



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL - RESIDUOS SÓLIDOS

RECICLAJE DE RESIDUOS CELULÓSICOS PARA ELABORAR MATERIALES DE  
CONSTRUCCIÓN

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

HUGO ALBERTO QUINTERO NAVARRO

TUTORES

DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

DR. JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTORIAL

M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2019

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Enrique César Valdez

Secretario: M.C. Constantino Gutiérrez Palacios

1er. Vocal: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

2do. Vocal: Dr. José Antonio Barrios Pérez

3er. Vocal: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

**TUTORES DE TESIS:**

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

---

**FIRMA**

Dr. José Antonio Barrios Pérez

---

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Dra. María Neftalí Rojas Valencia, al Dr. José Antonio Barrios Pérez y al comité su apoyo incondicional.

Agradezco a mi familia, por siempre estar cuando los necesito. Papá, fuiste la inspiración.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 Justificación .....	9
1.2 Planteamiento del problema .....	10
1.3 Objetivos .....	11
1.3.1 Objetivo general .....	11
1.3.2 Objetivos específicos .....	12
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>13</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
3.1 Lodo residual .....	15
3.2 Clasificación de los lodos .....	15
3.3 Biosólidos .....	16
3.4 Problemática de los lodos en México .....	17
3.5 Aprovechamiento de los lodos .....	18
3.6 Generalidades de los lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria papelera .....	19
3.7 Plantas papeleras en México .....	22
3.8 Bio Pappel .....	24
3.8.1 Planta Bio Pappel Tizayuca .....	29
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
4.1 ETAPA I. Recopilación y Análisis de Información .....	31
4.2 ETAPA II. Propuesta Experimental .....	33
4.2.1 Dimensiones de los ladrillos .....	33
4.2.2 Moldeo de los ladrillos .....	34
4.2.3 Caracterización de lodos .....	35
4.2.4 Proceso constructivo .....	37
4.3 ETAPA III. Fabricación de ladrillos a partir de los lodos de la industria papelera .....	37
4.3.1 Diseño de mezclas .....	37
4.3.2 Fabricación de ladrillos .....	38
4.3.3 Pruebas técnicas .....	41

4.4	ETAPA IV. Determinación y evaluación de la mezcla para la elaboración de ladrillos .....	47
4.4.1	Descripción del diseño estadístico del experimento .....	48
4.5	ETAPA V. Beneficios del proyecto .....	53
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
5.1	Resultados de caracterización de lodos .....	54
5.2	Resultados de prueba de resistencia a la compresión .....	55
5.3	Resultados de prueba de absorción .....	58
5.4	Diseño de mezclas .....	59
5.4.1	Prueba de resistencia a la compresión .....	60
5.4.2	Prueba de absorción .....	62
5.5	Resultados complementarios .....	64
5.6	Beneficios del proyecto .....	65
5.6.1	Beneficios ambientales .....	65
5.6.2	Beneficios económicos .....	66
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO 2</b>	<b>.....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

1	Planta Bio Pappel .....	25
2	Dimensiones de fabricación .....	34
3	Pre diseño de mezclas .....	38
4	Resistencia a la compresión .....	43
5	Valores máximos de absorción inicial y absorción total de agua en 24 horas .....	47
6	Tabla de resultados del ANOVA .....	49
7	Análisis ANOVA. Compresión .....	49
8	Resultados ANOVA. Compresión .....	50
9	Tabla t de Student .....	50
10	Análisis ANOVA. Absorción inicial .....	51
11	Análisis ANOVA. Absorción total en 24 h .....	51
12	Resultados ANOVA. Absorción inicial .....	51
13	Resultados ANOVA. Absorción total en 24 h .....	52
14	Parámetros físico-químicos .....	54
15	Resultados de análisis microbiológicos .....	54
16	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos ..	55
17	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión .....	56
18	Resultados de la prueba de absorción inicial .....	58
19	Diseño de mezclas .....	59
20	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión .....	60
21	Resultados de la prueba de absorción inicial y total .....	62
22	Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos sustentables .....	66
23	Integración del precio unitario del ladrillo sustentable .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Relleno sanitario .....	11
2	Lodos residuales .....	15
3	Planta Bio Pappel Tizayuca .....	29
4	Localización Planta Bio Pappel Tizayuca .....	30
5	Diagrama de flujo de la metodología .....	31
6	Muestreo de lodos .....	32
7	Plano con dimensiones de fabricación .....	34
8	Máquina artesanal de ladrillos .....	35
9	Desecador solar .....	35
10	Análisis de DQO .....	36
11	Análisis de pH .....	36
12	Análisis de coliformes fecales .....	36
13	Proceso constructivo .....	37
14	Homogenización de la mezcla .....	39
15	Acomodo de la mezcla .....	39
16	Extracción de especímenes .....	40
17	Secado de especímenes .....	40
18	Confinamiento de ladrillos .....	41
19	Ladrillos cabeceados .....	41
20	Prueba de compresión .....	42
21	Peso seco del ladrillo .....	44
22	Recipiente y barras niveladas .....	44
23	Ladrillo sumergido .....	45
24	Peso húmedo del ladrillo .....	45
25	Ladrillo sumergido .....	46
26	Secado superficial del ladrillo .....	46
27	Masa del espécimen sumergido .....	47
28	Mezcla A1 .....	56
29	Mezcla A2 .....	56
30	Comparativa de resistencia a compresión del pre diseño de mezclas .....	57
31	Ladrillos de la mezcla A5 .....	57
32	Comparativa de absorción de agua máxima inicial del pre diseño de mezclas .....	58
33	Comparativa de resistencia a compresión del diseño de mezclas .....	60

34	Resistencia a la compresión .....	61
35	Comparativa de absorción total a 24 h del diseño de mezclas .....	62
36	Comparativa de absorción de agua máxima inicial del diseño de mezclas .....	63
37	Absorción total .....	63
38	Prototipo de maseta ambiental .....	64



## **1. INTRODUCCIÓN**

Durante la manufactura de los productos de papel, se generan residuos que requieren un reúso o reciclaje apropiado, entre los cuales se encuentran los lodos provenientes de sus plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), compuestos principalmente por residuos celulósicos. Cerca de 3 millones de toneladas de lodo se descargan por año en Japón, y aproximadamente 8 y 2 millones de toneladas en Estados Unidos y el Reino Unido, respectivamente (Barton y Seeker, 1991; Tebbutt, 1995). En México tan solo tres industrias papeleras situadas alrededor de la Ciudad de México producen alrededor de 58 mil toneladas al año de lodo (Marín, 2011).

El lodo está constituido por fibras orgánicas, materiales inorgánicos y cerca de 60% es agua (Singh y Garg, 1999). Una alternativa para su manejo es incinerar los lodos, las cenizas resultantes son útiles en la industria cementera, agregados ligeros en la industria de la construcción, mejorador de suelos y otras aplicaciones minoritarias, pero la mayor parte es depositada en rellenos sanitarios (Kikuchi, 2001).

