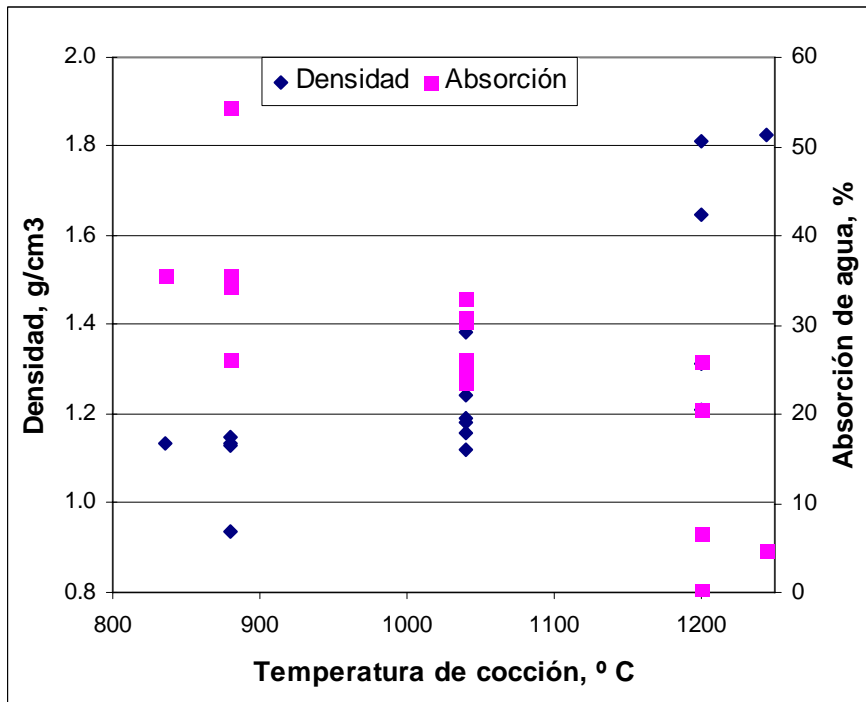


Figura 4.12. Efecto de la Temperatura de quema en la densidad y el porcentaje de absorción de agua para los especímenes realizados de acuerdo al diseño experimental.

Las muestras cocidas a alta temperatura (1200 y 1245° C) se diferencian claramente de las muestras de baja temperatura (835, 880 y 1040° C), y el testigo. Los valores de resistencia a la compresión reflejaron una mediana calidad de los materiales aunque se pueden observar dos especímenes que superaron en casi seis veces el valor de resistencia a la compresión del testigo (experimentos 4 y 13), que corresponden a los especímenes cocidos a la temperatura de 1200° C.

Aunque se obtuvieron aceptables valores de resistencias a la compresión para éstos especímenes, (133.449 y 147.606 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente), con respecto al valor del ladrillo convencional, éstos implicaron una temperatura de cocción muy alta (1200° C). Además se observó que hubo deformación de los especímenes y pérdida de la coloración rojiza como se aprecia en la Figura 4.13.



Figura 4.13 Especímenes que sufrieron deformación al ser quemado a una Temperatura de 1200 ° C.

Alguno especímenes resultaron ser medianamente aceptables ya que, los especímenes con mayor resistencia a la compresión, tuvieron valores que representan el 77 y el 80.2 % aproximadamente del valor reportado para el testigo utilizado (experimentos 8 y 16).

Para el experimento 8, la cantidad de lodo utilizado fue la más baja (17.2 %) con una temperatura de cocción media y un tamaño de partícula mediano (1040° C y 300 µm). El experimento 16 correspondió a una concentración de lodo de un 30% con tamaño de partícula pequeño y una temperatura de cocción media (1040° C y 75 µm).

Por otra parte, el experimento 3, con un tamaño de grano de 125 µm, desprendió importantes cantidades de gas durante la aparición de la fase líquida que se notó al obtenerse una estructura espumosa en la mayor parte de la muestra. La única diferencia con el experimento 2, en el cual hay fundido pero no forma esta estructura porosa, es la cantidad de lodo en la pasta (el experimento 2 contiene la mitad de lodo que el 3).

La mayoría de los especímenes producidos en el nivel más bajo de temperatura (835 y 880° C), no resistieron el acondicionamiento ni la manipulación de estos. Al tacto, se desprendían pedazos del material observando su porosidad y notando un peso

menor al testigo. De lo anterior, se obtuvieron tres clases de materiales que se describen a continuación:

- Los de más baja temperatura (835 y 880° C) que no tienen resistencia mecánica o baja resistencia a la compresión, independientemente de las otras condiciones del proceso.
- Los de 1040° C, la mayoría de las muestras no alcanzaron una significativa resistencia mecánica. Las excepciones son las muestras 8 y 16, las cuales alcanzaron una resistencia que es ligeramente por debajo que la del testigo.
- A 1200° C, apareció una fase líquida importante, la cual se puede atribuir a la presencia de feldspatos en la pasta. Sólo dos muestras demostraron suficiente retención de la forma que fueron las que emplearon el tamaño de grano más grande. Estos alcanzaron notables resistencias manteniendo baja densidad, pero su correspondiente absorción de agua es considerablemente alta.

El tamaño de grano óptimo, elimina la restricción de un preacondicionamiento excesivo del lodo y esto puede resultar en menores costos de fabricación. El factor de la composición no se observa que tenga un efecto significativo. Esto tendrá como consecuencia que una mayor cantidad de lodo se puede incorporar en los productos comerciales sin tener efectos negativos en la calidad. Sin embargo, deben interpretarse estos resultados con precaución ya que hay un efecto importante de la temperatura. Este efecto es muy evidente en la resistencia a la compresión, la cual fue determinada por lo valores medios obtenidos en la prueba de compresión.

Entre 1040 y 1200° C, ocurre una fusión parcial. Debajo de este punto de fusión, se producen los ladrillos rojos clásicos y esta propiedad muestra dependencia del tamaño de grano y composición. Arriba de ésta temperatura, se obtiene un producto más fuerte que probablemente no satisface las aplicaciones convencionales de la construcción en la apariencia, pero puede tener aplicaciones tecnológicas interesantes.

A bajas temperaturas (835 y 880° C), la sinterización ocurre pero es insuficiente como para dar una fuerza significativa a los materiales. A 1040° C, la sinterización es insuficiente, con excepción de los con bajo contenido de lodo o a finos tamaños de grano (lo cual es poco deseable desde el punto de vista de la valoración pues el objetivo es utilizar la mayor cantidad de lodo posible). Aparentemente se incrementa el área superficial del lodo fino permitiendo que se de una cinética de reacción rápida que resulta en una sinterización más extensa y de ésta manera en productos más fuertes.

Por arriba del punto de fusión (parcial), la cinética de sinterización es normalmente más rápida porque predomina la difusión líquida. También, los efectos de la tensión superficial causan la aparición de poros en el material que son llenados con el líquido, los cuales unen la estructura en la solidificación. Sin embargo, la baja densidad de los productos parece contradecir esta afirmación. Para explicar este punto con más detalle, se necesita una investigación adicional.

De la formación de espuma en la muestra 3, probablemente sea emitida agua presente en la Caolinita en ésta reacción con los otros componentes. Se atribuye a

la emisión de vapor como la explicación más probable de la baja densidad de los materiales cerámicos de alta temperatura del presente estudio.

A baja temperatura, se necesita un tamaño de grano pequeño para aumentar la cinética de la reacción. A alta temperatura, un pequeño tamaño de grano tendrá el mismo efecto sobre la cinética, pero la cinética tendrá un efecto diferente sobre el producto final. Para el tamaño de grano más pequeño, se observó la formación de espuma (experimento 3).

Cuando ocurre la fusión parcial, llega a ser un problema la retención de la forma. Es bien sabido que el hecho que la cantidad de líquido formado durante la sinterización determina la habilidad de la retención de la forma, también en este intervalo, se necesita una investigación más a fondo para determinar la temperatura de fusión y la cantidad de líquido formado como una función de la composición (diagrama de fases). También la emisión de gas, más probable como agua, debe ser estudiada a futuro como el fenómeno de control de la densidad de los cerámicos.

Estos productos obtenidos en este intervalo de temperatura no parecen ser atractivos en la actividad de la construcción convencional. Sin embargo, su resistencia es casi seis veces mayor que la del testigo, la cual corresponde a un ladrillo comercial con una baja densidad. Una densidad baja generalmente corresponde a una baja conductividad térmica. La combinación de éstas propiedades puede hacer al producto atractivo para ciertas aplicaciones especiales, donde la resistencia, peso o aislamiento térmico sean importantes.

Aunque se mencionaron párrafos arriba las variables que afectaron significativamente al proceso, considerando los siguientes parámetros de respuesta: porcentaje de absorción de agua, porcentaje de contracción por cocción y densidad; a continuación se realiza el análisis estadístico para la resistencia a la compresión.

### **Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es la fuerza por unidad de área que puede soportar un material sin que éste se fracture. La función principal del ladrillo es soportar esfuerzos de compresión en las construcciones. El análisis completo de la resistencia a la compresión no se puede llevar a cabo mediante el diseño factorial. Por otra parte, la mayoría de los especímenes producidos en el nivel más bajo de temperatura, no resistieron el acondicionamiento. Este problema de no tener valores en estos experimentos, se solucionó asignando valores de resistencia a la compresión de cero.

Por otra parte, los especímenes de alta temperatura tienden a fundirse y muestran una distorsión tal que solo a algunos especímenes pueden obtener las dimensiones necesarias para realizar la prueba.

Como es generalmente para el caso de materiales cerámicos, la resistencia a la compresión demuestra tener una dispersión amplia incluso para los especímenes preparados bajo condiciones similares (réplicas). Esto es debido al hecho de que la fuerza de los materiales frágiles sea determinada no solo por su composición y microestructura, sino también por la presencia de defectos internos que llegan a ser

mayores al aumentar el tamaño de los especímenes pues es mayor la probabilidad de encontrar un defecto interno. (Anderson, 2005).

Como una consecuencia, la resistencia muestra una distribución estadística (Distribución estadística de Weibull) la cual caracteriza la distribución de defectos en el producto así como su fuerza. Los dos parámetros acumulativos de la distribución de Weibull están dados por la ecuación 4.8:

$$F(\sigma; \sigma_0, m) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.8})$$

El parámetro  $\sigma_0$  corresponde al porcentaje de 63% de la distribución de la resistencia a la compresión, por ejemplo, 63% de los especímenes del lote de la muestra fallarán a fuerzas por debajo de  $\sigma_0$ . El parámetro de Weibull  $m$  caracteriza la anchura de la distribución, valores altos de  $m$  indican dispersiones más pequeñas, lo cual significa que la probabilidad de que un espécimen falle a fuerzas por debajo de  $\sigma_0$  es pequeña, mientras que a valores pequeños de  $m$  indican lo opuesto, significa que el producto es menos confiable desde el punto de vista estructural. En la Tabla 4.19 se presenta el análisis estadístico de los valores de la resistencia a la compresión mediante la distribución de Weibull.

Tabla 4.19. Análisis estadístico de los valores de resistencia a la compresión de los cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla mediante la distribución de Weibull.

No. Exp.	Factores			Resistencia a la compresión, (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia de Weibull (Kg/cm <sup>2</sup> )	Parámetro de Weibull
	Composición, (%) (X <sub>1</sub> )	Tamaño grano, (µm) (X <sub>2</sub> )	Temperatura, (°C) (X <sub>3</sub> )			
1	40	500	880	5.3	5.6	2.3
2	20	125	1200	Distorsión		
3	40	125	1200	Distorsión		
4	40	500	1200	134.1	134.2	8.3
5	30	300	1244.8	Distorsión		
6	20	500	880	15.7	10.5	0.7
7	40	125	880	3.4	3.4	2.6
8	17.2	300	1040	21.0	21.4	1.7
9	30	300	1040	No resistió		
10	30	600	1040	No resistió		
11	30	300	835.2	7.9	8.0	1.5
12	20	125	880	No resistió		
13	20	500	1200	148.1	146.3	10.0
14	42	300	1040	No resistió		
15	30	300	1040	No resistió		
16	30	75	1040	22.9	23.8	1.2
***	0	n/r	800-1200	25.1	26.2	2.7

\*\*\*: Testigo (ladrillo convencional).

De la Tabla 4.19 se observan resistencias a la compresión muy por debajo del valor de resistencia para el ladrillo convencional (testigo). Esta baja resistencia se observa en los experimentos 1, 6, 7, y 11, que también corresponden a parámetros de Weibull bajos (2.3, 0.7, 2.6 y 1.5 respectivamente). Estos experimentos presentan la menor confiabilidad en cuanto a la resistencia mecánica.

Los experimentos 8 y 16 obtuvieron valores de resistencia a la compresión similares a los encontrados para el testigo y sus correspondientes parámetros de Weibull son relativamente parecidos aunque para el experimento 16, el parámetro de Weibull es casi el 45% del valor de éste parámetro con respecto al del testigo.

Los experimentos 4 y 13 presentaron los mayores valores de resistencia a la compresión (casi seis veces el valor del testigo) y hasta casi cuatro veces el valor del parámetro de Weibull. Esto indica mayor confiabilidad en los materiales ensayados aunque los especímenes fueron de menor tamaño que los demás por el problema de la distorsión de los ladrillos.

#### 4.5.2 Pruebas adicionales

El objetivo de las pruebas finales fue el de, por un lado utilizar la mayor cantidad de lodo pero, por otro, realizar un tratamiento a éste que no implicara una alza en los costos que pudiera afectar la viabilidad de utilizar estos residuos. Si bien no se cumplió del todo con éste objetivo, en unas pruebas adicionales se evaluó el efecto de la calcinación del lodo al utilizarlo en la elaboración de materiales cerámicos.

Para evaluar dicho efecto en una mezcla que contuviera la mayor cantidad de lodo, del diseño experimental se eligió el experimento 1 que tiene como factores, mayor cantidad de lodo (40% p/p); un tamaño de partícula que no implica un procesamiento excesivo y considera menores costos de elaboración (500 µm) y una temperatura de 1100° C (temperatura media de cocción). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Resultados obtenidos en la elaboración materiales cerámicos con lodo calcinado a 1000° C y la comparación con un testigo y un material elaborado con lodo sin calcinar.

Ladrillo	Contracción por cocción, (%)	Absorción de agua, (%)	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Resistencia a la compresión, kg/cm <sup>2</sup>
A	6.98	28.03	1.12	2.5681
B	3.65	21.89	1.35	17.5395
C	4.76	16.86	1.48	26.6404

A: 40 % de lodo sin calcinar

B: 40% de lodo calcinado a 1000° C





C: 0% de lodo (testigo)

De la Tabla 4.20, se observa una mejora en la calidad del material cerámico elaborado con lodo calcinado a 1000° C. El valor de resistencia la compresión para éste material fue hasta casi siete veces el valor correspondiente del material con



lodo sin calcinar y representó el 65.83% del valor de resistencia a la compresión del testigo.

Se observó una menor contracción por cocción que fue aún menor que la del testigo. La absorción de agua disminuyó en un 22% a la del ladrillo elaborado con lodo sin calcinar. El valor de la densidad se mantuvo entre el valor del testigo y del ladrillo elaborado con lodo sin calcinar. En las Figuras 4.14 a la 4.17 se aprecia el aspecto de estos tres materiales elaborados.

	
<p>Figura 4.14. Ladrillo A (40% lodo sin calcinar).</p>	<p>Figura 4.15. Ladrillo B (40% lodo calcinado).</p>
	
<p>Figura 4.16. Ladrillo C (0% lodo).</p>	<p>Figura 4.17. Aspecto en la coloración de los materiales elaborados (de abajo hacia arriba: ladrillo A, ladrillo B y ladrillo C).</p>

De las Figuras anteriores se nota que el ladrillo B tiene coloración menos rojiza que la del ladrillo A y C (testigo); además se observa menor porosidad en el ladrillo B que en el ladrillo A. Si bien hubo presencia de fase líquida, pues al momento de sacar los ladrillos del horno, éstos estaban adheridos, no existió una deformación que pudiera alterar las condiciones de los materiales como se aprecia en las figuras.

Cabe señalar que al realizar el cabeceo de estos materiales, de nuevo el ladrillo elaborado con 40% de lodo sin calcinar, presentó deficiencias al desprenderse la capa de azufre no observando esto en el ladrillo con lodo calcinado y el testigo.