### **1.1 Justificación**

Es evidente que en el estado de la técnica se necesita establecer un método que permita aprovechar del "todo" los lodos y así evitar que éste sea dispuesto en vertederos cercanos a las industrias papeleras o su incineración, afectando el ambiente. Específicamente, se requiere un proceso que emplee altos porcentajes de lodo y, por ende, ayude a solucionar el problema ambiental generado por la enorme cantidad de residuos de la industria papeleras generados anualmente.

En virtud de lo anterior, se requiere de un método que permita maximizar el consumo de lodos para la producción de materiales de construcción u otras aplicaciones, optimizando el servicio ambiental de la celulosa, sin que ello implique altos consumos de energía, la adición de grandes cantidades de aglomerantes, la incorporación de compuestos ambientalmente no amigables, ni costos tan altos que lleven a que el proceso no sea rentable. Adicionalmente, es indispensable que el material obtenido cumpla con las condiciones de resistencia exigidas por la normatividad internacional.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La eliminación de este lodo es un problema constante para las fábricas de papel y para el ambiente en general. La práctica actual consiste en someter el lodo paplero a una operación de prensado mecánico como último proceso del tratamiento de éste en la papelera para eliminar el exceso de humedad. No obstante, el residuo resultante aún tiene gran proporción de agua de los materiales mencionados anteriormente. Según los procedimientos vigentes, el residuo así obtenido es normalmente depositado en rellenos sanitarios para el almacenamiento indefinido.

A la fecha se han reportado varios problemas asociados con este tratamiento del lodo de papel. En primer lugar, se está haciendo cada vez más difícil localizar los rellenos sanitarios adecuados, pues los rellenos existentes se llenan y los residentes frecuentemente se oponen a la expansión o creación de nuevos rellenos sanitarios cercanos a sus viviendas.



Figura 1. Relleno sanitario

Además, los materiales de lixiviación de los lodos depositados en dichos rellenos pueden representar riesgos a la salud o al ambiente. Esto aumenta el costo de la ingeniería de un relleno sanitario adecuado pues se requiere de manejo idóneo de los lixiviados de este tipo e incrementa las quejas de la comunidad aledaña y las preocupaciones por los efectos indeseables en el ambiente.

A pesar de que el lodo paplero tiene variedad de aplicaciones, ninguna cumple simultáneamente con los pilares del desarrollo sostenible donde se conjuga lo ambiental, con lo económico y lo social.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la factibilidad de reciclar los residuos celulósicos de la industria papelera en la elaboración de materiales de construcción.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Investigar las condiciones de generación y aprovechamiento de los lodos como material de construcción a nivel nacional e internacional.
2. Reciclar los lodos de las plantas de tratamiento de la industria papelera para fabricar materiales que se puedan emplear en la industria de la construcción como ladrillos sustentables, disminuyendo con esta actividad el impacto ambiental y generando un beneficio económico y social.
3. Realizar un análisis físico-químico y microbiológico de los lodos.
4. Elaborar los ladrillos de acuerdo con la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013, NMX-C-037-ONNCCE-2013 y NMX-C-038-ONNCCE-2013.
5. Proponer diferentes diseños de mezclas variando la proporción de RCD (Residuos de Construcción y Demolición) y lodos hasta obtener la mezcla óptima.
6. Determinar resistencia y absorción de los ladrillos para uso no estructural basados en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013.
7. Identificar alternativas de manejo, tratamiento o disposición existentes y proponer las alternativas más adecuadas para los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales.
8. Analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental del material fabricado.

## 2. ANTECEDENTES

El lodo de aguas residuales se puede utilizar en combinación con sedimentos lacustres y ceniza para producir ladrillos que cumplan con los requisitos del estándar chino. La incorporación de lodo de cenizas y aguas residuales en los sedimentos lacustres redujo la contracción por secado lineal del adobe, pero al mismo tiempo aumentó la absorción de agua y disminuyó la resistencia a la compresión y la resistencia a las heladas de los ladrillos cocidos (Zhang y Jia, 2016).

Actualmente en Bangladesh, los lodos de curtiduría son utilizados como estabilizadores en productos para la fabricación de ladrillos de arcilla (Ariful Islam, 2017), en donde se evalúa su idoneidad como material de construcción en función de su resistencia, absorción de agua, contracción, pérdida de peso en el encendido y densidad aparente; la mayoría de los casos cumplió con los criterios de Bangladesh y ASTM.

Es factible reutilizar los lodos del efluente textil para producir bloques de concreto que no soportan carga con una resistencia a la compresión y estabilidad de volumen aceptables cuando se utilizan los procesos de pretratamiento apropiados. Es un hecho que la resistencia a la compresión de los bloques de concreto disminuyó significativamente con el aumento del contenido de los lodos del efluente textil. Los resultados experimentales indicaron que el nivel de amoníaco en los lodos del efluente textil fue la principal causa de los efectos de debilitamiento. El proceso de pretratamiento con cal propuesto en este estudio puede reducir drásticamente las concentraciones de  $\text{NH}_4\text{-N}$  y mejorar las propiedades de los bloques. Los metales trazan tóxicos presentes en los lodos de efluentes textiles pueden estabilizarse bien mediante productos de hidratación del cemento (Zhan y Poon, 2015).

También se han empleado cenizas de lodo residual para reemplazar parcialmente el cemento para la construcción (Chen, 2018). Este estudio investigó las propiedades de bloques de concreto usando la ceniza de lodo residual como reemplazo de cemento junto con agregados de construcción y demolición reciclados o vidrio recuperado. Se realizaron evaluaciones de los beneficios técnicos y los riesgos de lixiviación con el fin de alentar el reciclado de materiales de desecho y mejorar la conservación de los recursos naturales. Los resultados de la investigación revelaron que la ceniza de lodo residual poseía actividad puzolánica moderada y aumentaba la resistencia a la compresión a largo plazo de los bloques. Estos resultados indican que el uso de ceniza de lodo residual puede producir bloques de pavimentación con propiedades mecánicas, de durabilidad y de lixiviación satisfactorias.

Se han hecho investigaciones sobre el aprovechamiento de estos lodos, por ejemplo, en Sudáfrica se tiene un estudio (Devi Gottumukkala, 2016), donde el lodo de papel como materia prima de biorrefinería reduce la cantidad de desechos de la industria del papel que va a los rellenos sanitarios, proporcionando una fuente de químicos renovables y biocombustibles y que genera ingresos adicionales para las fábricas de papel y celulosa. Se pueden lograr mejores resultados integrando tecnologías biológicas y térmicas para la producción de energía y productos de mayor valor con mejores rendimientos de conversión de carbono, aunque se requieren más investigaciones para mejorar la comprensión de estos procesos integrados. La implementación de estas tecnologías requiere una inversión sustancial y, por lo tanto, se requiere un enfoque sistemático con evaluaciones tecno económicas para garantizar el mejor rendimiento financiero posible para la industria.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Lodo residual

Lodo residual es el residuo sólido, semisólido o líquido que se genera por el tratamiento de las aguas residuales. Su composición depende principalmente de las características del agua residual afluente y del proceso de tratamiento utilizado en la planta que lo genera. Uno de los problemas para el uso y manejo de los lodos es su alto contenido de patógenos, por lo que se requiere su estabilización (reducción de microorganismos patógenos) (Donado, 2013).