#### 4.6 Evaluación de la Factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental de la opción de reúso planteada

Para realizar la Evaluación de la Factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental, se hizo uso de la técnica de matriz de interacción (Matriz de Leopold). Se

hizo la elección de esta técnica por ser una herramienta que permite identificar los impactos positivos y negativos, además de considerar su magnitud e importancia y permite ser un resumen de la información proporcionada por la evaluación. En el ANEXO III se describe ésta técnica.

**4.6.1 Evaluación de la Factibilidad Técnica**

En esta parte del trabajo se presenta la evaluación de la Factibilidad Técnica de la opción de reúso planteada con las condiciones óptimas encontradas mediante el análisis de las pruebas finales y se hace la evaluación técnica de las pruebas preliminares (elaboración de ladrillos y alfarería). A las condiciones óptimas de elaboración de ladrillos, se le asignó una calificación que cuantificó los impactos positivos y negativos de acuerdo a la calidad de los productos elaborados, cantidad de lodo a utilizar, nivel de tratamiento de las materias primas, etc.

De la caracterización del lodo, se observó que el lodo presenta las condiciones para ser empleado para sustituir a las materias primas convencionales para la elaboración de ladrillos cerámicos. Además, la variación a lo largo del año de éstas características, no es lo suficientemente significativa para alterar el proceso de elaboración de ladrillos cerámicos.

Para evaluar las características del lodo, en las condiciones óptimas de utilización, y poder compararlas con la materia prima convencional, se hizo una comparación de la pasta que se asemejó más a la arcilla convencional y ésta recibió un valor mayor en la evaluación de acuerdo a lo siguiente:

- 1, muy baja;**
  - 2, baja;**
  - 3, media;**
  - 4, alta;**
  - 5, muy alta**
- + = Impacto positivo o benéfico (mayor parecido a la materia prima convencional)**

La calificación mayor se le dio a la pasta con mayor contenido de lodo y mejores características en cuanto a contenido de minerales.

Tabla 4.21 Calificación correspondiente a la calidad de las pastas manejadas en la elaboración de ladrillos cerámicos a partir de lodo y arcilla roja/arena.

<b>Calificación</b>	<b>Calidad de Pasta (composición del lodo, % p/p)</b>
1, muy baja	42.5
2, baja;	17.2
3, media	40
4, alta	20
5, muy alta	30

La temperatura de cocción y el tamaño de grano se evaluaron de la misma manera, teniendo las calificaciones mayores para las menores temperaturas de cocción y mayores tamaños de grano; las calificaciones menores para las mayores temperaturas de cocción y menores tamaños de grano empleados (por requerir un pretratamiento más detallado) como se ve en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Calificación correspondiente a la temperatura de cocción y tamaño de grano empleados en la elaboración de ladrillos cerámicos a partir de lodo y arcilla roja/arena.

Calificación	Temperatura de cocción (° C)	Tamaño de grano (µm)
1, muy baja	1245	75
2, baja	1200	125
3, media	1040	300
4, alta	880	500
5, muy alta	835	600

De acuerdo a los resultados de las pruebas realizadas para elaborar ladrillos a base de lodo y materia prima, se obtuvieron tres clases de ladrillos (de baja, mediana y alta temperatura de cocción). Mediante la optimización del proceso se obtuvo los siguientes valores de las variables de respuesta:

$X_1$ = Composición del lodo (% p/p): 26.25

$X_2$ = Tamaño de grano (µm): 271

$X_3$ =Temperatura (° C): 1227.5

Con los valores anteriores se obtuvo la siguiente calificación: 2.5 (de mediana a baja factibilidad), dándole el mismo peso a los tres valores (1/3).

El acondicionamiento sugiere las siguientes etapas:

- Secado de los lodos.
- Molienda.

Para el secado de lodos se planteó el siguiente escenario: retirar el lodo de las estructuras de almacenamiento (tarquinas) y colocarlo en los campos adyacentes a éstas en un área que permita la evaporación del agua más rápidamente hasta obtener una humedad con la cual se pueda realizar su transporte y manipulación (molienda). Se contempla un área de 400 m<sup>2</sup> para extender los lodos para su secado en un lapso no mayor a una semana para que se tenga la producción que cubra la demanda por parte de los sitios de aprovechamiento la cual sería de 300 Toneladas de lodo diariamente, que corresponde al 3.83 % del total disponible en las estructuras de almacenamiento.

Si se contempla que las tarquinas cuentan con un volumen de lodo de 32,788.64 toneladas (base seca), en 110 días aproximadamente se terminaría el lodo de las mismas (sin tener en cuenta los lodos generados día a día).

Si bien no se contempla realizar el secado con algún equipo especial que pudiera acelerar el proceso, las condiciones ambientales de la zona permiten que el secado se pueda dar de tal forma que no disminuya la cantidad de lodo.

Para el transporte de los lodos secos, se propuso utilizar camiones de tipo volteo con caja de capacidad de 14 m<sup>3</sup>. Para el transporte diario de las 300 Toneladas de lodo se necesitarían 22 camiones que llevarían el lodo hasta los sitios de aprovechamiento.

Los sitios de aprovechamiento en los cuales se haría uso de lodo como materia prima para elaborar ladrillos serían los comprendidos como se ve a continuación:

PPLB – TOLUCA, EDOMEX 56 Km.

PPLB – HUIXQUILUCAN, EDOMEX 97 Km.

PPLB – NAUCALPAN DE JUAREZ, EDOMEX 157.1 Km.

PPLB – TEXCOCO Y CHICOLOAPAN, EDOMEX 153.07 Km, (15 Y 80 LADRILLERAS RESPECTIVAMENTE).

PPLB – IXTAPALUCA, EDOMEX 152.4 Km (400 LADRILLERAS).

#### **4.6.2 Evaluación de la Factibilidad Económica**

Para poder realizar la evaluación económica sobre la utilización de lodos, considerando las condiciones óptimas para elaborar ladrillos, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

En la estimación económica se tomaron en cuenta las siguientes premisas: se consideró la cantidad de lodo utilizada (ton/día), para calcular los costos de adquisición de maquinaria que cubra esa cantidad de lodo a manejar (considerando un tipo de cambio de 11.13 pesos/dólar) para así estimar los costos de inversión, considerando la depreciación de la maquinaria y camiones a adquirir.

Además, se consideraron las horas trabajadas al día, los días al año a trabajar y el combustible necesario para que la maquinaria y los camiones puedan realizar su trabajo y, de ésta manera, estimar los costos por la extracción y secado de los lodos por día (costos de operación), a la vez consideraron los costos de transporte de los lodos hasta los sitios de aprovechamiento estimados. Al final se realiza el análisis de costo beneficio de ésta opción planteada.

#### **Costos de inversión**

Para poder estimar los costos de inversión se tomaron en cuenta las actividades necesarias para el acondicionamiento de los lodos que consistió en el secado de los lodos hasta una humedad del 5 al 10% de agua. Como esta operación no implica el uso de tecnología de secado, los costos se minimizan al utilizar las condiciones ambientales únicamente.

Sin embargo se debe considerar el dragado de las tarquinas y disponer de los lodos de la forma en que se utilice la mayor área de exposición al sol. Para esto se propuso el uso de una excavadora hidráulica que coloque los lodos en el sitio de

secado. Si se considera que la PPLB no cuenta con esta maquinaria y que debe ser adquirida, el primer costo de inversión sería la compra de dicho equipo.

La excavadora hidráulica seleccionada presenta las siguientes características:

Marca: Caterpillar  
Modelo de motor: Motor Cat 3064 T  
Peso: 14.782 Ton  
Tanque combustible: 400 L  
Potencia neta 138 hp / 103 kW  
Precio: \$ 657,298.40  
Vida útil: 8 años

Para estimar el costo de la maquinaria por año, considerando el precio y la vida útil, se realizó considerando que la depreciación es constante con el tiempo. Por lo tanto, al año se deberán pagar: \$82,162.30.

#### Costos de transporte

Para realizar el transporte de los lodos, se consideran que la PPLB adquirirá camiones que transporten lodos hasta los sitios de aprovechamiento. Para realizar la estimación de costos se considerará la adquisición de cinco camiones tipo volteo de 14m<sup>3</sup> de capacidad, así como el consumo de combustible y el pago de peaje de las carreteras utilizadas para llegar a los sitios descritos anteriormente.

Un camión de volteo tiene un precio de US\$ 27,500. Luego, si se adquieren cinco camiones darían un total de: US\$ 137,000.00 (en moneda nacional: \$1,531,035.00). Con un tiempo de vida útil de 8 años y considerando una depreciación constante en el tiempo, se tendrá que al año la depreciación será de: \$ 191,379.375.

Entonces, los costos de inversión al año, serán los costos por la adquisición de la maquinaria y de los camiones que transportarán los lodos: \$ 82,162.30 + \$191,379.375, dan un total de \$273,541.68

Luego, por día se tendrá un costo estimado de: \$ 749.43/día.

#### Costos de operación

Se estimarán calculando los costos de operación de la maquinaria involucrada (combustibles) y de los camiones que transportarán los lodos (combustibles y peaje).

Para la excavadora hidráulica, con la potencia neta y con el poder calorífico del combustible:

Poder calorífico diesel: 9.98 kW/h  
Combustible gastado por hora: 10.32 L/h  
Si se tiene una jornada de trabajo diaria de 5 horas: 51.61 L/día  
Si el litro de diesel es de \$ 5.68, por consumo de combustible: \$293.20 por día.

Para calcular los costos de operación por concepto de transporte de lodos hasta los sitios de aprovechamiento seleccionados se tiene la Tabla 4.23 en la que se observa la distancia recorrida y el costo por peaje.

Tabla 4.23. Distancia recorrida de la PPLB hasta los sitios de aprovechamiento, así como el costo de peaje.

Sitio de aprovechamiento	Distancia (km)	Costo por peaje (\$)
Toluca	87	0
Huixquilucan	128	0
Naucalpan de Juárez	188	451
Texcoco y Chicoloapan	184	634
Ixtapaluca	183	400
<b>Total</b>		<b>1,485</b>

Si se considera un consumo de combustible de 13.84 kilómetros por litro, y con los datos de la Tabla 4.23, además considerando que el precio del litro de diesel es de \$5.68, y de que la distancia recorrida es doble (ida y vuelta); se tienen los costos por consumo de combustible de los camiones (Tabla 4.24).

Tabla 4.24 Costos por consumo de combustible en el transporte de los lodos de la PPLB hasta los sitios de aprovechamiento.

Sitio de aprovechamiento	de	Distancia recorrida, dos viajes (km)	Cantidad de combustible consumido (L)	Costo por combustible (\$)
Toluca		87	15.72	90
Huixquilucan		128	23.2	132
Naucalpan de Juárez		188	34	194
Texcoco y Chicoloapan		184	33.3	190
Ixtapaluca		183	33	187
		<b>Total</b>		<b>793</b>

Si se suman los costos de peaje más los costos de combustible:

$$\text{Costos de peaje} + \text{Costos de combustible} = \$1,485 + \$793 + \$293.20 = \$2,571.2 / \text{día}$$

Los costos totales por día serán los costos por inversión más los costos de operación como sigue:

El costo de inversión: \$749.43/día.  
 Costo de operación: \$ 2,571.2/día  
**Total: \$ 3,320.63/día**

Para hacer el cálculo del costo de la tonelada de lodo se consideran 298 Toneladas diarias utilizadas con un costo al día de \$3,320.63. Por Tonelada de lodo se tendrá lo siguiente:

Toneladas al día: 298  
 Costo al día: \$3,320.63  
 Costo por Tonelada: \$ 11.14 por Tonelada de lodo.

Luego, considerando que los lodos tienen un peso volumétrico de 1.5 Ton/m<sup>3</sup>, y que la capacidad de los camiones volteo es de 14 m<sup>3</sup> de capacidad, cada camión tendrá un costo de \$ 233.94 (por viaje). Con esa capacidad, cada camión tendrá que dar tres viajes al día.

Por último se hizo el análisis de costos y beneficios por parte del lugar o lugares de aprovechamiento de los lodos.

En la zona ladrillera de Texcoco, los camiones que transportan la arcilla y la arena son de 7 m<sup>3</sup> de capacidad y tienen un costo de \$250.00 cada uno. Dos camiones serían 14 m<sup>3</sup> de material y tendrían un costo de \$500.00. Así es que dos camiones de arcilla y dos camiones de arena tendrían un costo de \$1,000.00. Con esta cantidad (36 Toneladas de material), se elaboraran 18,000 ladrillos (según datos proporcionados por los trabajadores de la ladrillera visitada).

La elaboración de 18,000 ladrillos empleando tan solo los materiales convencionales tiene un costo de \$1,000.00

Para esa cantidad de ladrillos, con un porcentaje del 27 % de lodo por ladrillo, se necesitarían 10 Toneladas de lodo que tendrían un costo de \$111.40. De arcilla se dejarían de utilizar 10 Toneladas que costarían \$277.77.

Entonces la elaboración de 18,000 ladrillos empleando los materiales convencionales y 27% de lodo tendría un costo de \$956.142 (un 4.38% menos que utilizando tan solo los materiales convencionales).

Para calificar el aspecto económico se tienen los siguientes indicadores tomados arbitrariamente para ayudar a estimar los impactos negativos y/o positivos.

<b>Calificación</b>	<b>Costo con respecto a los materiales convencionales</b>
1, muy baja	10 % más caro
2, baja;	Igual
3, media	5 % menos caro
4, alta	10 % menos caro
5, muy alta	15 % menos caro

Por lo tanto, al haberse estimado que la producción de ladrillos utilizando 27 % de lodo es 4.38% menos que cuando se utilizan solo materiales convencionales, la calificación es de 2 (aceptable).

#### 4.6.3 Evaluación de la Factibilidad Social

En el aspecto social, la utilización de lodo como materia prima para elaborar ladrillos tendría impactos positivos importantes ya que la PPLB se encuentra situada en una zona rural donde los posibles escurrimientos de lodo hacia las fuentes de agua locales se minimizarían al estar aprovechando los lodos. Aunque la cantidad utilizada de lodo no es tal que permitiría dejar de almacenarlos, ésta cantidad se vería reducida llegando a ser de poca significancia como fuente de contaminación de los cuerpos de agua y del suelo.

Además, se valoraría el esfuerzo por parte de la PPLB para mitigar los impactos negativos que se producen de esta disposición de los lodos.

Siguiendo la misma metodología para asignar un valor de calificación para la matriz de evaluación, se estima que la acción por parte de la PPLB para utilizar los lodos en una actividad económica de la región podría tener buena aceptación por parte de las comunidades aledañas a la planta.

En cuanto a los sitios de aprovechamiento, esta actividad tiene por sí misma problemas de aceptación por parte de las comunidades situadas cerca de las ladrilleras por las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Si se considera que los lodos son residuos no peligrosos con posible uso en contacto directo, existe una posibilidad importante de ser aceptados por los ladrilleros en la manufactura de sus productos.

La aceptación de los ladrillos elaborados con lodo por parte de los usuarios tendría que ver más con la parte técnica y no con la parte que considera a estos lodos como residuos (no peligrosos). Además si se pudiera reducir el costo de los ladrillos sin disminuir la calidad de los mismos, la aceptación en la industria de la construcción sería mejor.

No se debe de olvidar la posibilidad de una futura investigación que pudiera crear un material de características tecnológicas tales que pudiera ser aprovechado en la industria y en la propia construcción. Para valorar el aspecto social, se propusieron las siguientes calificaciones:

<b>Calificación</b>	<b>En la PPLB</b>	<b>En los sitios de aprovechamiento</b>	<b>En los posibles consumidores</b>
1, muy baja	Mucha problemática	Afecta considerablemente el proceso	No cumple con los requerimientos
2, baja;	Mediana problemática	Afecta poco al proceso	Medianamente cumple con los requerimientos



3, media	Problemática	Afecta al proceso	Cumple con los requerimientos
4, alta	Poca problemática	Poco afecta al proceso	Mejor que lo requerido
5, muy alta	Sin problemática	No afecta al proceso	Mucho mejor que lo requerido

Con lo anterior se tienen las siguientes calificaciones para evaluar el aspecto social:

Sitio	Calificación
En la PPLB	4
En los sitios de aprovechamiento	5
En los sitios de posible consumo	2

#### 4.6.4 Evaluación de la Factibilidad Ambiental

En la evaluación de la factibilidad ambiental se deben tener en cuenta dos escenarios: la PPLB y el o los sitios de aprovechamiento. En primer lugar se consideraron los impactos ambientales realizados en la PPLB por la acción de coleccionar, acondicionar y transportar los lodos hasta el sitio de aprovechamiento. Se consideraron cuatro tipos de contaminación: auditiva, atmosférica, en el agua y en el suelo.