Figura 2. Lodos residuales

#### 3.2 Clasificación de los lodos

Los lodos pueden ser clasificados en tres categorías: aprovechables, no aprovechables y peligrosos (Oropeza García, 2006).

- **Lodos aprovechables:** Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que pueden ser reutilizados directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de

tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos.

- **Lodos no aprovechables:** Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico en rellenos sanitarios. En esta categoría se encuentran los retenidos por rejillas gruesas y finas de las plantas de tratamiento.
- **Lodos peligrosos:** Son aquellos que contienen sustancias que pueden causar daño a la salud humana o al ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad.

### 3.3 Biosólidos

Son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento (NOM-004-SEMARNAT-2002).

La calidad de los biosólidos depende fundamentalmente de grupos de contaminantes que pueden presentarse:

- Agentes patógenos
- Metales pesados
- Contaminantes orgánicos



Los biosólidos son el resultado de la extracción de la materia sólida de las aguas residuales, por lo tanto, dependiendo de dónde provengan estas aguas se tendrá presencia o no de los contaminantes mencionados (Donado, 2013).

### **3.4 Problemática de los lodos en México**

En México se estima que los lodos residuales generados por las 2,029 plantas de tratamiento que tratan el 37% de las aguas residuales que se captan en el sistema de drenaje (88 m<sup>3</sup>/s) son entre 640,000 y 10 millones de toneladas por año. Tal discrepancia se debe a que en ocasiones la cantidad reportada está en peso seco y en otros casos no se menciona el contenido de humedad, de tal suerte que no existe un dato oficial sobre la cantidad de lodos residuales y biosólidos generados.

Adicionalmente los reportes no incluyen información sobre el tratamiento que reciben los lodos residuales, su disposición y/o aprovechamiento final; independientemente de su tratamiento, es depositado en rellenos sanitarios (Rojas-Valencia, 2012).

La industria papelera utiliza en la fabricación de sus productos materias primas, que son fibras de madera y papel reciclado, gomas, pegamentos y colorantes entre otros, en concentraciones elevadas que durante el proceso o al final de él deben ser lavadas produciendo las "aguas blancas", tal como se establece en el manual de tratamiento de aguas negras, del Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (1998). Estas aguas deben tratarse antes de ser vertidas a un cauce o antes de ser reincorporadas al proceso, debido a que generan como residuo un lodo compuesto básicamente por materiales celulósicos, arcillas, materiales húmicos, productos químicos de la coagulación y microorganismos. La cantidad de humedad presente en el lodo al final del proceso de

tratamiento alcanza a ser del 45 % después de su deshidratación con un sistema de filtro prensa.

Desde el siglo XX la disposición de estos residuos se ha convertido en un problema ambiental y social, ya que las características físico-químicas y mecánicas del lodo le imprimen un comportamiento variable al estar expuesto a condiciones ambientales, dado su proceso normal de descomposición; esta situación genera riesgos de inestabilidad cuando se le dispone sobre zonas de ladera, por lo que es necesario disponerlo en rellenos sanitarios. Uno de los principales efectos de esta disposición en suelos es la afectación de las propiedades de los suelos y la contaminación de corrientes de aguas cercanas a causa de la lixiviación; sumado a lo expuesto, las grandes cantidades producidas diariamente hacen que sea considerado un residuo especial por lo que se requieren alternativas de uso y valorización diferentes a la disposición final (Quinchia, 2007).

### **3.5 Aprovechamiento de los lodos**

Se ha estudiado que, para producir ladrillos, el porcentaje de lodo más adecuado para hacer la mezcla con arcilla es de entre 5% y el 10% (García, 2010). También se ha encontrado que el lodo residual puede ser utilizado en la elaboración de cerámica porosa, zeolitas con altas propiedades de intercambio catiónico, pigmento de compuestos poliméricos, carbón activado, entre otros (Kameshima, 2007).

En Brasil, se realizó una evaluación de la posibilidad de reciclar lodos de tratamiento de agua en plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición (Sales, 2009). Se determinó la resistencia a la compresión axial y la absorción de agua del concreto y mortero producidos con la adición exclusiva y conjunta de estos dos tipos de residuos. La ecoeficiencia de este

reciclaje se evaluó determinando la concentración de aluminio en el extracto lixiviado resultante de la solubilización de los productos reciclados. La producción de concretos y morteros con la adición conjunta de lodos de tratamiento de agua y agregados de escombros de concreto reciclado resultó ser una alternativa de reciclaje viable desde el punto de vista de la resistencia a compresión axial, módulo de elasticidad, absorción de agua y resistencia a la tensión por el método de prueba brasileño.

Últimamente se han hecho trabajos donde se utilizaron lodos de plantas potabilizadoras (Martínez, 2016), para producir concretos ligeros con agregados vitrocerámicos, donde indican que no hay diferencias significativas, lo que permite afirmar que los agregados naturales pueden ser sustituidos en un 100% sin comprometer las propiedades del concreto y que este material (concreto con agregados vitrocerámicos) puede ser utilizado en las mismas aplicaciones que el de agregado natural.

### **3.6 Generalidades de los lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria papelera**

Cada año la industria de la celulosa y papel genera millones de toneladas métricas secas de lodos, como subproducto de desecho, siendo los Estados Unidos el mayor generador. Se estima que la generación de este lodo aumente en los próximos 50 años entre un 48% y 86% sobre los valores actuales debido en mayor parte al crecimiento económico de la región del este de Asia (Mabee, 2001; Suriyanarayanan, 2010).

Los lodos de papel pueden ser utilizados para mejorar las propiedades del suelo, ya que tienen un alto contenido de carbono, proporcionando efectos benéficos en los suelos que son deficientes en materia orgánica. La naturaleza de los lodos generados por las industrias

papeleras depende de la materia prima utilizada en las diferentes unidades de proceso (Suriyanarayanan, 2010). El lodo contiene una gran cantidad de compuestos principalmente fibras de celulosa ( $[C_6H_{10}O_5]_n$ ) y materiales inorgánicos como la caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), anortita ( $CaAl_2SiO_8$ ), gelenita ( $Ca_2Al_2SiO_7$ ), talco ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), componentes amorfos y cristalinos de  $CaO$  ( $MgO$ )- $Al_2O_3$ - $SiO_2$ .

Teniendo en cuenta que la acumulación de lodos papeleros no gestionados puede ocasionar daños al ambiente, es necesario abordar este tema desde el reciclaje, en el cual son incorporados en la estructura interna de los materiales de construcción como sustitutos sostenibles a los materiales de construcción tradicionales, reduciendo su costo de fabricación, sin comprometer su estructura. Investigaciones muestran que adicionar fibras vegetales aumenta la resistencia mecánica, produce materiales compuestos más ligeros y reduce la cantidad de energía utilizada al fabricar los materiales de construcción (Vinay, 2005).