#### Planta potabilizadora “Los Berros”

##### Contaminación Auditiva

En la PPLB se tendría una fuente de contaminación auditiva: la maquinaria utilizada al sacar los lodos de las tarquinas para su secado y el llenado de los camiones volteos con lodo con maquinaria pesada.

La PPLB se encuentra localizada en una zona donde atraviesa la carretera federal que comunica a Toluca y a Valle de Bravo. Conduce una cantidad poco significativa de vehículos aunque el tránsito de transporte de carga es importante. Considerando que un camión de carga pesada produce 90 dB y que el valor límite máximo permisible para un vehículo de aproximadamente 10 Toneladas es de 92 dB (NOM-080-SEMARNAT-1994) se considera un impacto de poca magnitud por esta acción, aunado que la PPLB se encuentra retirada de alguna comunidad, el impacto del ruido es poco significativo.

##### Contaminación del aire

La contaminación del aire implica la emisión de partículas suspendidas por la acción de manipular los lodos y del transporte de los mismos hasta el sitio de aprovechamiento. Los lodos con una humedad del 5 al 10% disminuirían las emisiones de partículas suspendidas en su manejo y transporte descartando con esto una contaminación atmosférica significativa.

Considerando que el transporte de los lodos hasta los sitios de aprovechamiento sería mediante camiones que tienen motores diesel (combustible más contaminante que la gasolina: 20 a 30 microgramos de partículas por kilómetro recorrido cuando se usa diesel por 5 microgramos de partículas que cuando se usa gasolina). Si se van a utilizar 22 camiones al día, se considera una fuente de emisión de las llamadas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , además de ozono, monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno, y bióxido de azufre; siendo contaminantes que impactan directamente el sistema respiratorio, causando varias afectaciones a la salud (muerte prematura, cáncer, bronquitis crónica, exacerbación del asma, tos crónica y otros problemas respiratorios y cambios en la función pulmonar y envejecimiento prematuro de los pulmones).

### **Contaminación del agua**

Cerca de la PPLB se encuentra localizado el río “El Salitre” el cual pudiera sufrir contaminación por la acumulación de los lodos en las tarquinas por posibles problemas de infiltración hacia el río.

Con la caracterización realizada a los lodos, los principales contaminantes que pudieran llegar al río son de tipo microbiológico (huevos de helminto, *Salmonella sp.*, coniformes fecales, etc.) sin embargo, si se considera que el origen de estos contaminantes son las presas abastecen de agua cruda a la Planta (Tuxpan y el bosque del Estado de Michoacán; Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo del Estado de México), y que estas presas son abastecidas por influentes del Sistema Cutzamala (ríos), se tendría un impacto negativo poco significativo si se considera que el río en sí contiene contaminación microbiológica de origen antropogénica.

Un contaminante, externo o antropogénico, para los ríos sería la producida por la concentración de aluminio contenido en los lodos (que es alta 82.336 g/kg de lodo). El aluminio puede llegar a ser perjudicial para la vida acuática. Por ejemplo se podría dar mortandad en los peces (AWWA, 1991).

Las concentraciones de nitrógeno orgánico (13.03 g/kg) y sulfatos (3.617 g/kg) en el lodo, podrían acarrear problemas de eutrofización al río “El Salitre”.

Por lo anterior, a mayor cantidad aprovechada de lodo, el efecto por la contaminación en río “El Salitre”, será menor. Para aprovechar todo el lodo depositado en las tarquinas se necesitarían 110 días. Luego, considerando que la producción anual de lodos es de 13,525.176 Ton, se tendrían al día una producción de 371.3 Ton. Considerando los sitios de aprovechamiento con una capacidad de asimilación de 300 Toneladas al día, quedarían 71.3 Toneladas de lodo que se tendrían que almacenar. Por lo que se considera que el impacto al río “El Salitre” sería persistente aunque de poca significancia.

### **Contaminación del suelo**

Aunque los lodos no están considerados como residuos peligrosos, contienen cierta cantidad de contaminantes que pudieran afectar al suelo. La contaminación es de tipo microbiológica y de aluminio principalmente. La cantidad de metales pesados

que pudieran escurrir hacia los mantos acuíferos de la región es relativamente baja ya que el agua que alimenta a la PPLB no es de tipo industrial. Además, debido a su contenido de metales pesados se tiene que considerar que los lodos se consideran como excelentes (con contacto directo durante su manipulación o aplicación) y, en cuanto al valor de los parámetros microbiológicos Coliformes fecales, *Salmonella sp.*, y Huevos de Helminto, se pueden clasificar como clase C, excelente o bueno (usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas), de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Por lo tanto, el impacto de reutilizar una cantidad de 101.211 Toneladas por día de los lodos, es de poca magnitud ya que los lodos pueden ser usados para actividades forestales.

Por lo tanto los indicadores para calificar el aspecto ambiental en la PPLB son los siguientes:

Calificación	Aire	Agua	Suelo	Ruido
1, muy baja	Muy alta/muy persistente	Muy alta/muy persistente	Muy alta/muy persistente	Muy alta/muy persistente
2, baja;	Alta/ persistente	Alta/ persistente	Alta/ persistente	Alta/ persistente
3, media	Media/persistente	Media/persistente	Media/persistente	Media/persistente
4, alta	Poca/ medianamente persistente	Poca/ medianamente persistente	Poca/ medianamente persistente	Poca/ medianamente persistente
5, muy alta	Muy poca/ poco persistente	Muy poca/ poco persistente	Muy poca/ poco persistente	Muy poca/ poco persistente

De esta manera, la acción de aprovechar los lodos para elaborar ladrillos impactara al ambiente como se ve:

Aspecto	Calificación
Aire	5
Agua	4
Suelo	5
Ruido	5

### Sitios de aprovechamiento

La industria del ladrillo está directamente relacionada con la industria de la construcción. A pesar del tiempo transcurrido, esta industria no ha sido modernizada en su proceso de operación y continua contaminando con las emisiones de humo a la atmósfera sin ninguna regulación apropiada por parte de las autoridades. La industria de los ladrillos, es una actividad que se asocia a los sectores más pobres de las comunidades en un esquema de economía informal y que su desarrollo está en función de la demanda de los centros de población cercanos.

En las ladrilleras de Toluca, Huixquilucan, Naucalpan de Juárez, Texcoco e Ixtapaluca, se utilizan como combustible de los hornos aserrín y madera aunque los ladrilleros no admiten que aún utilizan llantas, aceites gastados y otros residuos para la cocción de los ladrillos (plásticos, etc.). Sólo en estos municipios se encuentran

localizadas 500 hornos que originan al año más de dos mil toneladas de contaminantes, principalmente partículas suspendidas.

Sin bien la quema de combustibles crea problemas de contaminación atmosférica, en la Tabla 4.25 se presentan los tipos de contaminantes emitidos según las etapas del proceso de elaboración de ladrillos, ya que no todas las operaciones de fabricación de ladrillos producen contaminación y algunos residuos pueden ser reutilizados.

Tabla 4.25. Tipo de contaminantes emitidos según la etapa del proceso de fabricación de ladrillos.

<b>Etapas</b>	<b>Actividades que generan contaminantes</b>	<b>Tipo de contaminantes</b>
Extracción de arcilla	Extracción con herramientas manuales	Escasas partículas en suspensión
Mezclado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamizado y selección</li> <li>• Mezcla de arcillas con agua y arena</li> </ul>	Partículas en suspensión
Moldeado	No generan contaminantes	Ninguno
Secado	Durante el secado de los moldes al aire libre solo se desprende vapor de agua, el cual es en principio inocuo para la salud. Los moldes defectuosos son reciclados a la etapa de moldeado	No representativo
Carga del horno	No genera contaminantes	Ninguno
cocción	Uso de combustibles en la cocción de ladrillos: llantas, aceites usados, aserrín de madera, madera, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partículas en suspensión</li> <li>• Dióxido de azufre</li> <li>• Dióxido de nitrógeno</li> <li>• Compuestos orgánicos volátiles</li> </ul>
Clasificación	Descarte de ladrillos rotos, fisurados, mal cocidos	Residuos sólidos inertes
Transporte	Descarte de ladrillos rotos	Residuos sólidos inertes

La utilización de lodo, como parte de la mezcla con arcilla para elaborar ladrillos, no cambiaría significativamente los contaminantes emitidos. La extracción sería de forma diferente a la convencional ya que se dejaría de extraer una cantidad considerable de arcilla de la zona (campos de cultivo, etc.) y por ende, los impactos por esta actividad serían menores.

Al utilizar menos arcilla de la zona el deterioro del paisaje, la deforestación y la erosión serían menores. Por esto se considera que la utilización de lodo como parte sustituta de la mezcla para elaborar ladrillos tiene impactos positivos sobre el medio ambiente cercano al o los lugares de aprovechamiento.

Por otra parte, se considera que la emisión de contaminantes a la atmósfera por la cocción de los ladrillos elaborados con lodo, no afectará de manera significativa la cantidad y concentración de algún contaminante en específico no habiendo impactos negativos a considerar en esta etapa.

Para valorar ambientalmente la acción de aprovechar los lodos para elaborar ladrillos, en los sitios de aprovechamiento (ladrilleras), se tiene lo siguiente:

<b>Calificación</b>	<b>Contaminantes emitidos</b>
1, muy baja	Aumentan considerablemente
2, baja;	Aumentan poco
3, media	Aumentan
4, alta	Aumentan poco
5, muy alta	No aumentan

Como los lodos no son considerados peligrosos y al ser calcinados no emiten contaminación alguna, se considera que la emisión de contaminantes al utilizar los lodos no aumenta (calificación: 5).

Con respecto al porcentaje de lodo utilizado en la pasta para elaborar ladrillos, se considera importante la cantidad de arcilla que se dejaría de extraer. La cantidad de lodo utilizado afectara en mayor o en menor medida el deterioro del sitio por la extracción de arcilla (paisaje, erosión, deforestación, etc.). Por lo tanto se consideran los siguientes parámetros de calificación:

<b>Calificación</b>	<b>Porcentaje de lodo utilizado/ Deterioro del sitio</b>
1, muy baja	17.2% / mucho deterioro
2, baja;	20% / mediano deterioro
3, media	30% / deterioro
4, alta	40% / poco deterioro
5, muy alta	42.5% / muy poco deterioro

Con los resultados obtenidos en las pruebas de elaboración de ladrillos se obtuvo una concentración de lodo de 28 %. Este porcentaje de utilización de lodo tendrá entonces la calificación de 3.

A continuación se presenta la matriz de la Evaluación de la factibilidad Técnica, Económica, Social y Ambiental de la acción de utilizar los lodos para elaborar ladrillos utilizando el lodo sin acondicionamiento (Tabla 4.26).

Tabla 4.26. Matriz de Evaluación Técnica, Económica, Social y Ambiental de la utilización de los lodos generados en la PPLB para elaborar productos cerámicos con lodo sin acondicionamiento (pruebas preliminares).

VALORACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPLORATORIAS PARA ELABORAR PRODUCTOS CERÁMICOS														
MATRIZ DE EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL		Acondicionamiento de lodos (PPLB)			de Transporte de lodos		de Elaboración de ladrillos en el sitio de aprovechamiento (ladrilleras)				Venta final			
Escala: M/I M= Magnitud; I=Importancia; n/a=no aplica		Acondicionamiento del sitio de secado de lodos	Dragado de Tarquinas	Secado de lodos	Acción de llenado de camiones volteo	Transporte de lodos hasta sitio de aprovechamiento	Preparación de material en el sitio de aprovechamiento	Elaboración de ladrillos	Cocción de ladrillos	Descarte de ladrillos fracturados o mal cocidos	Venta de ladrillos	Impactos Positivos (+)	Impactos Negativos (-)	
+ = Impacto positivo o benéfico														1, muy baja; 2, baja; 3, media; 4, alta; 5, muy alta
- = Impacto negativo o adverso														1, muy poca; 2,poca; 3 regular; 4, alta; 5, muy alta
Se generaron <b>67</b> impactos benéficos o positivos y <b>75</b> adversos o negativos. La valoración de los lodos es ambiental y socialmente medianamente viable y tiene poca viabilidad técnica y mediana viabilidad económica.														
<b>TÉCNICA</b>	CANTIDAD DE LODO UTILIZADO	+2/3	n/a	+1/3	+1/3	+2/3	-4/4	-4/4	- 3 / 2	-4/4	n/a	4	4	
	ACONDICIONAMIENTO DE LODOS	-1/2	-1/2	-2/3	n/a	n/a	-3/3	-4/4	-4/4	n/a	n/a	0	6	
	CONDICIONES DEL PROCESO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	-4/4	-4/4	n/a	-4/4	n/a	0	3	
<b>ECONÓMICA</b>	COSTO	+3/1	-2/3	-3/4	-3/4	-4/5	-1/3	- 3 / 2	n/a	- 3 / 2	+1/3	2	7	
<b>SOCIAL</b>	EN LA PPLB	-1/2	+4/3	+4/3	+4/3	-3/4	n/a	+5/2	n/a	n/a	n/a	4	2	
	EN EL SITIO DE APROVECHAMIENTO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	- 3 / 2	- 3 / 2	- 3 / 2	- 3 / 2	n/a	0	4	
	EN LOS SITIOS DE CONSUMO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	- 3 / 2	0	1	
<b>AMBIENTAL</b>	AIRE	n/a	n/a	n/a	-1/3	-1/3	n/a	-2/3	n/a	n/a	n/a	0	3	
	AGUA	n/a	+3/3	+3/3	+3/3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	3	0	
	SUELO	n/a	+3/3	+3/3	n/a	n/a	-2/4	-2/4	n/a	-1/1	n/a	2	3	
	RUIDO	n/a	-1/1	n/a	-2/2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0	2	
	PAISAJE	n/a	+4/3	-2/2	n/a	n/a	-2/4	n/a	n/a	n/a	n/a	1	2	
											<b>16</b>	<b>37</b>		

Magnitud	Impacto Positivo (+)	2	13	1	7	2	11	13	0	0	2	<b>51</b>	
	Impacto Negativo (-)	6	4	3	6	8	5	1	3	2	1	<b>39</b>	
											<b>Impactos Totales</b>	<b>67</b>	<b>76</b>

---

De la matriz de evaluación (Tabla 4.23) se observa que la factibilidad técnica es medianamente aceptable ya que los valores de resistencia a la compresión no fueron aceptables comparados con el testigo, además de que la cantidad utilizada de lodo por cada ladrillo, es tan solo del 28% con un tamaño de partícula de 380  $\mu\text{m}$  y una temperatura de cocción de 1128° C.

Sin embargo, los resultados de la viabilidad ambiental hacen a esta opción factible ya que se observan impactos benéficos tanto para la PPLB, como para el sitio de aprovechamiento aunque la cantidad utilizada de lodo no sea tan alta como se esperaba (40 %).

Económicamente, al utilizar el 27% de lodo, en la matriz cerámica para elaborar ladrillos, disminuyen los costos en un 4.38%, por concepto de materia prima, comparado con el proceso tradicional que solo utiliza arena y arcilla roja.

Con esta evaluación se encontraron 75 impactos positivos y 63 impactos negativos siendo más factible ambiental y socialmente la acción pues se resolverían problemas de tipo ambiental localizados en la PPLB y en los sitios de aprovechamiento. Las pruebas finales permitieron aumentar la factibilidad técnica con respecto a las pruebas exploratorias como se ve en la siguiente Tabla de evaluación (Tabla 4.27).

Tabla 4.27. Matriz de Evaluación Técnica, Económica, Social y Ambiental de la utilización de los lodos generados en la PPLB para elaborar productos cerámicos con lodo acondicionado (pruebas finales).

VALORACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PPLB PARA ELABORAR PRODUCTOS CERÁMICOS													
MATRIZ DE EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL		Acondicionamiento de lodos (PPLB)			de Transporte de lodos		de Elaboración de ladrillos en el sitio de aprovechamiento (ladrilleras)			Venta final			
Escala: M/I Magnitud; n/a=no aplica		Acondicionamiento del sitio de secado de lodos	Dragado de Tarquinas	Secado de lodos	Acción de llenado de camiones volteo	Transporte de lodos hasta sitio de aprovechamiento	Preparación de material en el sitio de aprovechamiento	Elaboración de ladrillos	Cocción de ladrillos	Descarte de ladrillos fracturados o mal cocidos	Venta de ladrillos	Impactos Positivos (+)	Impactos Negativos (-)
M= Importancia;													
+ = Impacto positivo o benéfico												1, muy baja; 2, baja; 3, media; 4, alta; 5, muy alta	
- = Impacto negativo o adverso		1, muy poca; 2, poca; 3 regular; 4, alta; 5, muy alta											
Se generaron 75 impactos benéficos o positivos y 63 adversos o negativos. La valoración de los lodos es ambiental y socialmente viable aunque tiene mediana viabilidad técnica y poca viabilidad económica.													
TÉCNICA	CANTIDAD DE LODO UTILIZADO	+2/3	n/a	+1/3	+1/3	+2/3	n/a	n/a	- 3 / 2	n/a	n/a	4	1
	ACONDICIONAMIENTO DE LODOS	-1/2	-1/2	-2/3	n/a	n/a	-3/3	n/a	n/a	n/a	n/a	0	4
	CONDICIONES DEL PROCESO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	-1/3	-1/3	n/a	-1/2	n/a	0	3
ECONÓMICA	COSTO	-1/1	-2/3	-3/4	-3/4	+2/5	+2/3	n/a	n/a	n/a	+1/3	3	4
SOCIAL	EN LA PPLB	-1/2	+4/3	+4/3	+4/3	-3/4	n/a	+5/2	n/a	n/a	n/a	4	2
	EN EL SITIO DE APROVECHAMIENTO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	+3/3	+3/3	n/a	n/a	n/a	2	0
	EN LOS SITIOS DE CONSUMO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	+2/3	1	0
AMBIENTAL	AIRE	n/a	n/a	-1/3	-1/3	-1/3	n/a	-2/3	n/a	n/a	n/a	0	4
	AGUA	n/a	+3/3	+3/3	+3/3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	3	0
	SUELO	-1/1	+3/3	+3/3	n/a	n/a	+4/4	+4/4	n/a	-1/1	n/a	4	2
	RUIDO	-1/1	-1/1	n/a	-2/2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0	3
	PAISAJE	-1/1	+4/3	-2/2	n/a	n/a	+4/4	+4/4	n/a	n/a	n/a	3	2
											24	25	

Magnitud	Impacto Positivo (+)	2	13	1	7	2	11	13	0	0	2	51
	Impacto Negativo (-)	6	4	3	6	8	5	1	3	2	1	39
Impactos Totales											75	64



Como se puede observar en la Tabla 4.27, los impactos negativos son mayores que los impactos positivos para la evaluación de las pruebas exploratorias de elaboración de productos cerámicos y de alfarería realizadas en este estudio. La parte de la evaluación Técnica presenta una cantidad considerable de impactos negativos pues, al no obtener productos cerámicos de buena calidad, se espera una factibilidad menor aunque el no realizar un acondicionamiento de los lodos amerita impactos positivos en cuanto a costos de producción.

Aunque se utilizaron proporciones mayores de lodo en la pasta (50%) comparando con las condiciones óptimas resultados de las pruebas finales (27%), se observaron mayores defectos en los productos de las pruebas exploratorias. La mala calidad (comparados con los productos comerciales), se vio reflejada en la baja densidad de los materiales junto con su baja resistencia mecánica.

Sin embargo, como se pudo constatar, un problema importante en el manejo de los lodos es el alto porcentaje de de humedad (86.18 %). En la parte técnica es una desventaja al tener mayores dificultades en la manipulación de los lodos por los ladrilleros y artesanos alfareros e implica también dificultades en el transporte de los lodos hasta los sitios de aprovechamiento.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La conclusión general de este estudio fue que, de forma global, la factibilidad técnica, económica, social y ambiental de la opción propuesta en este trabajo fue aceptable. La anterior conclusión se fundamenta en los siguientes resultados:

a) El programa de muestreo y caracterización de los lodos de la PPLB permitió determinar que estos residuos presentan un alto potencial de valoración como materia prima para elaborar productos cerámicos.

a. En primer término, estos lodos presentaron contenidos de metales pesados para poder clasificarlos como excelentes según la NOM-004-SEMARNAT-2002. Los lodos de la PPLB presentaron tan sólo el 5.5% del valor especificado para zinc en la norma; para Arsénico, níquel y mercurio el 2.5%; para cobre y plomo el 0.93%; para cadmio el 0.48%; y para cromo el 0.23%. Las concentraciones medias de microorganismos, en el caso de coliformes fecales su concentración fue de 0.8% del valor especificado por la norma; para *Salmonella spp.*, fue de 73% y para Huevos de Helminto, el 5.77% de lo especificado por la norma.

b. En segundo término, estos residuos presentaron contenidos de óxidos más o menos similares a los valores correspondientes a una arcilla típica para elaborar ladrillos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  32.46 %, de  $\text{SiO}_2$  29.68%, y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  4.45%) aunque un valor muy alto de Pérdidas por Calcinación, 35.18% comparado con la arcilla típica cuyo valor es de entre 3 y 5%.

c. En tercer lugar se determinó que los lodos presentan los constituyentes de una pasta cerámica: materiales que dan plasticidad (Caolinita en un 27.76%), materiales fundentes (Albita y Anortita presentes en un 8.88%) y refractarios (Cuarzo y Cristobalita en un 16.53%), valores muy similares a los de una arcilla roja empleada en las pruebas de elaboración de materiales cerámicos.

d. Los resultados del contenido de Sólidos Suspendido Totales y Turbiedad a la entrada y salida del sedimentador permitieron calcular la producción de lodos (12,455 ton/año). Este valor puede satisfacer la demanda estimada (298 toneladas diarias) que se requieren por los fabricantes de productos cerámicos localizados en Toluca, Naucalpan, Huixquilucan, Texcoco e Ixtapaluca, Estado de México. Además, se determinó que no existen variaciones significativas de las características del lodo para la época de lluvias y de estiaje que pudieran afectar significativamente la calidad de los lodos como materia prima para elaborar productos cerámicos.

b) Las pruebas realizadas en laboratorio permitieron determinar que:

e. En el caso de las pruebas exploratorias (realizadas sin acondicionamiento de los lodos y sin utilizar un diseño de experimentos), los resultados obtenidos permitieron establecer que era necesario darle un pre-tratamiento al lodo antes de utilizarlo como materia prima para elaborar productos cerámicos (secado por tener un alto contenido de humedad, 86%, molienda y tamizado para homogenizarlo en la pasta). Además, los resultados de estas pruebas también permitieron seleccionar el intervalo de temperaturas de cocción de las pruebas finales.

f. Con base en los resultados de las pruebas finales (realizadas con acondicionamiento de los lodos secado, molido y tamizado, y aplicando un

diseño experimental) se pudieron identificar los principales factores que influyeron el proceso de elaboración de productos cerámicos, cuando se utilizó lodo como materia prima. Estos principales parámetros de influencia en el proceso fueron: la temperatura de cocción y el tamaño de grano. Las condiciones óptimas de operación del proceso de elaboración de productos cerámicos, utilizando los lodos de la PPLB, fueron las siguientes: 27% de lodo en la pasta cerámica; tamaño de grano del lodo: 271  $\mu\text{m}$  y, temperatura de cocción: 1227.5° C. Bajo estas condiciones, los valores de las variables de optimización fueron: densidad, 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; porcentaje de absorción de agua, 13.4% y, porcentaje de contracción por cocción, 10%. Estos valores fueron similares a los medidos a un testigo (producto cerámico de tipo comercial). Además, en estas pruebas se pudieron obtener tres tipos diferentes de materiales:

1. Los cocidos a baja temperatura (880° y 835° C) y baja resistencia a la compresión.
  2. Los cocidos a una temperatura media (1040° C) con mediana resistencia a la compresión.
  3. Los cocidos a alta temperatura (1200° C) y alta resistencia a la compresión.
- a. La estimación de la factibilidad técnica, económica, social y ambiental de valorar los lodos de la PPLB como materia prima para elaborar productos cerámicos, puso en evidencia que:
- g. Esta opción de valoración es medianamente aceptable sin acondicionamiento del lodo y sin optimización de los parámetros de influencia del proceso de elaboración de productos cerámicos. Los valores estimados, con base en los resultados obtenidos en las pruebas exploratorias, fueron 67 impactos positivos y 75 impactos negativos.
  - h. el acondicionamiento de los lodos de la PPLB y la optimización permitieron aumentar significativamente la factibilidad de esta opción de valoración, a tal punto que fue aceptable. Los valores estimados, con base en los resultados obtenidos en las pruebas exploratorias, fueron 75 impactos positivos y 64 impactos negativos. Para las condiciones óptimas en la estimación de la factibilidad económica, se determinó que, cuando se utiliza lodo para elaborar ladrillos, los costos, por concepto de materiales, disminuyen en un 4.38% comparado con la elaboración de ladrillos utilizando solo arcilla roja y arena. En el aspecto ambiental y social, se determinó que es altamente factible la utilización de lodos para la elaboración de ladrillos. Los impactos ambientales negativos encontrados son poco persistentes.

### Recomendaciones

De los resultados y de las conclusiones obtenidas se pueden proponer las siguientes recomendaciones:

- Se requieren hacer pruebas para obtener las condiciones de temperatura para alcanzar el equilibrio sólido-líquido del lodo (diagrama de fases). De esta manera se podría obtener la mayor cantidad de lodo utilizado sin que varíen las características de los materiales cerámicos.
- Se recomienda realizar una investigación más profunda acerca de otros tipos de productos que se elaborarían con los lodos de la PPLB. De esta manera se podrían obtener productos con aplicaciones tecnológicas interesantes.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Ademoroti CMA (1996). Standard Method For Water and Effluents Analysis. Foludex Press Ltd. Ibadan.
2. Adler, E. (2002). Gestion des boues d'eau potable á la recherche des bonnes pratiques. Synthèse du groupe "terres de decantation". (AGHTM) France.
3. Alva, A. K. y M. E. Sumner. (1989). Allevation of Aluminum toxicity to Soybeans by Phosphogypsum or Calcium Sulfate in dilute nutrient solutions. Soil Science, Vol. 147. No. 4, USA, 278-285.
4. Anderson M.; Skerratt R.G. (2003) Variability study of incinerated sewage sludge ash in relation to future use in ceramic brick manufacture. British Ceramic Transactions. 102 (3), 109-113.
5. APHA. (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19th Ed. American Public Health Association. AWWA and WPCF, Washington DC, EUA.
6. Arboleda. 1973. Manual de tratamiento de aguas potables. Programa de educación de ingeniería sanitaria. Caracas Venezuela.
7. 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.
8. 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.
9. ASTM C20-97. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water.
10. ASTM C126-99. Ceramic glazed estructural clay facing tile, facing brick and solid masonry units.
11. Avgustinik A. I. (1983). Cerámica. Editorial Reverte S. A. Segunda edición. España. pp 22-30.
12. AWWA (American Water Works Association). (1990). Sludge: Handling and disposal. 154 pp.
13. AWWA (American Water Works Association). Association). (1991). Alum sludge in the aquatic environmental. AWWA, USA. 223 pp.
14. Baker, J. P. and C. L. Schofield. (1982): Aluminum toxicity to fish in acids water. Water, Air, and Soil Poll., 18:289-309.
15. Basegio, T., Berutti, F., Bernardes A. and Bergmann C. P. (2002). Environmental and technical aspects of utilisation of tannery sludge as a raw material for clay products. Journal of the European Ceramic Society. 22: 2251-2259.
16. 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.
17. Bielza, J.M (2002). CSIC NM006- Reciclado de residuos obtenidos en planta s de anodizado.
18. Bosch, F. (2002). Valorización de residuos, diseño y construcción de un piloto de filtración. AIMME. Instituto Tecnológico metalmecánico. 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#).
19. Cano, M., Rodríguez-Maribona y Alfaro I. (2000) PAVAL: The Aluminium Oxide Recycling. Characteristics and Applications. LBEIN Technological Research Centre, Bilbao, Spain.
  20. Cheremisinoff, P. N. (1995). Sludge. Management and disposal. Prentice Hall. USA.
  21. CNA (Comisión Nacional del Agua) (1997). Sistema Cutzamala. Una obra magna para atender una gran demanda. Vertiente, vol. 2, núm. 14, ene. 1997. 18-20 pp.
  22. Crapper, D. R., S. S. Krishnan y A. J. Dalton. (1973). Brain aluminum distribution in Alzheimer's disease and experimental neurofibrillary degeneration. Science 180, 511.
  23. Cusidó, J y Cremades, L. (2000) Nuevos materiales para la construcción mediante valorización de lodos de aguas residuales urbanas: proyecto Ecobrick. Institut Politècnic del Campus de Barcelona, España.
  24. 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.
  25. Dillion G.R., Hall, T., Sweet, N., Wolstenholme, R. and Woods, V. (1996). Novel methods for the treatment and disposal of waterworks sludge: Final report. WRc Report No. PT1084.
  26. Dillion G. (1997) Application guide to waterworks sludge treatment and disposal. WRc Report No. TT016.
  27. Domínguez J. M. y Schifter I. (1995). Las arcillas: el barro noble. Fondo de Cultura Económica. Primera reimpresión. México. pp. 77.
  28. 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.
  29. Elías, X. (2000). Valorización de Fangos. Aspectos Ambientales de la Valorización de Cerámica de Fangos. Madrid.
  30. Elliott H. L. (1978). Lancet 2 : 1255. In : Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
  31. Environment Protection Agency (1995). A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. EPA 832-R-93-003.
  32. Fair, G.M, Geyer, J.C y Okún, D.A. (1999). Purificación de Agua y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. G. Editorial Limusa – Wiley SA.
  33. Ferreira J. M. F., Torres P. M. C., Silva M. S. and Labrincha J. A. (2001). Recycling of granite sludges in brick-type and floor- tile- type ceramic formulations. Euroceram News No. 14.
  34. 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.
  35. Freeman, R. A. y W. H. Everhart. (1971). Toxicity of Aluminum hydroxide complexes in neutral and basic media to Rainbow Trout. Trans. Am. Fish. Soc., 100:644.
  36. Frankhouser, W. L. (1987). Advanced Processing of Ceramic Compounds: Dynamic Compaction Technology, self-propagating high-temperature technology.

37. Galini, S. H. y M. Chatzinoff. (1981). Aluminum poisoning and chick embryogenesis. *Environ. Res.* 24 : 1-5 In : Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
38. 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.
39. Golub, M. S., B. Han, y C. L. Keen (1993). Development patterns of aluminum in mouse brain and effects dietary aluminum excess on manganese deficiency. *Toxicology*, jul. 11: 81(1): 33-47. In. Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
40. Goldbold P., Lewin K., Graham. A y Barker P. (2003) Reuse of water utility products as secondary commercial materials. WRC. report No. UC 6081.
41. 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 Building and Structures, November 2004. Barcelona, España.
42. Henze y col (1995) *Wastewater Treatment*. I. Ed. Springer.
43. Karlick, S. J., G. L., Eichorn y P. N. Lewis (1980). *Biochemistry*. 19: 5991-5998. 1980. In: Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
44. Kawamura, S. (2000). *Integrated design and operation of water treatment facilities*. 2<sup>a</sup> edición. John Wiley. USA.
45. Kingery W.D. (1976). *Introduction to Ceramics Segunda edición*. E. U. A. pp 7-15.
46. Klatzo, I., Wisniewski, H. y E. Streicher. (1965). Experimental production of neurofibrillary degeneration, I. Light microscopic observations. *J. Neurophathol. Exp. Neurol.* 24, 187.
47. Leonard y Gerber. (1988). In : Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
48. Leopold, L. B. F. E. Clarke, B. B. Hanshaw and J. R. Balsley. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. Geological Survey. Circ. 645, G. O. P. Washington DC.
49. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de Enero de 1988).
50. McCormack (1978). In : Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
51. 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 Quebec. Direction des Politiques du secteur agricole. Quebec, Canadá.
52. Metcalf and Eddy. *Wastewater Engineering. Treatment Disposal and Reuse*. Third Edition. Mc Graw- Hill. Pp 1334-1991.
53. 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.
54. Milham, (1979). In : Microdemex Inc. 1987-1995. Vol. 23.
55. Morton, M. S. (1976). *Prev. Soc. Med.* 30: 36-39. In: Microdemex Inc. 1987-1995. Vol 23.
56. Mugica A. (1996) *Contaminación Ambiental. Causas y Control de la Contaminación del Agua*. Reporte Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco.

57. Nalco Chemical Company. (1989). Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Ed. Mc Graw- Hill. México. Tomo I.
58. Nalco (1993). Manual del Agua. Nalco Chemical Company. Ed. McGraw-Hill.
59. NMX-C-006-1976 Ladrillos Bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares.
60. NOM-001-ECOL-1996. Que estable los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
61. NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de Junio de 1998).
62. NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental. Publicada en el Diario Oficial el 15 de agosto de 2003.
63. NOM-026-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Plomo (Pb). Valor normado para la concentración de las Plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".
64. NOM-080-SEMARNAT-1994. Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición.
65. Oclave, J. C. Wood M y A. C. Johnson. (1991). Mutat. Res. 264 :135-137.
66. Onaka, T. (2000) Sewage can made Portland cement: A new technology for ultimate reuse of sewage sludge. Wat.Sci.Tech., 41(8),93-98.
67. Ortis Ramírez, Luis Gabriel. (1998). Análisis de diferentes técnicas para determinar el Impacto Ambiental y sus aplicaciones en México. Tesis de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
68. 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.
69. Pan, J.R., Huang C. y Lin S. (2004) Reuse of fresh water sludge in cement making. Wat.Sci.Tech, 50(9), 183-188.
70. RAS (2000). Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Sección II. Título C. Colombia.
71. Rojas León, Francisco Javier. (2005). Informe preventivo de Impacto Ambiental del CENTIA. Universidad de las Américas, Puebla. (Disponible en: [catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mgc/rojas\\_l\\_fj/portada.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/rojas_l_fj/portada.html)).
72. Salazar-Jaramillo, A. (2003). Abordando el tema de los ecomateriales desde la ciencia y la tecnología. Cali, Colombia.
73. Sánchez, L. O. (1999). Recuperación de aluminio de un lodo proveniente de una planta potabilizadora que utiliza sulfato de aluminio. Maestría en Ing. Amb. DEPI-UNAM. Campus Cuernavaca, Mor. 112 pp.
74. Sanks R. L (1985) Water Treatment Plant Design. For the Practing Engineer. Ann Arbor Science Publishers, Inc. USA.
75. Scheffer, F. y P. Schachschabel. (1992). Lehrbuch der Bodenkunde, 13 ed. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. In: Muñoz, N. H. 1997. Lixiviación ed Aluminio en lechos de disposición de lodos. Tesis Maestría Ambiental, DEPI-UNAM. 103 pp.

76. Schultz C y Okun D. 1990. Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Edit. Schultz R. y Okun D. 1990). Noriega-Limusa. México.
77. Segura Castruita M. A., Gutierrez C, M. del C. Ortiz S., C. A y Gómez D., David J. (2000). Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México. (disponible en [www.chapingo.mx/terra/contenido/18/1/art35-44.pdf](http://www.chapingo.mx/terra/contenido/18/1/art35-44.pdf)).
78. Sherrard D. J. (1986). Aluminum and renal osteodystrophy. Semin. Nephrol 1986. 6 (Supply 1):. 5-11.
79. 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.
80. Tay, J. H. y Show, K. Y. (1991). Properties of cement made from sludge. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 117(2), 236-246.
81. Titshall, L.W. y Hughes J.C. (2005). Characterisation 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). EPA, 1995.
82. Tom D. Reynolds. Unit Operations and Processesing environmental Engineering. PWS Publishing Company. Second Edition. 1996 pp. 166-178.
83. Valverde M. E. (2001). Ladrillos cerámicos de perforación vertical para vivienda. ENEP Aragón. UNAM.
84. Vicury, A. H., y L. Heaver (1984). Controlling discharges of water plant waste to the Ohio River. AWWAJ., 57:85-86.
85. Weng Chih-Huang, Lin, Deng-Fong and Chiang Pen-Chi. (2003). Utilization of sludge as brick materials. Advance Environmental Research. 7: 679-685.
86. Wright, R. J., V. C. Baligar y J. L. Ahlrichs. (1989): The influence of extractable and soil solution Aluminum with root growth of wheat seedlings. Soil Science, Vol. 148. No. 4. USA.
87. 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.

Páginas consultadas:

[www.altavista.com/web/result.sitag](http://www.altavista.com/web/result.sitag)

[ewr.cee.vt.edu/environmental/wtprimer/sldg](http://ewr.cee.vt.edu/environmental/wtprimer/sldg)

[www.watercorporation.com](http://www.watercorporation.com)



## ANEXO I

### **Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección Ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites permisibles para su aprovechamiento y disposición final.**

En las actividades de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano y municipal, así como en las correspondientes a la operación de las plantas potabilizadoras y de plantas de tratamiento de aguas residuales se generan volúmenes de lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen.

Se ha considerado que por 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 contaminante establecidos en la presente Norma Oficial Mexicana o, en su caso, se dispongan de forma definitiva como residuos no peligrosos; para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general.

#### **Objetivo**

Esta norma establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano y municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

#### **Campo de aplicación**

Es de observancia obligatoria para todas las personas físicas y morales que generen 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.

Para efectos de entender la norma aplicada al presente estudio se establecen las siguientes definiciones:

**Almacenamiento:** acción de mantener en un sitio los lodos y biosólidos, hasta su aprovechamiento o disposición final.

**Aprovechamiento:** es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio.

**Coniformes fecales:** bacterias patógenas presentes en los intestinos de los animales de sangre caliente y humanos. Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coniformes termotolerantes. Pueden identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44° C - 45° C. Tienen una capacidad de fermentar la lactosa a temperatura de 44.5° C. Incluyen el género *Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella*.

Disposición final: la acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.

Estabilización: son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.

Helminto: término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humano, 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.

Huevos de helminto viables: huevos de helminto susceptibles a desarrollarse e infectar.

Límite máximo permisible: valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser dispuestos o aprovechados.

Lixiviado: líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos y en suspensión.

Lodos: son sólidos de un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano y municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

Mejoramiento de suelos: es la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.

Muestra: parte representativa de un universo o población finita, obtenida para conocer sus características.

Parásito: organismo animal o vegetal que vive sobre o dentro de un individuo de otra especie.

Patógeno: microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.

*Salmonella spp.*: 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 ( $H_2S$ ). A menudo, son patógenos para el hombre y los animales cuando se ingieren, ocasionando fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida como gastroenteritis).

Sólidos Totales (ST): son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados entre  $103^{\circ} C$  a  $105^{\circ} C$ , hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.

Sólidos Volátiles (SV): son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se queman a 550° C en presencia de aire por un tiempo determinado.

Terreno con fines agrícolas: son las superficies sobre las cuales se pueden cultivar productos agrícolas para consumo humano y animal, incluyendo los pastizales.

### Especificaciones

4.1 Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos y biosólidos a que se refiere esta norma, deberá de recabar la “constancia de no peligrosidad de los mismos” en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

4.1.1 En el caso del proceso de estabilización alcalina, las muestras de lodo deben ser tomadas antes de ser sometidas a este proceso.

4.2 Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la especificación 4.1, pueden ser manejados como residuos no peligrosos para su aprovechamiento o disposición final como se establece en la presente norma.

4.3 Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben de cumplir con las especificaciones 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8; y lo establecido en las tablas 1, 2 y 3 de la presente norma.

4.4 Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad. Para lo cual se pueden aplicar cualquier de las opciones descritas, de manera enunciativa pero no limitativa, en el Anexo 1 u otras que el responsable demuestre que son útiles para ello. Se deben conservar los registros del control por lo menos durante los siguientes 5 (cinco) años posteriores a su generación.

4.5 Para efectos de esta norma los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

4.6 Los límites máximos permisibles de metales pesados se establecen en la Tabla A-I.

TABLA A-I LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSOLIDOS

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

4.7 Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en la Tabla A-II.

TABLA A-II LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA PATOGENOS Y PARÁSITOS EN LODOS Y BIOSOLIDOS

CLASE	INDICADOR BACTERIOLOGICO DE CONTAMINACION	PATOGENOS	PARASITOS
	Coniformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helminto/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	Menro de 35

(a) Huevos de helminto viables  
NMP número más probable

4.8 El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo de clase, como se especifica en la Tabla A-III y su contenido de humedad hasta el 85%.

TABLA A-III APROVECHAMIENTO DE BIOSOLIDOS

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para la clase By C.</li> </ul>
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C</li> </ul>
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales.</li> <li>• Mejoramiento de suelos.</li> <li>• Usos agrícolas.</li> </ul>

4.9 La aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

4.10 Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación 4.1 y con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógenos y parásitos especificados en la tabla 2, para clase C.

4.11 Los sitios para la disposición final de lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia.

4.12 Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la presente norma, pueden ser almacenados hasta por un periodo de dos años. El predio en el que se almacenen debe ser habilitado para que no existan infiltraciones al subsuelo y contar con un sistema de recolección de lixiviados.

4.13 Se permite la mezcla de dos o más lotes de lodos y biosólidos, siempre y cuando ninguno de ellos este clasificado como residuos peligroso y su mezcla resultante cumpla con lo establecido en la presente norma.

4.14 El generador de lodos y biosólidos por medio de laboratorios acreditados debe realizar los muestreos y análisis correspondientes para demostrar el cumplimiento de la presente norma y deberá conservar los registros por lo menos los siguientes 5 (cinco) años posteriores a su realización.

4.15 La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se realizará en función del volumen de lodos generados como se establece en la Tabla A-IV.

**TABLA A-IV FRECUENCIA DE MUESTRO Y ANALISIS PARA LODOS Y BIOSOLIDOS**

<b>Volumen generado por año (Ton/año) en base seca</b>	<b>Frecuencia de muestreo y análisis</b>	<b>Parámetros a determinar</b>
Hasta 1,5000	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15,000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

4.16 El generador podrá quedar exento de realizar el muestreo y análisis de alguno o varios de los parámetros establecidos en la presente norma, siempre y cuando la detección de éstos sea en cantidades menores que los límites máximos permisibles, o cuando por la procedencia de los lodos y biosólidos éstos no contengan los contaminantes regulados en la presente norma, en ambos casos, deberá manifestarse ante la Secretaría por escrito y bajo protesta de decir la verdad. La autoridad se reserva el derecho de verificar dicha información.

**ANEXO II**

**Resultados del análisis mineralógico realizado a las muestras de lodos en el Instituto de Geología.**

A continuación se detallan los resultados de los análisis obtenidos por difracción de rayos X realizadas a las muestras de lodos provenientes de la Planta potabilizadora de “Los Berros”.

Los difractogramas fueron corridos en un difractómetro Philips mOd. 1130/96 (generador) y PW 1050/25 (goniómetro) utilizando radiación Cu K $\alpha$ . En primer lugar las muestras se corrieron en un portamuestras de aluminio en fracción no orientada en el intervalo angular 2 $\theta$  de 4° a 70°. En segundo lugar se prepararon secciones orientadas de estas muestras en un portamuestras de vidrio para identificar de forma más precisa los minerales del grupo de las arcillas (Tabla A-1).

Tabla A.4. Resultados de las muestras por difracción de rayos X.

MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS <sup>1</sup>
T-1.1 (Tarquina 1 a un metro de profundidad)	Arcilla del grupo de la Caolinita: (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ) <sup>2</sup> Plagioclasa de composición intermedia (entre Albita: 20-0572C y Anortita: 20-0528C) Cristobalita SiO <sub>2</sub> (11-0695D) <i>Cuarzo: SiO<sub>2</sub> (3-1161)</i> Material amorfo <sup>3</sup>
P1 (muestra compuesta)	Arcilla del grupo de la Caolinita: (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ) Plagioclasa de composición intermedia (entre Albita: 20-0572C y Anortita: 20-0528C) Cristobalita SiO <sub>2</sub> (11-0695D) <i>Cuarzo: SiO<sub>2</sub> (3-1161)</i> Material amorfo
E1 (lodo espesador)	Arcilla del grupo de la Caolinita: (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ) Plagioclasa de composición intermedia (entre Albita: 20-0572C y Anortita: 20-0528C) Cristobalita SiO <sub>2</sub> (11-0695D) <i>Cuarzo: SiO<sub>2</sub> (3-1161)</i> Material amorfo
S1 (lodo sedimentador)	Arcilla del grupo de la Caolinita: (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ) Plagioclasa de composición intermedia (entre Albita: 20-0572C y Anortita: 20-0528C) Cristobalita SiO <sub>2</sub> (11-0695D) <i>Cuarzo: SiO<sub>2</sub> (3-1161)</i> Material amorfo

<sup>1</sup> En cursiva las fases por confirmar

<sup>2</sup> Las arcillas identificadas pertenecen al grupo de la Caolinita (dioctaédricos). Puede ser cualquier de los que se enumeran a continuación:

Caolinita 1 Md: (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) (29-1488)

Halloysita 7Å: (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) (29-1487)

Nacrita 2M<sub>2</sub>: (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) (16-606)

Dikita 2M<sub>1</sub>: (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) (10-466)

siendo los dos primeros los más comunes en productos de alteración de rocas volcánicas

<sup>3</sup> Todas las muestras y en especial E1 contienen material amorfo (posiblemente materia orgánica). La eliminación de la misma podría mejorar la identificación.

Figura A-1. Difractograma correspondientes a la muestra de lodo a 1 metro de profundidad en tarquina.

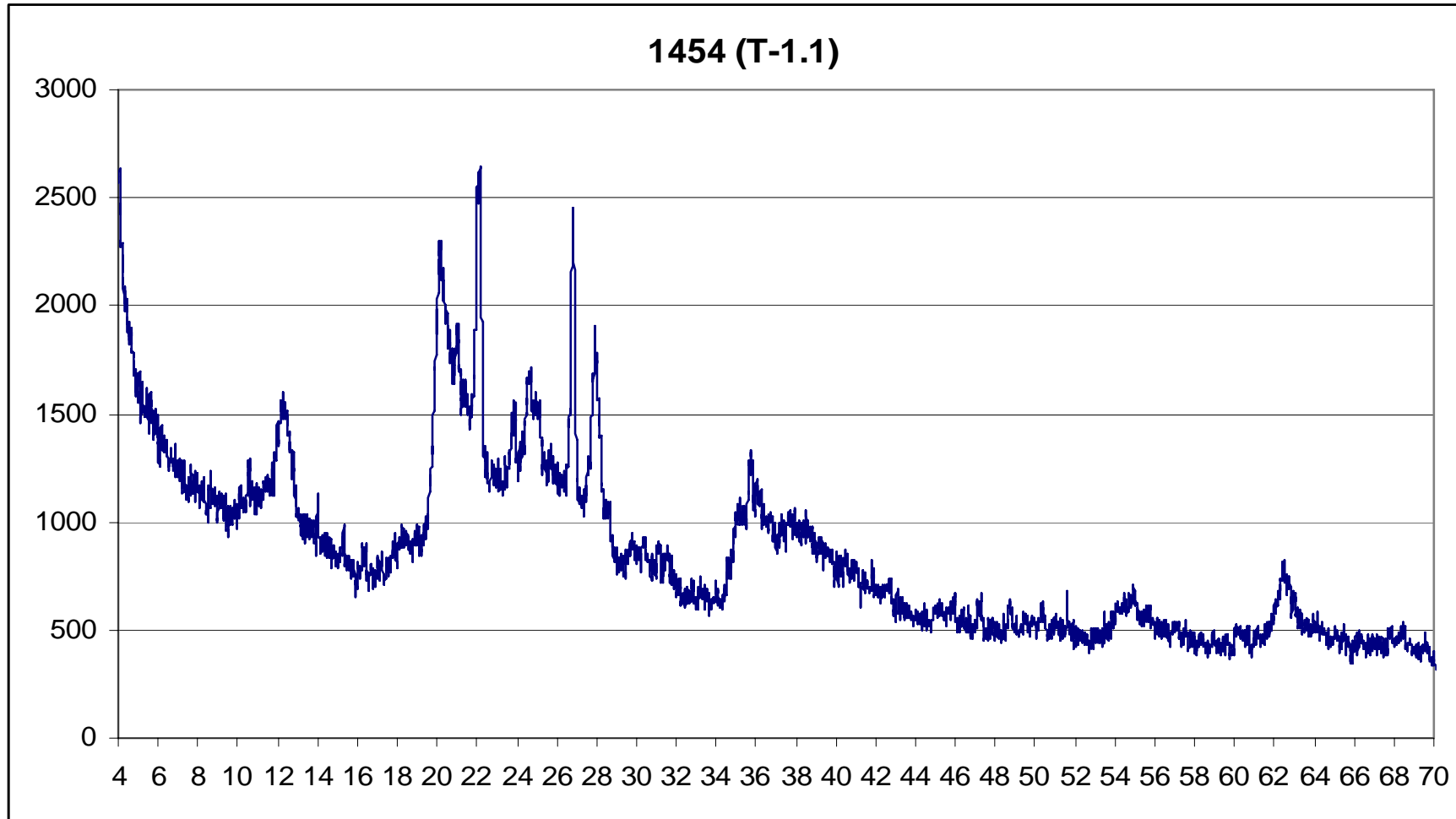


Figura A-2. Difractograma correspondiente a la muestra compuesta de tarquina.