La industria europea del papel genera alrededor de 11 millones de toneladas de residuos al año, el 70% de los cuales proviene de la producción de papel reciclado. El desecho es muy diverso en su composición y consiste en rechazos, diferentes tipos de lodos y, en el caso de incineración en el sitio, cenizas. La producción de pulpa y papel a partir de pulpa virgen genera menos residuos y el desecho tiene las mismas propiedades que el desecado, aunque con menos contenido inorgánico. Dentro de la Unión Europea, se tiene una gran influencia en la estrategia de gestión de residuos de las empresas productoras de papel. A través de la legislación, la opción de rellenos sanitarios es restringida. Debido a las grandes cantidades de desechos generados, el alto contenido de humedad de los desechos y la composición cambiante, algunos métodos de recuperación, por ejemplo, la conversión a componentes de combustible, son simplemente demasiado caros y su impacto ambiental incierto.

Los procesos térmicos, la gasificación y la pirólisis parecen ser opciones emergentes interesantes, aunque aún es necesario mejorar las tecnologías para su aplicación en lodos.

Otras aplicaciones, como la hidrólisis para obtener etanol, tienen varias ventajas (uso de lodo húmedo y tecnología aplicable a los lodos), pero estas no están bien desarrolladas para los lodos de pulpa y papel. Por lo tanto, en este momento, la minimización de la generación de residuos sigue teniendo la más alta prioridad (Monte, 2008).

El lodo de la industria papelera es aplicable para la elaboración de ladrillos porque incluye en su composición carbonato cálcico que es un mineral insoluble de origen natural el cual proviene de yacimientos de Carbonato de Calcio, es utilizado en la industria papelera incorporado como un aditivo a los papeles que se están fabricando, con el fin de mejorar principalmente la blancura y la calidad de impresión del papel, el cual introduce mejoras en la estructura interna de los materiales de construcción, mejorando la eficiencia energética de la producción de estos materiales e influyendo en las propiedades físico-mecánicas finales del producto aumentando su resistencia, y durabilidad (Garnica, 2013).

El aumento del contenido de lodo de papel en la mezcla de arcilla proporciona al material propiedades mejoradas con respecto a su aislamiento térmico y acústico, pero a su vez disminuye su resistencia mecánica. Sin embargo, esta fragilidad del material se ve compensada por una mayor moldeabilidad, una propiedad que puede ser una ventaja cuando se utiliza el material cerámico, por ejemplo, para hacer canaletas para el cableado en edificios (Cusidó, 2015).

En Medellín, se evaluó la incorporación del lodo paplero como carga en materias primas poliméricas comerciales, considerando porcentajes industriales, en donde se demostró que

éste puede reemplazar la carga tradicional, superando el porcentaje de aplicación normal sin comprometer la calidad del producto y las propiedades de éste. El estudio mostró que el lodo de papel mezclado con polímero como el PVC, permite ser peletizado para luego ser manufacturado en productos industriales. El proceso de mezclado del lodo/ polietileno dio como resultado productos que pueden ser empleados a nivel doméstico e industrial (Quinchía-Figueroa, 2012).

El uso del lodo de papel como materia prima en la industria de la construcción es factible. Considerando el costo enorme, la complejidad involucrada en el tratamiento y los factores ambientales, se puede demostrar que el uso potencial de lodo de papel en la industria de la construcción es un sustituto del tratamiento y eliminación de lodos de papel y proporcionaría una amplia solución al problema de los desechos y proteger el ambiente con una materia prima condensada o de bajo costo. En Bangladesh, la industria de producción del papel es la principal fuente de producción de lodo de papel. A veces venden este producto a un precio muy bajo o lo tiran después del proceso de producción. La industria del cemento no debería depender más del yeso natural para la producción (Sikder, 2016).

### **3.7 Plantas papeleras en México**

En México existen ocho empresas dedicadas a la fabricación de papel, que son:

1. **APSA S.A. de C.V.:** es una empresa mexicana constituida en 1975. Su actividad inicial y actual, está enfocada hacia la transformación de papel para usos específicos entre ellos: papelería, empaque, embalaje de materiales y productos de distintas industrias. Su sistema de calidad está basado bajo los más altos estándares, sus productos son sustentables y ecológicos lo que ayuda al ciclo de reciclaje del papel.

2. **CECSO S.A. de C.V.:** es una empresa que trabaja con tecnología de reciclaje y en el proceso utiliza productos reciclados; para la impresión de las cajas utilizan tintas no tóxicas y biodegradables, además cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los empaques producidos son reciclables, con lo cual contribuyen a disminuir la tala de árboles permitiendo que se evite la deforestación de los bosques, ya que por cada tonelada de papel reciclado se evita la tala de 17 árboles en etapa madura.

Cuenta con cuatro plantas: Fábrica de cajas Navjoa, Fábricas de cajas Hermosillo, Fábrica de cajas Tijuana y Fábrica de papel.

3. **CELLUFIBRA:** es una empresa que se dedican a la fabricación de papel, así como cuadernos, blocks, cartulinas y diversos materiales escolares. Cuenta con una fábrica en Ixtapaluca, Estado de México.

4. **COPAMEX:** se inició en el año de 1928 siendo en sus inicios una "Fábrica de bolsas" para convertirse en una fábrica de papel, se especializa en el desarrollo de diversos tipos de papeles y en la actualidad también maneja una división de desarrollo sustentable.

Cuenta con siete plantas en toda la República Mexicana: Industrias Planta Monterrey; PONCEL; Papelera Chihuahua; COPAMEX Corrugados Planta México; COPAMEX Corrugados Planta Monterrey; Comercial Recicladora Planta Monterrey.

5. **Manufacturas 8-A S.A. de C.V.:** es una empresa fundada en 1933 cuya actividad es la fabricación y transformación de papel. Actualmente la planta matriz está ubicada en un terreno de 50,000 metros cuadrados en el Parque Industrial Lerma, en el Estado

de México, a 48 km de la Ciudad. de México. Es la principal fábrica de Papel Crepé en México.

6. **Fábrica de Papel San José S.A. de C.V.:** fundada en el año de 1954, empresa mexicana que contribuye con la preservación del medio ambiente a través del reciclado de envases multicapa. A través de los años ha innovado en sus procesos para la elaboración de papel y celulosa 100% reciclados, siendo en la actualidad la única empresa en México que produce este tipo de papel para escritura e impresión, así como celulosa para manufactura. Cuenta con una planta en el Estado de México.
7. **Fábricas de papel Potosí:** es una empresa mexicana con más de 30 años de experiencia en la fabricación de papel tissue y su conversión en productos derivados de papel, principalmente papel higiénico, servilleta blanca, servilleta impresa (servilleta publicitaria), papel institucional y blondas. Cuenta con una planta en San Luis Potosí.
8. **Bio Pappel:** es el productor más grande de papel en México, produce diferentes tipos de papel, incluyendo papel periódico, papel bond, papel café, sacos kraft, empaques de cartón corrugado, cuadernos, sacos y otros productos. Cuenta con 27 plantas industriales distribuidas en 15 estados de México y 3 más en Estados Unidos.