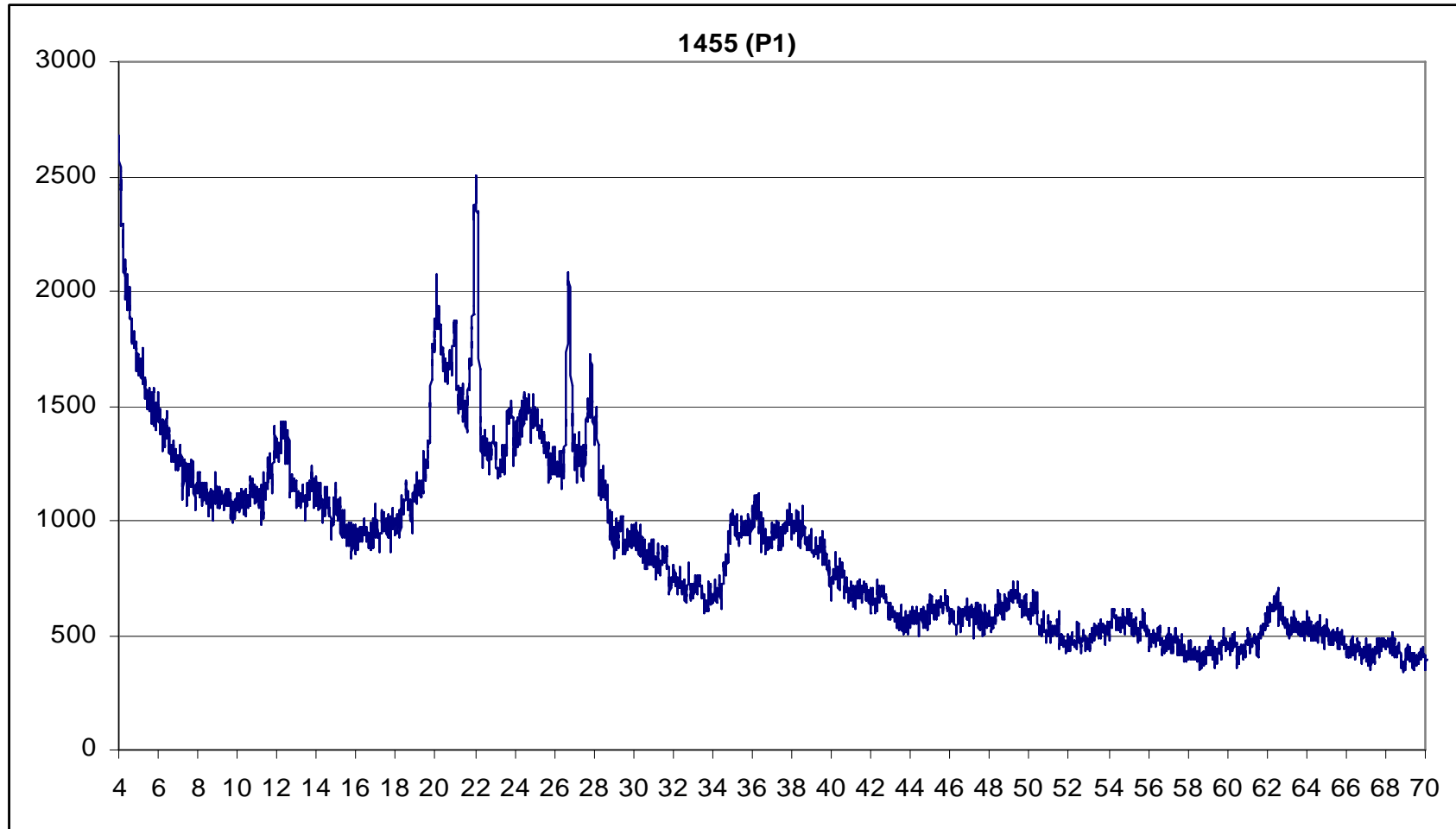




Figura A-3. Difractograma correspondiente a la muestra de lodo de espesadores.

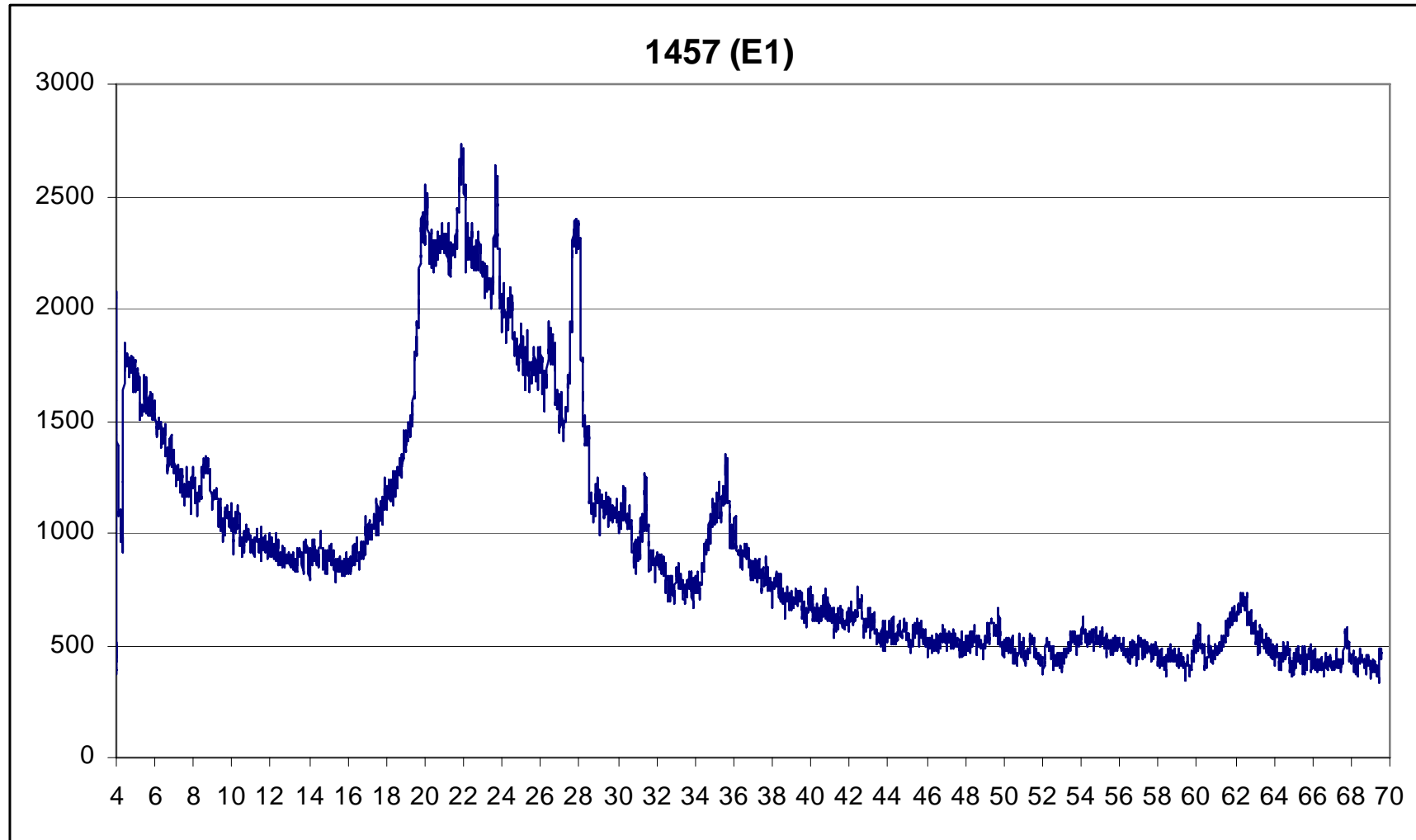
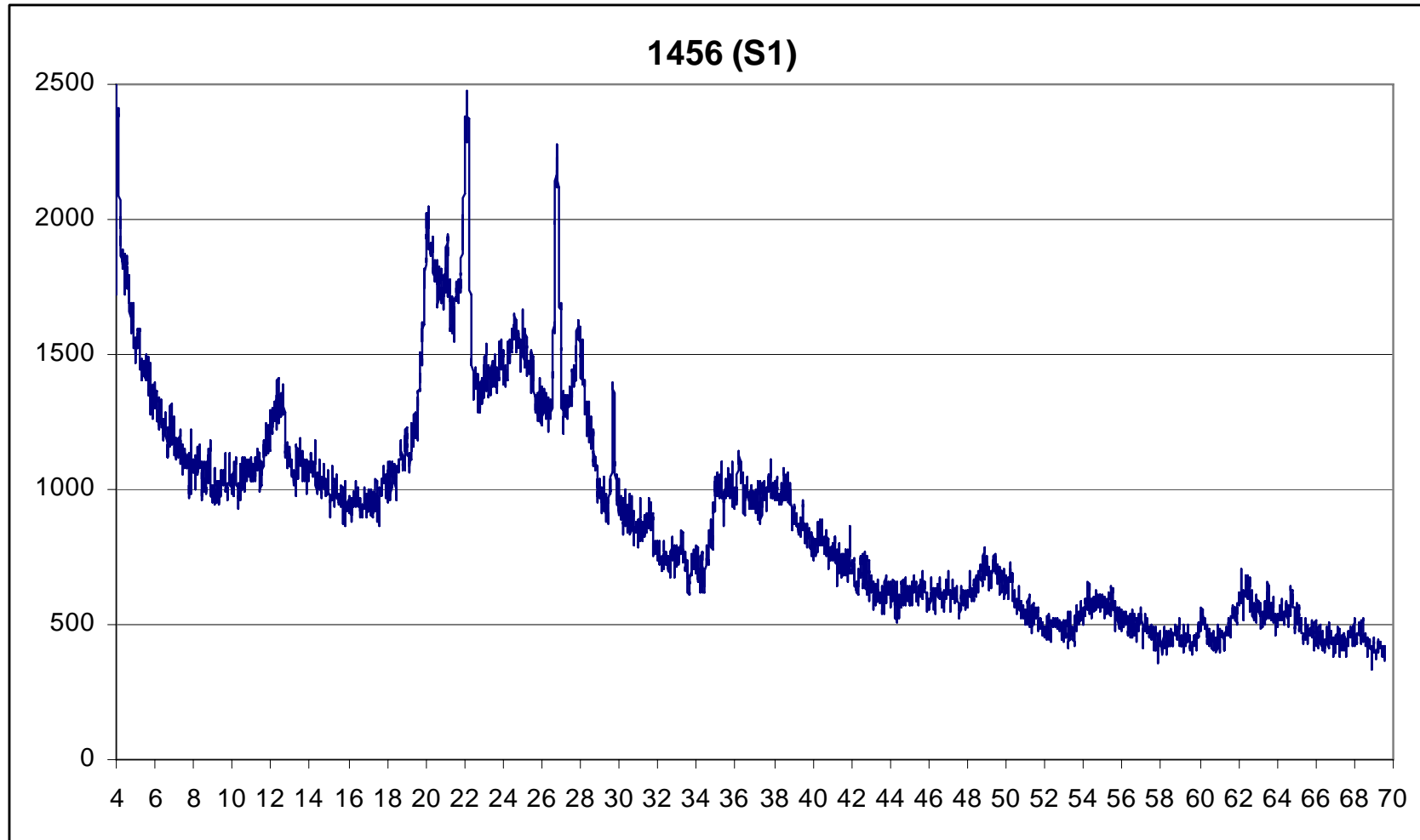


Figura A-4. Difractograma correspondiente a la muestra de lodo de Sedimentador.



**Resultados del análisis mineralógico a las muestras de arcilla y arena utilizadas en la elaboración de ladrillos y probetas cerámicas.**

El procedimiento de preparación y realización de la prueba fue el descrito en la sección correspondiente al análisis mineralógico del lodo depositado y generado por la PPLB. El análisis se realizó en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química (Tabla A-2).

Tabla A-2. Resultados del análisis mineralógica de las muestras de arcilla roja y arena empleados en este estudio.

<b>MUESTRA</b>	<b>FASE IDENTIFICADA</b>
Arcilla (ARC-1)	Caolinita 1T, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ Anortita sódica ordenada, $(\text{Ca}, \text{Na}) (\text{al}, \text{Si})_2 \text{Si}_2\text{O}_8$ Cuarzo, $\text{SiO}_2$
Arena (AR-1)	Albita desordenada, $\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$ Cuarzo, $\text{SiO}_2$ Snidina, $(\text{K}, \text{Na}) (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$

Figura A-5. Difractograma correspondiente a la muestra de arena.