### **3.8 Bio Pappel**

Como se mencionó anteriormente, Bio Pappel cuenta con 27 plantas localizadas en México y Estados Unidos. En la tabla 1 se enlistan todas.



Tabla 1. Plantas Bio Pappel

Estado	Packaging	Printing	Kraft	Acopio	Corp.	
Baja California	Mexicali	Planta				
Chiapas	Tapachula	Planta				
Chihuahua	Chihuahua	Planta				
Coahuila	Torreón				Centro	
Ciudad de México	Polanco					Oficina
Ciudad de México	San Esteban				Centro	
Ciudad de México	Vallejo		Planta		Centro	
Durango	Durango			Planta	Centro	
Estado de México	Barrientos	Planta				
Estado de México	Izcalli	Planta				
Estado de México	Juárez	Planta				
Estado de México	Toluca				Centro	
Estado de México	Tultitlán	Planta				
Guanajuato	Bajío	Mega Planta				
Guanajuato	León				Centro	
Hidalgo	Apazco	Planta				
Hidalgo	Tizayuca	Mega Planta		Planta		
Hidalgo	Tula	Planta				
Jalisco	Atenquique			Planta		
Jalisco	Cd. Guzmán	Planta				
Jalisco	Guadalajara	Mega Planta			Centro	
Jalisco	Tepatitlán	Planta				
Jalisco	Zapopan				Centro	
Nuevo León	Apodaca	Planta				
Nuevo León	Apodaca	Mega Planta				
Nuevo León	Guadalupe				Centro	
Nuevo León	Monterrey			Planta		
Nuevo León	San Nicolás	Planta				
Oaxaca	Tuxtepec		Planta			
Puebla	Puebla				Centro	
Querétaro	Querétaro	Planta				
Sinaloa	Culiacán	Planta				
Veracruz	Tres Valles		Planta			
Arizona	Phoenix				Centro	
Colorado	Colorado Springs				Centro	
Nuevo México	Albuquerque				Centro	
Estado	Packaging	Printing	Kraft	Acopio	Corp.	

Tabla 1. Plantas Bio Pappel. (Continuación)

Estado	Packaging	Printing	Kraft	Acopio	Corp.	
Nuevo México	Prewit			Planta		
Texas	El paso				Centro	
Texas	Río Grande				Centro	
	TOTAL	19	3	5	15	1

De acuerdo con datos de la empresa, el índice nacional de recolección de papel de 34% en el año 1995, pasó a 46% en el año 2009, y a 55% en el año 2015.

### **Proceso**

El proceso de producción es el siguiente: La planta cuenta con dos calderas de 758 toneladas por hora y una caldera de biomasa de 40 toneladas por hora, las dos primeras queman combustóleo, y la tercera quema residuos orgánicos sólidos obtenidos del proceso. Cuenta además con dos turbogeneradores, con los que se produce el 70% de las necesidades de energía eléctrica de la planta, el restante 30%, es obtenido de la Comisión Federal de Electricidad.

Otro de sus componentes es una planta de tratamiento de aguas residuales, que consta de un clarificador primario y una laguna de aireación extendida, la cual fue rediseñada, con una capacidad de 250 litros por segundo. El agua se obtiene de un afluente del Río Papaloapan, que se trata antes de utilizarse por medio de un sistema con capacidad para procesar 23 mil litros por minuto.

Una de sus características principales es el diseño del Pulper, el cual permite la remoción de los materiales contaminantes como plástico, cartón, cintas, flejes, sin dañar las propiedades fundamentales de las fibras.

Para la recepción de fibras se cuenta con sistema de transporte terrestre. Al llegar el material, se realiza una inspección de calidad de acuerdo con normas internacionales. Se coloca en una banda de selección donde se eliminan los materiales no aptos y prohibidos para el proceso, mediante una selección manual.

El siguiente paso es colocar las fibras recicladas en el Pulper continuo, donde son alimentadas a un tambor rotatorio que gira a una velocidad de 12.5 revoluciones por minuto y tiene un tiempo de retención de 20 minutos, en este punto se aplican agua y químicos. Cuenta con un sistema que permite la separación de contaminantes, como plásticos, maderas, metales y otros materiales, cuyo tamaño sea mayor a seis milímetros, siendo estos compactados para su disposición.

Continua con una etapa de depuración, proceso donde se eliminan contaminantes mayores a 0.15 milímetros sin importar la forma que tengan. Consta de seis limpiadores de alta densidad: tres depuradores de barrenos de 16.6 milímetros y tres depuradores con ranuras de 0.15 milímetros.

El proceso sigue en un equipo para pre-flotación y limpieza centrífuga a baja densidad, cuyo objetivo es eliminar partículas de tinta mediante burbujas de aire con la ayuda de un destintante. La limpieza centrífuga de baja densidad se encarga de separar contaminantes pesados del tamaño de un grano de arena, mediante presión diferencial. Este equipo consta de 266 limpiadores con un diámetro de 77 milímetros en cuatro pasos: lavado, espesado, dispersión, y blanqueo.

El proceso de lavado se lleva a cabo en dos lavadoras de tambor que concentra la pasta de 1% a 4% de sólidos. El espesado se realiza en una prensa de tornillo, que eleva los sólidos

hasta 30%, y como paso siguiente la pulpa es tratada en un dispersor el cual rompe las partículas grandes de tinta y dispersa las gomas. Para el blanqueo con peróxido, el objetivo es limpiar la pulpa aplicando una solución con un tiempo de retención de tres horas, con temperatura mínima de 80°C.

Continúa con un proceso de post-flotación, cuyo objetivo es igual que el de pre-flotación, es decir, eliminar partículas de tinta. Debido a la calidad requerida para fabricar ciertos papeles, se hace necesario un segundo paso de lavado, espesado y dispersión, lo que permite tener una pasta que cumple con estándares internacionales de calidad. Una de las principales virtudes de esta unidad productiva es su sistema de clarificación de agua, que permite reutilizar el 90% del agua que se emplea en el proceso, y sólo se repone el 10% restante. Además de contar con un sistema primario de eliminación de sólidos.

Finalmente se traslada el material obtenido a la máquina de papel, la cual cuenta con una capacidad para producir más de 160 mil toneladas anuales en formatos acordes a las necesidades del cliente.

### **Tratamiento de agua**

La fabricación de papel conlleva procesos de producción intensivos en el uso de agua. Sin embargo, en Bio-PAPPEL se utiliza la más alta tecnología de sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como procesos "cero-efluentes" para maximizar su uso y reutilizar una y otra vez el agua en los procesos industriales.

### 3.8.1 Planta Bio Pappel Tizayuca

Para este proyecto se contó con la cooperación de la planta Bio Pappel Tizayuca, dicha planta está localizada en el estado de Hidalgo. En la figura 3 se puede observar las instalaciones de la planta y el sitio donde se van depositando los lodos; y en la figura 4 la ubicación de la planta.

a)



b)



Figura 3. Planta Bio Pappel Tizayuca



Figura 4. Localización Planta Bio Pappel Tizayuca

## 4. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este proyecto se dividió en cinco etapas principales las cuales se describen en la figura 5.

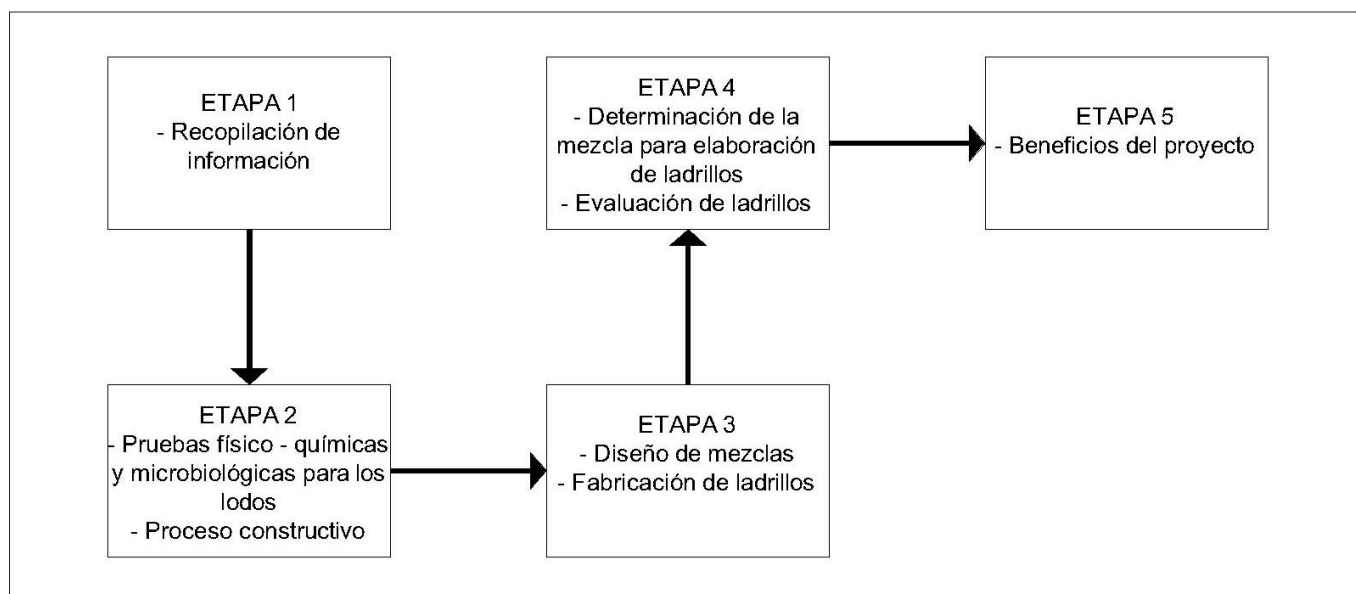


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología

### 4.1 ETAPA I. Recopilación y Análisis de Información

En esta etapa se recopiló la información necesaria para establecer la base teórica que sustentará la investigación, considerando fuentes como las siguientes:

- Normatividad Aplicable como: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Reglamento en Materia de Impacto Ambiental de la LGEEPA, Ley Ambiental del D.F., Reglamento de Impacto Ambiental y Riesgo del D.F., Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), Ley de Residuos Sólidos del D.F. (LRSDF), Reglamento de Construcciones para el D.F., Código Financiero del Distrito Federal y Normas Oficiales Mexicanas aplicables.

- Estudios sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México. Manuales de procedimientos de pruebas de concreto en laboratorio, extranjeras como los de ASTM y nacionales como las de la SCT.
- Instituciones gremiales y profesionales como: la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Colegio de Ingenieros Civiles de México, Colegio de Arquitectos de México.
- Sitios web consultando páginas especializadas y publicaciones.

En esta etapa se definió el sitio donde se realizaron los muestreos de lodos de la industria papelera (Ver figura 6), en este caso el sitio seleccionado fue, la empresa Bio Pappel, ubicada en el municipio de Tizayuca, Hidalgo.

a)



b)



Figura 6. Muestreo de lodos



## **4.2 ETAPA II. Propuesta Experimental**

Con base en la recopilación y análisis de información en los cuales previamente trabajaron con lodos, se tomaron como base para plantear los diferentes diseños de mezclas, variando la proporción de agregados y agua.

Para esta etapa, se tomó como base los siguientes puntos:

- Para cada mezcla se utilizó un 20% de agua del total del peso del ladrillo.
- En la elaboración de la mezcla se trabajó con residuos de construcción (todo en uno  $\frac{1}{4}$ " a finos), ya que se han hecho trabajos que demuestran que es un buen material para la fabricación de ladrillos (Aquino, 2015; Aguilar, 2017).
- Definir el proceso constructivo.

En cuanto al lodo que se usó para la elaboración de los ladrillos, lo primero que se hizo fue secarlo, debido a que tenía demasiada humedad y esto podría generar problemas de exceso de agua en los especímenes. Añadiendo más información del por qué se deben secar los lodos, es que los lodos que provienen de la industria del papel tienen compatibilidad química con el cemento, ya que está compuesta principalmente por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; además de que la mejor manera de aprovechar los lodos es que estén en forma de cenizas. (Seabra y Buruberry, 2014).

### **4.2.1 Dimensiones de los ladrillos**

Las dimensiones de fabricación de los ladrillos que se utilizó, están basadas en la norma NMX-C-404-0NNCCE-2012, a continuación, se muestran las dimensiones del ladrillo (Ver tabla 2) y su caracterización (Ver figura 7).