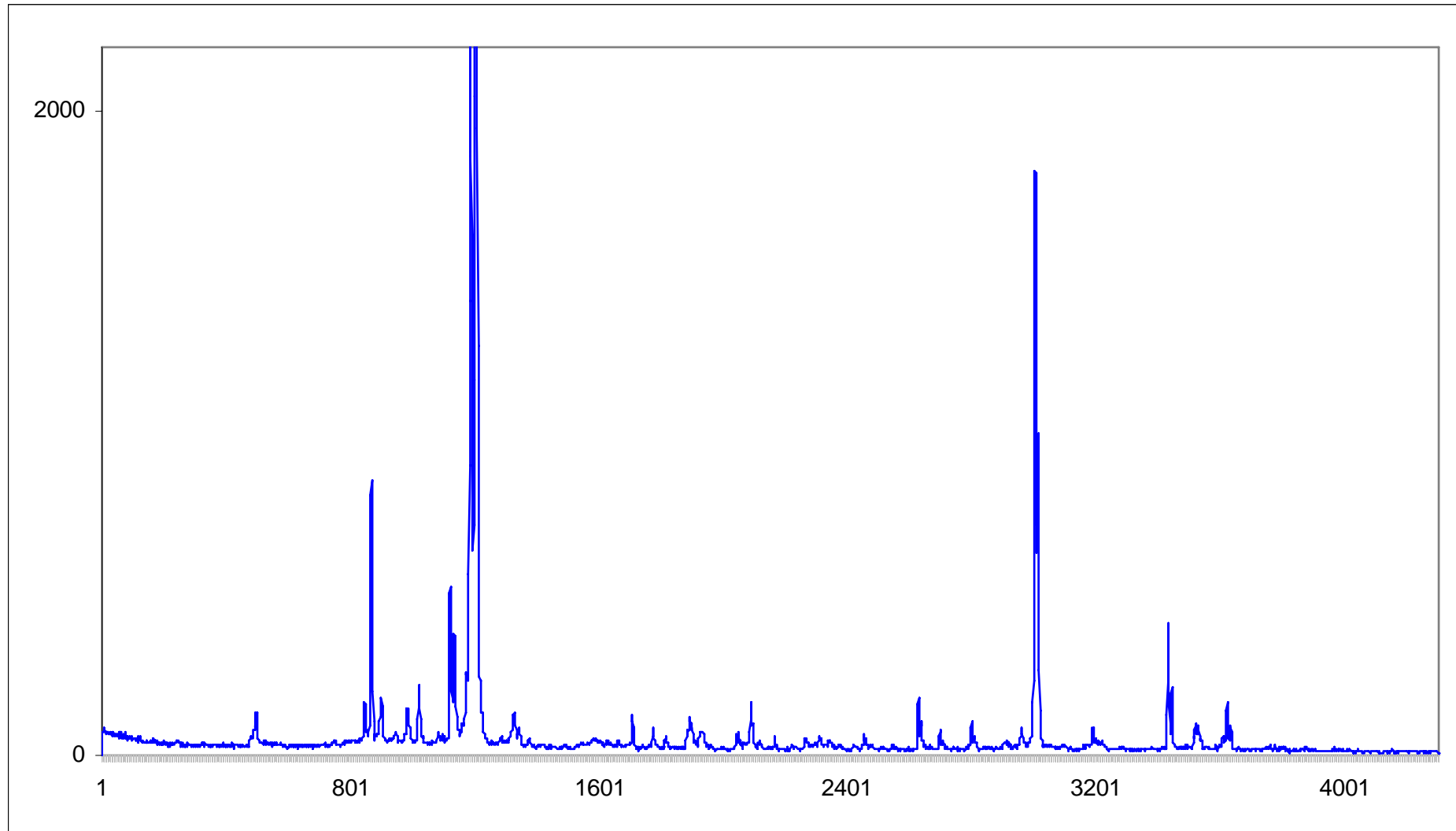
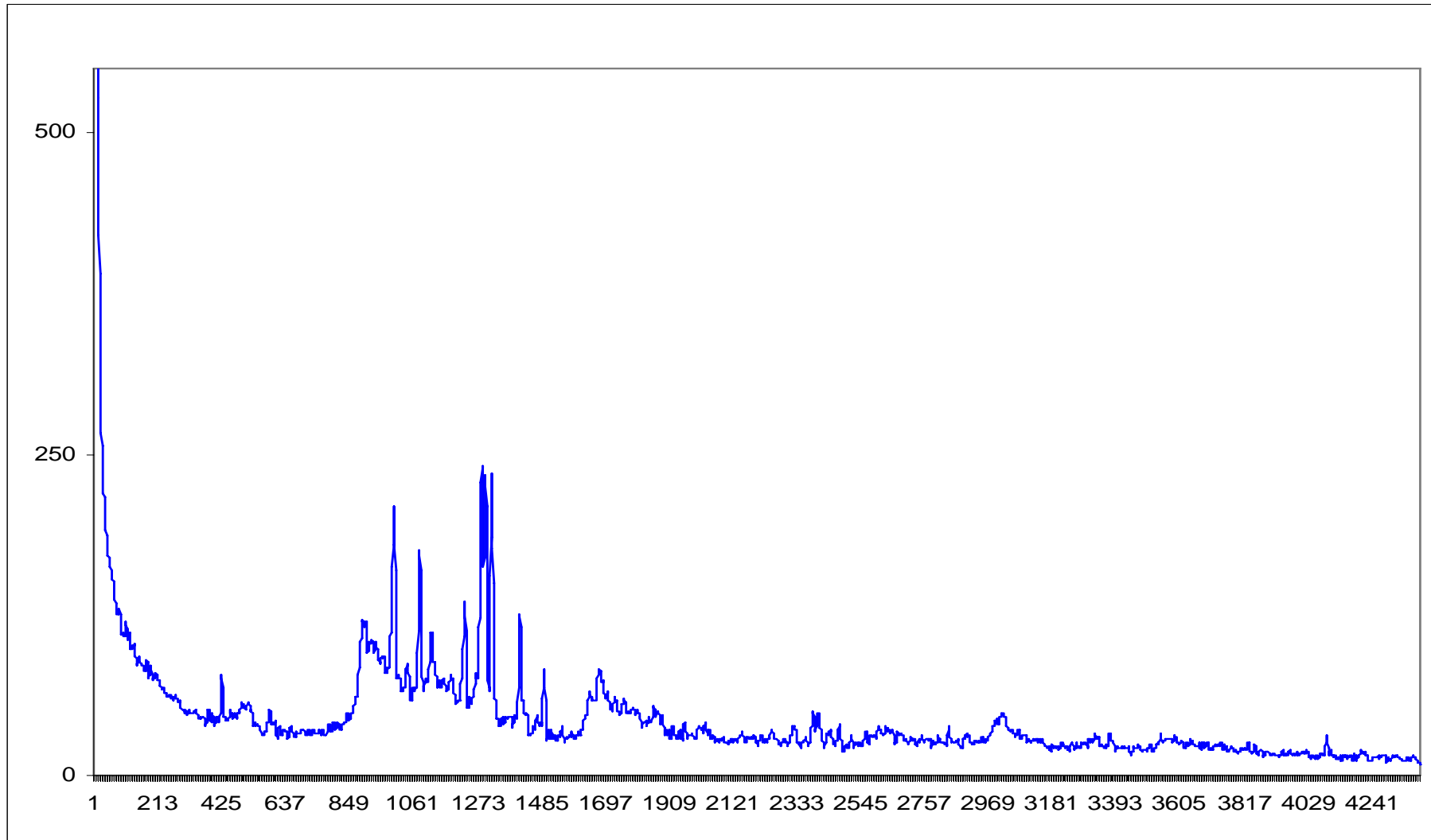


Figura A-6. Difractograma correspondiente a la muestra e Arcilla.



**ANEXO III**

**Análisis estadístico del Porcentaje de contracción por cocción y la densidad de los ladrillos elaborados con lodo y arcilla**

**Porcentaje de contracción por cocción**

El valor del porcentaje de contracción por cocción es un indicativo del tamaño de la pieza a elaborar para, después de la cocción, se tengan tamaños especificados por el fabricante. Una contracción muy alta, implicaría elaborar piezas grandes y requeriría hornos de mayor tamaño. En la Tabla A-3 se presenta, al igual que para el porcentaje de absorción de agua, el análisis ANOVA.

Tabla A-3. Tabla de ANOVA para el porcentaje de contracción por cocción de los materiales cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	Valor de P
X <sub>1</sub>	8.7394	1	8.7934	0.59	0.4710
X <sub>2</sub>	54.2727	1	54.2727	3.67	0.1037
X <sub>3</sub>	64.8034	1	64.8034	4.39	0.0811
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	5.62768	1	5.62768	0.38	0.5597
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	3.51125	1	3.51125	0.24	0.6432
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.91125	1	0.91125	0.06	0.8121
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	20.1924	1	20.1924	1.37	0.2867
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	73.8112	1	73.8112	5.00	0.0668
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	6.64335	1	6.64335	0.45	0.5274
Error total	88.6248	6	14.7708		
Total (corr.)	327.138	15			

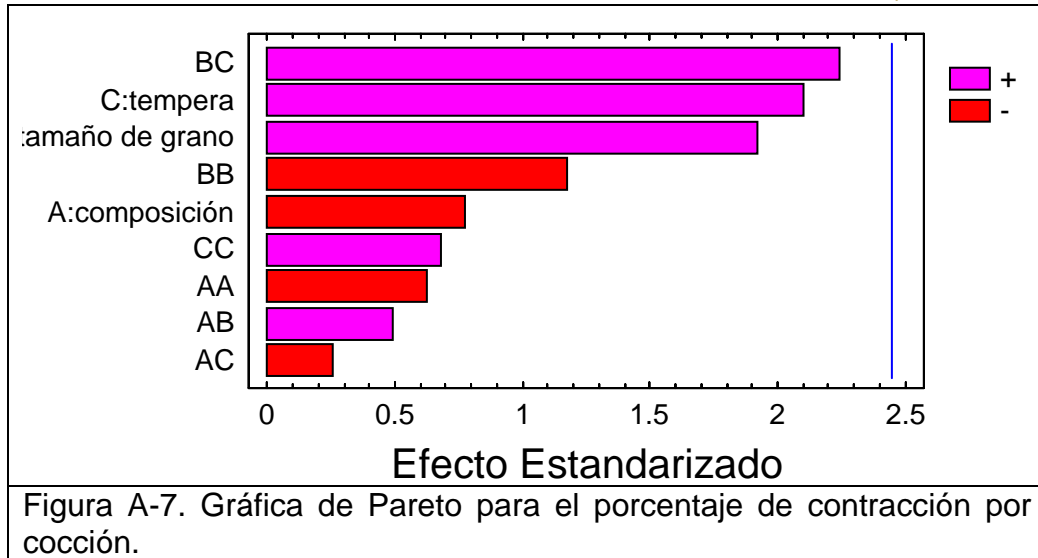
$R^2 = 72.90\%$

Error Estandar de Estudent = 3.84328

Error medio absoluto = 1.88706

Estadístico Durbin-Watson = 2.34155 (P= 0.0730)

De la Tabla A-3, se tiene que la variable que afecta el porcentaje de contracción por cocción es la interacción tamaño de grano/temperatura de cocción aunque no son muy significativas al 95% de confiabilidad (menor valor de P= 0.0730). Esto se puede constatar en la gráfica de Pareto para ésta variable (Figura A-7).

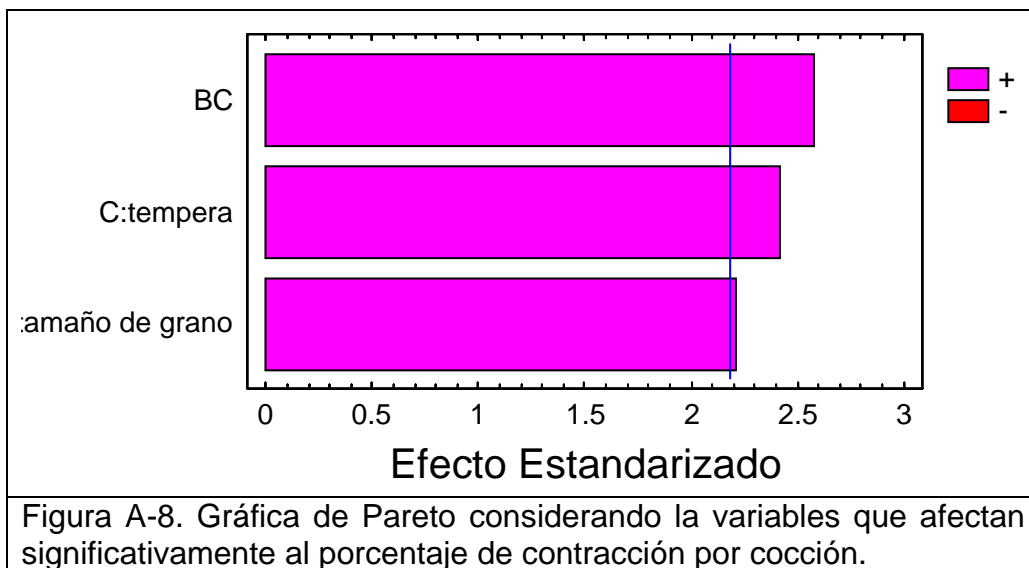


Para el valor de contracción por cocción, el tamaño de grano del lodo y la temperatura son quienes tienen un efecto más significativo.

La  $R^2$  obtenida (72.909%) indica que solo el 72.909% de los valores obtenidos experimentalmente son predichos por el modelo matemático. La Ecuación A-2 presenta el modelo matemático reducido solo considerando las variables que afectan significativamente el porcentaje de contracción por cocción.

$$\text{Contracción} = 8.2375 + 2.19022 \cdot X_2 + 2.3933 \cdot X_3 + 3.0375 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. A-1})$$

La Figura A-8 presenta la gráfica de Pareto con las variables que afectan significativamente al porcentaje de contracción por cocción con un intervalo de confianza del 05%.



Para obtener un valor de contracción por cocción del 10%, mediante el modelo matemático de la ecuación A-1, los valores que dan estas condiciones son los que se presentan en la Tabla A-4 (valores reales y codificados).

Tabla A-4 Minimización del porcentaje de contracción por cocción.

Factor	Óptimo (valor codificado)	Óptimo (valor real)
X <sub>1</sub> = Composición del lodo (% p/p)	0.0381942	30.38
X <sub>2</sub> = Tamaño de grano (µm)	1.19788	526
X <sub>3</sub> =Temperatura (° C)	-0.142762	1017.15

### Densidad

La densidad es un parámetro que indica el peso del material por unidad de volumen. En una construcción, lo mejor sería tener materiales muy resistentes pero de peso relativamente bajo. La Tabla A-7 presenta el ANOVA de los resultados obtenidos en la medición de la densidad de los ladrillos.

Tabla A-5. Tabla de ANOVA para el porcentaje de contracción por cocción de los materiales cerámicos elaborados con mezcla lodo-arcilla.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	Valor de P
X <sub>1</sub>	0.0329553	1	0.0329553	3.55	0.1084
X <sub>2</sub>	0.0488156	1	0.0488156	5.27	0.0616
X <sub>3</sub>	0.563284	1	0.563284	60.75	0.0002
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	0.0157399	1	0.0157399	1.70	0.2404
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.00973012	1	0.00973012	1.05	0.3451
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.000990125	1	0.000990125	0.11	0.7549
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	0.0145225	1	0.0145225	1.57	0.2573
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.1656	1	0.1656	17.86	0.0055
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	0.0863508	1	0.0863508	9.31	0.0225
Error total	0.0556291	6	0.00927151		
Total (corr.)	0.993618	15			

$R^2 = 94.40\%$

Error Estandar de Estudent = 0.0962887

Error medio absoluto = 0.0475801

Estadístico Durbin-Watson = 1.54781 (P=0.0387)

Para el caso de la densidad, las variables que tienen efecto significativo son la Temperatura, la interacción tamaño de grano/temperatura y la interacción temperatura/temperatura pues se observa en la Tabla A-5 que se esperaría tener los mayores efectos para las variables que tengan un valor de P menor a 0.0387. La variable X<sub>3</sub> (Temperatura) tiene un valor de P=0.0002. En la Figura A-9, gráfica de Pareto, se observa este comportamiento.



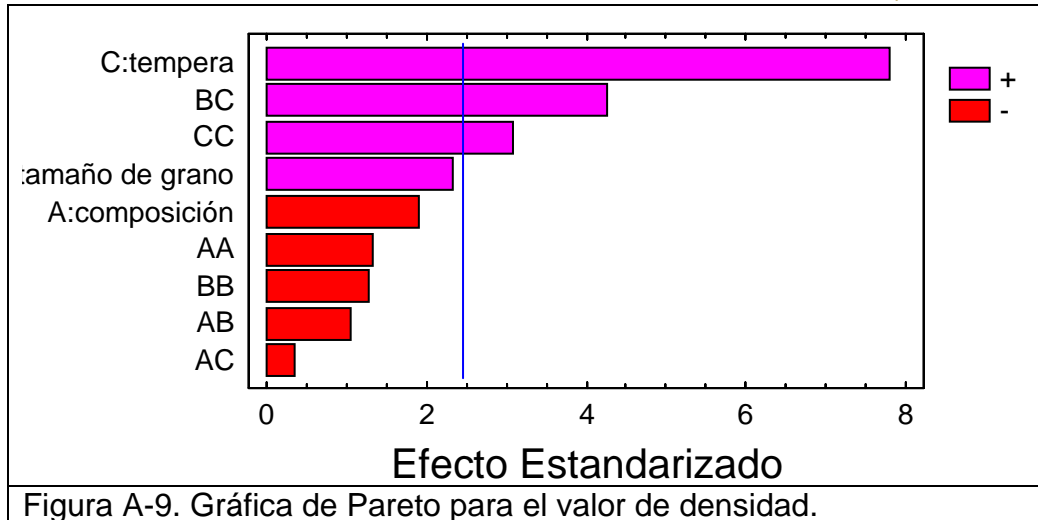


Figura A-9. Gráfica de Pareto para el valor de densidad.

De la Figura A-9 se observa como el efecto de la temperatura, la interacción tamaño de grano/temperatura y la temperatura/temperatura tienen mayor efecto significativo.

El valor de  $R^2$  es relativamente bajo (94.4014%), muy similar al obtenido en el análisis estadístico para la absorción de agua (94.79%).