Tabla 2. Dimensiones de fabricación

Dimensiones de fabricación	
Grueso	5 cm
Tizón	12 cm
Soga	26 cm

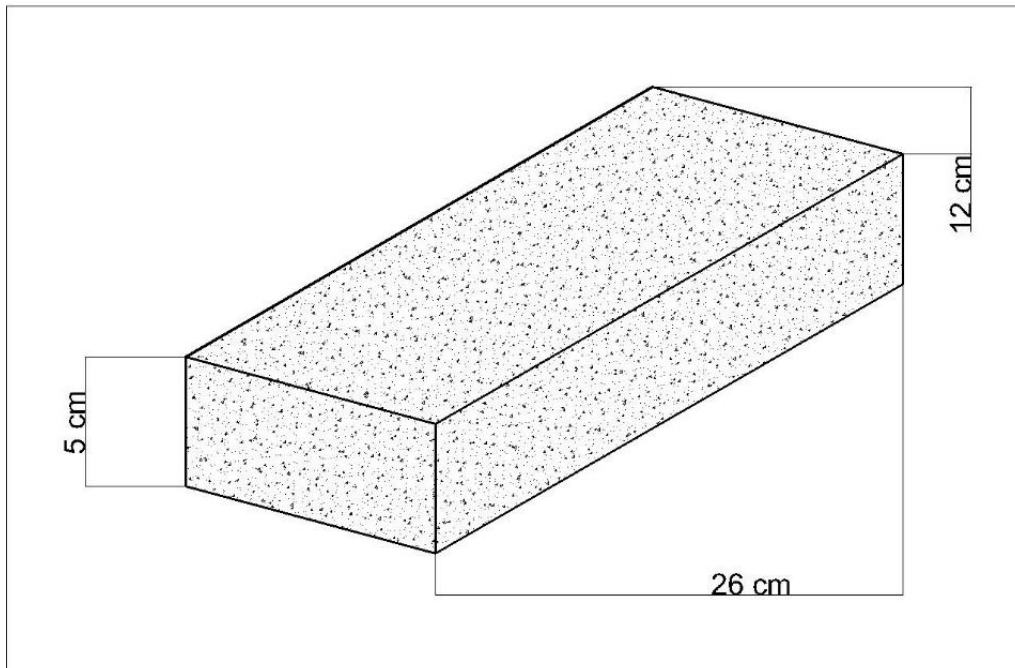


Figura 7. Plano con dimensiones de fabricación

#### 4.2.2 Moldeo de los ladrillos

El moldeo para la obtención del ladrillo se realizó con una máquina artesanal (Ver figura 8). Durante el periodo de secado se realizó el monitoreo de la variación diaria del peso y las dimensiones de cada espécimen fabricado; todo esto se realizó con la ayuda de un desecador solar diseñado exprofeso (Ver figura 9).



Figura 8. Máquina artesanal de ladrillos



Figura 9. Desecador solar

#### 4.2.3 Caracterización de lodos

En esta etapa, también se caracterizaron los lodos, a fin de conocer sus propiedades físico-químicas y microbiológicas, y con ello tener la confianza de no tener problemas de que alguien se pudiera contaminar al manipular las mezclas para la fabricación de ladrillos.

### **Análisis físico-químico**

Para este estudio, se elaboraron análisis de pH, conductividad, humedad, cenizas y DQO (Ver figuras 10 y 11).

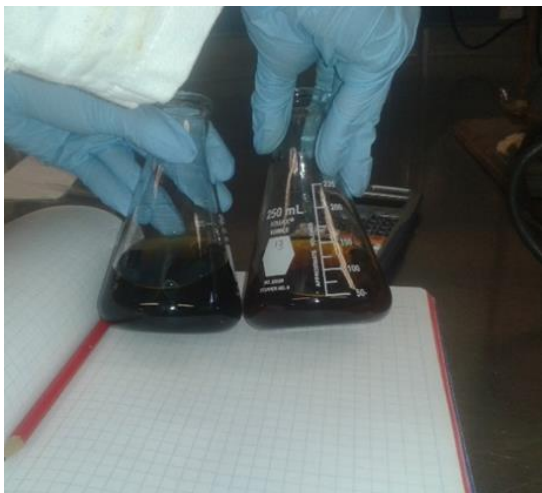


Figura 10. Análisis de DQO



Figura 11. Análisis de pH

### **Análisis microbiológico**

En cuanto a los microbiológicos se hizo el análisis de coliformes fecales y huevos de helmintos (Ver figura 12).



Figura 12. Análisis de coliformes fecales

#### 4.2.4 Proceso constructivo

En la figura 13 se puede apreciar el proceso constructivo que se utilizó en la fabricación y prueba de ladrillos.

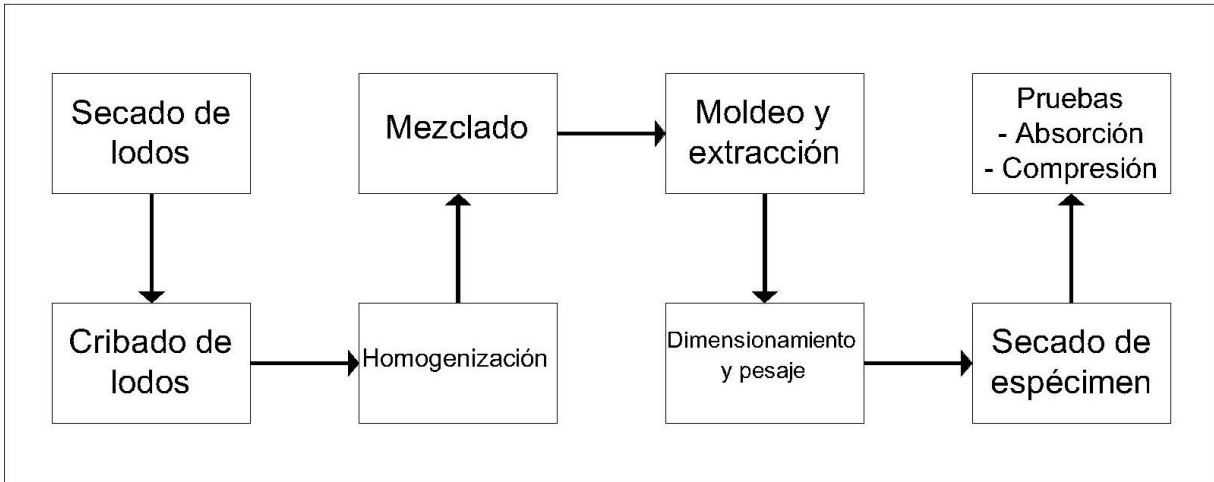


Figura 13. Proceso constructivo

#### 4.3 Etapa III Fabricación de ladrillos a partir de los lodos de la industria papelera

Considerando los materiales, el equipo y las dimensiones, se procede al diseño de mezclas, donde la variable principal será el uso de los lodos, esto con el fin de encontrar la cantidad idónea de lodo que se pueda utilizar para la elaboración de los ladrillos.

##### 4.3.1 Diseño de mezclas

Se diseñaron 9 mezclas variando las proporciones y el tipo de material empleado; en las primeras 2 mezclas se empleó mayor proporción de lodos, esto con el fin de verificar si con mayor cantidad de lodos es posible elaborar ladrillos; el resto de las mezclas se realizaron con variaciones tanto de los residuos de construcción (todo en uno ¼" a finos), como de cal y cemento. Por cada mezcla propuesta, se fabricaron 8 ladrillos, esto para realizar las pruebas

de compresión y de absorción. En la tabla 3 se observan las mezclas propuestas y los materiales empleados en cada una de ellas.

Tabla 3. Pre diseño de mezclas

Mezcla	% Lodo	%Cemento	% Cal	% Suelo (RC todo en uno ¼" a finos)
A1	92	4	-	4
A2	92	-	4	4
A3	40	30	30	-
A4	20	24	24	32
A5	5	7	7	81
A6	5	8	8	79
A7	7	8	8	77
A8	7	9	9	75
A9	7	5	13	75

#### 4.3.2 Fabricación de ladrillos

Una vez definidos los materiales a utilizar, dimensiones de los especímenes y el equipo de fabricación, se inició con las pruebas preliminares.

#### Elaboración de especímenes

- a) Se elabora la mezcla de acuerdo con las proporciones indicadas desde un principio, en este caso, se hicieron las mezclas de dos maneras distintas: en un bote de 20 litros y en una tarima de 2 x 1.5 m. En el caso del bote se utilizó para homogenizar la mezcla una cuchara y en el de la tarima, se utilizó una pala. Realizando la homogenización se debe alcanzar la consistencia adecuada para seguir con el siguiente paso, que es el moldeo de los especímenes.