La ecuación A-3 representa al modelo matemático reducido (con las variables que afectan significativamente a la densidad con un intervalo de confianza del 95%), que predice el valor de la densidad con los factores planteados en el diseño experimental.

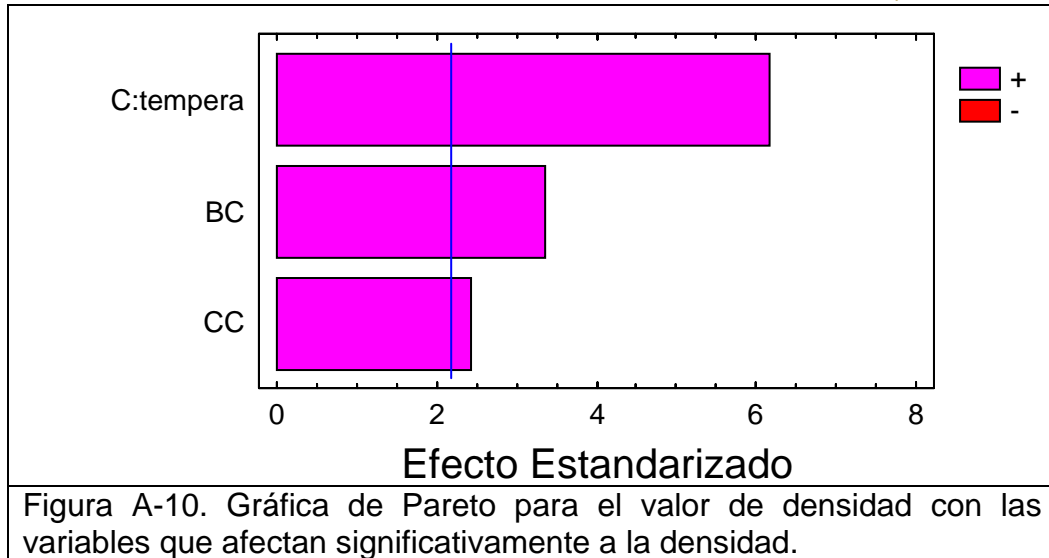
$$\text{Densidad} = 1.19682 + 0.223132 \cdot X_3 + 0.143875 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.125411 \cdot X_3^2 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. A-2})$$

Para obtener un valor de densidad comprendido de 1.6 g/cm<sup>3</sup>, mediante el modelo matemático de la ecuación A-3, considerando el valor de  $R^2$ , se tienen los siguientes valores que dan estas condiciones (Tabla A-8, valores reales y codificados).

Tabla A-6 Optimización del valor de la densidad.

Factor	Óptimo (valor codificado)	Óptimo (valor real)
X <sub>1</sub> = Composición del lodo (% p/p)	-0.406569	25.93
X <sub>2</sub> = Tamaño de grano (µm)	0.104405	324
X <sub>3</sub> =Temperatura (° C)	1.0794	1212.7

Con las variables que afectan significativamente el proceso se tiene la gráfica de Pareto correspondiente con un intervalo de confianza del 95% (Figura A-10).



---

## ANEXO IV

### Evaluación de Impacto Ambiental

#### Definición y componentes del Medio Ambiente

El ambiente, o medio ambiente, se entiende como un sistema, es decir, como un conjunto de elementos que interactúan entre sí. Por lo tanto se designa al ambiente como todos los sistemas posibles dentro de los cuales se integran los organismos vivos, los cuales, a su vez, se presentan como sistemas; y no solo comprende el sistema humano, sino también todos los sistemas posibles de los organismos vivos en general.

El medio ambiente es el conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados; ésta definición coloca al ser humano como figura principal. Se estudia desde siempre con la herramientas que permitan entender el comportamiento de uno o varios elementos que lo integran. En las últimas décadas se ha dirigido la atención a los efectos adversos que han sufrido elementos naturales y que pueden representar un riesgo para el futuro del mismo hombre.

El medio ambiente natural es aquel en que los elementos que lo conforman se dan naturalmente, sin intervención del hombre. El medio ambiente construido es el que comprende el ambiente modificado por los seres humanos a través de su organización como sociedad ([www.altavista.com/web/result.sitag](http://www.altavista.com/web/result.sitag)).

A continuación se presenta un desglose de los componentes que conforman el medio ambiente (Razquin Lizarraga, J. A., 2002):

- El aire, la atmósfera y el espacio exterior.
- Las aguas, en cualquiera de sus estados físicos, ya sean dulces, estuariales o marinas; continentales o marítimas; superficiales o subterráneas; corrientes o detenidas.
- La tierra, el suelo y subsuelo.
- La flora terrestre o marina, nativa o exótica en todas sus entidades taxonómicas.
- La fauna terrestre o acuática; salvaje o domesticada; nativa o exótica, en todas sus entidades taxonómicas.
- La microflora y la microfauna de la tierra, el suelo y subsuelo terrestre y de lechos, fondos y subsuelos de los cursos o masas de agua, en todas sus entidades taxonómicas.
- Las fuentes primarias de energía, genética y los factores y patrones que regulan su flujo.
- Las pendientes topográficas con potencial energético.
- Las fuentes naturales de calor que, combinadas o no con agua, puedan producir energía geotérmica.
- Los yacimientos de sustancias minerales metálicas o no metálicas, incluidas las arcillas superficiales, las salinas artificiales, las covaderas y arenas, rocas y demás materiales aplicables directamente a la construcción.

- El clima y los elementos y factores que lo determinan.
- Los procesos ecológicos esenciales, tales como fotosíntesis, regeneración natural de los suelos, purificación natural de las aguas y el reciclado espontáneo de los nutrientes.
- Los sistemas ambientales en peligro, vulnerables, raros, poco conocidos, y las muestras más representativas de los diversos tipos de ecosistemas existentes.
- La especie humana y sus diversas formas de intervenir en el planeta para habilitarlo y desarrollarse en el.

En la medida que se desarrolla y crece un país, se agudizan los problemas de consumo de energía, sobreexplotación de los recursos naturales, contaminación atmosférica, de aguas superficiales y subterráneas, generación y acumulación de residuos (peligrosos y no peligrosos), dando como resultado una afectación importante al ambiente. Estos problemas ambientales incluyen: el calentamiento global del planeta (por la producción de gases como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etc.); la creciente contaminación del agua y los suelos por los vertidos y descargas de residuos industriales y agrícolas; el agotamiento de la cubierta forestal (deforestación), las pérdidas de especies, tanto silvestres como domésticas, de animales y plantas; la degradación de los suelos en los hábitat agrícolas y naturales, incluyendo la erosión, el encharcamiento y la salinización (Jiménez, 2001).

Cuando existe una modificación en las condiciones del ambiente, ya sea por el hombre o por la naturaleza, se dice que hay un impacto ambiental (LGEEPA, 1996). A finales de la década de 1960, se comenzó a tomar importancia sobre las alteraciones sobre el medio ambiente, principalmente por la acción del hombre. En el mes de junio de 1972, se celebró en Estocolmo Suecia, la conferencia mundial de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente, donde por primera vez se discutió el problema ambiental con una perspectiva global, abarcando no solo los problemas de contaminación del medio ambiente, sino también la disponibilidad y utilización de los recursos naturales.

La preocupación por encontrar soluciones al deterioro ambiental, es por evitar el agotamiento de los recursos naturales renovables y no renovables, procurando un crecimiento real y procurando llevar siempre un desarrollo sustentable en todos los aspectos.

Dada la importancia que tiene el agua para el hombre, en el modo de manejarla, esta se puede convertir en un medio de riesgo y con gran potencial de transmitir enfermedades (enfermedades hídricas). Por lo tanto es necesario llevar a cabo obras de ingeniería para su manejo. En la potabilización, por ejemplo, las fuentes pueden ser de dos tipo principalmente: aguas superficiales y subterráneas.

Dentro de las acciones para manejar el agua y hacerla potable para el hombre, se necesitan realizar una serie de obras como las siguientes:

Presas

Plantas de tratamiento y de potabilización

Redes de transporte y distribución de agua

Si no se tienen en cuenta ciertos factores desde la planeación de las obras, pueden existir consecuencias negativas sobre la ecología, clima y sociedad en general, tanto en la construcción, operación y abandono de estas obras, afectando factores ambientales como: agua, suelo, aire, flora, fauna, paisaje, sociedad y economía de la región.

El artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, establece que todas las obras hidráulicas deberán presentar la debida Manifestación de Impacto Ambiental.

Además, la estimación o la evaluación de impactos ambientales tienen la siguiente importancia:

- Presentan las recomendaciones oportunas en la realización de programas, actividades o proyectos que puedan afectar el ambiente.
- Proporcionan un amplio procedimiento en la evaluación de posibles impactos ambientales adversos.
- Propone los procedimientos oportunos para mitigar los efectos ambientales.
- Describe los beneficios que tendrá el desarrollo del proyecto en la comunidad.
- Contiene escenarios del comportamiento que puede presentarse en el ambiente durante el desarrollo de las actividades

### Técnica de Evaluación de Impacto Ambiental

Para llevar a cabo una Evaluación de Impacto ambiental, existen diversas técnicas o métodos como los que se presentan en la Tabla A-9 (Ortis Ramírez., L. G., 1998):

Tabla A-9. Técnicas o métodos para llevara a cabo una Evaluación de Impacto Ambiental (Ortis Ramírez., L. G., 1998).

TÉCNICA O MÉTODO	CARÁCTERÍSTICAS	TIPOS
Sistema ad-hoc	Llamado como de páneles o reunión de especialistas. Consisten en un grupo interdisciplinario de profesionistas con fines semejantes a la evaluación de un proyecto dado. Se desarrolla cuando hay poco tiempo y muy poca información.	
Listados	Es una relación de factores, variables y características ambientales que requieren ser evaluados. Se utilizan para la comparación de opciones o rutas de trabajo.	Listas de control simple Método Delphi Listas de control descriptivas Listas de control de escalas Listas de control de escala y peso Listado de escala y peso método del sistema de evaluación ambiental (SAE).

Tabla A-9. Técnicas o métodos para llevar a cabo una Evaluación de Impacto Ambiental (Ortiz Ramírez., L. G., 1998), (Continuación...)

TÉCNICA O MÉTODO	CARÁCTERÍSTICAS	TIPOS
Matrices de interacción (causa-efecto)	Métodos meramente cualitativos, de gran valor para determinar las diversas alternativas de un mismo proyecto	Matriz de Leopold Matriz de evaluación de impactos ambientales
Redes de interacción-diagramas de sistemas	Son sistemas de identificación y valoración preliminar; son meramente cualitativos y hacen un análisis de la relación causa-efecto sobre el medio ambiente	Redes (método de Network)
Mapas y superposición de mapas	Se efectúa una división del territorio afectado por la totalidad del proyecto mediante el trazo de retículas obteniéndose una serie de unidades geográficas en que cada una se estudia un conjunto de factores ambientales. Después se utilizan planos translúcidos y en cada una de ellas se marcan los resultados obtenidos para después superponerlos en los distintos planos e indicando de color los impactos deseables.	
Métodos mixtos	Utilizan conjuntamente varios métodos con el objetivo de lograr una evaluación de impactos ambientales en su magnitud, riesgo, importancia y duración.	

### Matriz de Leopold

Es un método cualitativo, preliminar que permite valorar las diversas alternativas de un mismo proyecto. Se cuenta con una matriz en la que se disponen como renglones los factores ambientales que pudieran ser afectados y como columnas las acciones que pueden causar impactos. Cada cuadrícula de interacción, susceptible de impacto, reflejará la importancia del mismo. Las sumatorias por renglones nos indican las incidencias del proyecto global sobre cada factor ambiental. Las sumatorias por columnas nos dan valoración relativa del efecto que cada acción produciría en el medio y por lo tanto de su agresividad (Rojas León, F. J., 2005).

La matriz recoge una lista de aproximadamente 100 acciones y 90 elementos ambientales (Leopold et al., 1971). Al utilizar ésta matriz se debe considerar cada acción y su potencial de impacto sobre cada elemento ambiental. Cuando se prevé un impacto, la matriz aparece marcada con una línea diagonal en la correspondiente casilla de esa interacción.

Como segundo paso, se debe escribir la interacción en términos de magnitud e importancia. La importancia de una interacción se describe mediante un valor numérico (comprendido entre 1 y 10, por ejemplo), donde 10 representa una gran magnitud y 1 una pequeña. Los valores próximos al 5 en la escala de magnitud representan impactos de extensión intermedia. La asignación de valores debe hacerse lo más objetivo posible para no caer en errores de interpretación aunque la valoración se basa en el juicio subjetivo de la persona, el grupo reducido o el equipo multidisciplinario que trabaja en el estudio. Una vez llenas las cuadrículas el siguiente paso consiste en evaluar e interpretar los números colocados.

Las ventajas que tiene este método son las siguientes:

- Tiende a considerar los posibles impactos de acciones proyectadas sobre diferentes factores ambientales.
- Incorpora la consideración de magnitud e importancia de un impacto ambiental.
- Permite la comparación de alternativas, desarrollando una matriz para cada opción.
- Sirve como resumen de la información contenida en la evaluación de impacto ambiental.

Como desventajas se tiene:

- Es difícilmente reproducible, debido a su carácter subjetivo del proceso de evaluación, pues no contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.
- No tiene en consideración las interacciones entre diferentes factores ambientales.
- No distingue entre efectos a corto y largo plazo, aunque pueden realizarse dos matrices según dos escalas de tiempo.
- Los efectos no son exclusivos o finales, existe la posibilidad de considerar un efecto dos o más veces.

A continuación se presenta una lista de los factores ambientales que pueden ser impactados por las acciones de un proyecto a realizarse:

### 1) CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| C) Atmósfera                                  | d) solución                        |
| a) calidad (gases, partículas)                | e) porción ( intercambio de iones) |
| b) clima (micro y macro)                      | f) compactación y asentamientos    |
| c) temperatura                                | g) estabilidad                     |
| d) Procesos                                   | h) sismología                      |
| a) inundaciones                               | i) movimientos de aire             |
| b) erosión                                    |                                    |
| c) deposición (sedimentación y precipitación) |                                    |

### 2) CONDICIONES BIOLÓGICAS

- |             |  |
|-------------|--|
| A) Flora    | B) Fauna                                 |
| a) árboles  | a) aves                                  |
| b) arbustos | b) animales terrestres, incluso reptiles |
| c) hierbas  | c) peces y mariscos                      |

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| d) cosechas             | d) organismos bentónicos |
| e) microflora           | e) insectos              |
| f) plantas acuáticas    | f) microfauna            |
| g) especies en peligro  | g) especies en peligro   |
| h) barreras, obstáculos | h) barreras              |
| i) corredores           | i) corredores            |

### 3) FACTORES CULTURALES

- |  |   |
|--|---|
| A) Usos del territorio                     | B) Estéticos y de interés humano                |
| a) espacios abiertos y salvajes            | a) vistas panorámicas y paisajes                |
| b) selvocultura                            | b) naturaleza                                   |
| c) pastos                                  | c) espacios abiertos                            |
| d) agricultura                             | d) paisajes                                     |
| e) zona residencial                        | e) agentes físicos singulares                   |
| f) zona comercial                          | f) parques y reservas                           |
| g) zona industrial                         | g) monumentos                                   |
| h) minas y canteras                        | h) especies o ecosistemas especiales            |
|  | i) lugares u objetos históricos o arqueológicos |
| C) Recreativos                             | D) Nivel cultural                               |
| a) caza                                    | a) modelos culturales (estilos de vida)         |
| b) pesca                                   | b) salud y seguridad                            |
| c) navegación                              | c) empleo                                       |
| d) zona de baño                            | d) densidad de población                        |
| e) excursión                               |   |
| E) Servicios e infraestructura             | c) red de servicios                             |
| a) estructuras                             | d) dispersión de residuos                       |
| b) red de transporte (movimiento, accesos) | e) barreras                                     |
|  | f) corredores                                   |

### 4) RELACIONES ECOLÓGICAS

- a) salinización de recursos hidráulicos
- b) eutrofización
- c) vectores, insectos y enfermedades
- d) cadenas alimenticias
- e) salinización de suelos
- f) invasión de maleza
- g) otros