Figura 14. Homogenización de la mezcla

- b) En el moldeo de especímenes se utilizó la máquina moldeadora, donde se iba depositando la mezcla con ayuda de la cuchara hasta alcanzar la altura exacta; teniendo dicha altura se pasa a texturizar la superficie.



Figura 15. Acomodo de la mezcla

- c) Teniendo la altura correcta y la superficie texturizada, se pasa a cerrar el molde y se ejerce presión con la palanca de la máquina hasta que llegue a un punto donde ya no se pueda ejercer más presión. Por último, se destapa la máquina y se extrae los

especímenes con ayuda de la palanca, pero teniendo cuidado de que no se dañen los ladrillos.



Figura 16. Extracción de especímenes

d) Extrayendo los ladrillos, se pasa a acomodarlos para que permanezcan en el desecador solar durante 15 días, teniendo en cuenta que a los 3 días de secado se realiza el cambio de posición del ladrillo sobre su canto. En este proceso se monitorea sus pesos y dimensiones, considerando que no debe de haber mayor pérdida de peso o cambio en sus dimensiones.



Figura 17. Secado de especímenes



### 4.3.3 Pruebas técnicas

Teniendo los especímenes secos, se pasa a realizar las pruebas de resistencia a la compresión y de absorción; dichas pruebas se basaron en las normas NMX-036-ONNCCE-2013 y NMX-C-037-ONNCCE-2013, respectivamente.

#### **Prueba de resistencia a la compresión**

Para la prueba de compresión, los ensayos se hicieron a los 28 días de la fecha de elaboración de los especímenes, dicho ensayo se basó en la norma NMX-036-ONNCCE-2013 y la prueba se realizó en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería.

A continuación, se presentan los pasos que se siguieron para la prueba de compresión:

- a) Para hacer este ensayo es necesario “cabecear” los ladrillos (Ver figura 18 y 19), esto se hace elaborando una mezcla de yeso-cemento con una proporción 4:1; después se confinan los ladrillos con piezas de madera por sus cuatro lados, verificando que estén al mismo nivel para agregar la mezcla en sus superficies. Ya agregada la mezcla, se debe cuidar que el nivel permanezca en el nivel establecido con las piezas de madera.



Figura 18. Confinamiento de ladrillos



Figura 19. Ladrillos cabeceados

b) Ya estando secas ambas caras del ladrillo, se pasa a realizar las pruebas de compresión de los ladrillos (Ver figura 20), para la cual se coloca el ladrillo al centro de la superficie del equipo de compresión axial, después se coloca sobre el ladrillo una placa metálica de 3 cm de espesor y finalmente se inicia con la aplicación gradual de la carga. La prueba se da por finalizada cuando el ladrillo presenta las primeras fisuras.



Figura 20. Prueba de compresión

c) Realizada la prueba de compresión a los especímenes, se obtienen los resultados de carga en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  soportados por los ladrillos antes de presentar fallas o fisuras, es decir, su máxima resistencia de carga. El resultado de la resistencia a la compresión se obtiene dividiendo la carga máxima soportada en kg entre el área de la superficie en  $\text{cm}^2$  sobre la cual se aplicó la carga, de acuerdo con la ecuación 1.

$$f_p = P / A \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde:

$f_p$  = es el esfuerzo resistente a la compresión,  $\text{kg/cm}^2$

P = es la carga máxima, kg

A = es el área bruta transversal del espécimen,  $\text{cm}^2$

En la Tabla 4 se muestran los valores que indica la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 respecto a la resistencia a la compresión, en este caso el tipo de pieza es tabique artesanal.

Tabla 4. Resistencia a la compresión

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media $f_p$ Mpa ( $\text{kg/cm}^2$ )	Resistencia mínima individual $f_p$ Mpa ( $\text{kg/cm}^2$ )
Bloque	Macizo o hueco	3.5 (35)	2.8 (28)
Tabique extruido	Macizo o hueco	4.0 (40)	3.2 (32)
Tabique artesanal	Macizo	3.0 (30)	2.4 (24)
Pieza para celosía	Cara rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)
	Cara no rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)

### **Prueba de absorción inicial**

La prueba de absorción inicial de agua en los especímenes, se basó en la norma NMX-037-ONNCCE-2013 y se llevó a cabo en el edificio 8 del Instituto de Ingeniería.

A continuación, se presentan los pasos que se siguieron para la prueba de absorción:

- a) Primero, se obtiene el peso seco al ambiente del ladrillo (Ver figura 21); se debe tener un recipiente, el cual debe ser rectangular con un área no menor  $1936 \text{ cm}^2$  y con una profundidad de 1.3 cm; antes de colocar el ladrillo dentro del recipiente, se deben colocar dos barras de metal inoxidable de longitud entre 12.7 cm y 15.3 cm cuya altura debe ser de 6 mm.



Figura 21. Peso seco del ladrillo

- b) Teniendo el recipiente y las barras (Ver figura 22), se llena dicho recipiente con agua potable de manera que el nivel del agua se encuentre entre 3 y 4 mm arriba del nivel superior de los apoyos de metal; para esto se ajusta la posición de los soportes y del nivel de agua requerido con una pieza de referencia en estado saturado.



Figura 22. Recipiente y barras niveladas

- c) Se pone el ladrillo en contacto con el agua (Ver figura 23), sumergiendo una cara de acabado liso de manera tal que quede 5 mm por debajo del nivel del agua por un periodo de 10 minutos, contando el tiempo de contacto desde el momento que el ladrillo toca la superficie del agua. En este paso se debe revisar que el nivel del agua se mantenga en el límite establecido.



Figura 23. Ladrillo sumergido

- d) Pasado el tiempo de contacto, se retira el ladrillo, removiendo el exceso de agua de la superficie expuesta con un trapo húmedo, esta operación se debe realizar en menos de 15 segundos. Posteriormente se pesa el ladrillo, registrando el peso húmedo. La operación de secado y pesado no debe ser mayor de 2 minutos.



Figura 24. Peso húmedo del ladrillo

### **Prueba de absorción total en 24 h**

En el caso de la prueba de absorción total de agua en los especímenes, dicho ensayo se basó en la norma NMX-037-ONNCCE-2013 y se llevó a cabo en el edificio 8 del Instituto de Ingeniería.

A continuación, se presentan los pasos que se siguieron para la prueba de absorción total:

- a) Primero, se sumerge el espécimen en agua a una temperatura entre 17 °C y 23 °C por un periodo de 24 horas.



Figura 25. Ladrillo sumergido

- b) Pasando las 24 horas, se saca el espécimen y se elimina el agua superficial con un papel absorbente; también se seca el interior de las celdas, posteriormente se pasa a determinar la masa saturada y superficialmente seca.



Figura 26. Secado superficial del ladrillo

- c) Para la obtención de la masa del espécimen sumergido, se tiene que atar con un alambre, cuya masa no sea mayor de 0.5 % de la masa de la pieza; y se cuelga de la horquilla del brazo de la balanza. El espécimen no debe rozar las paredes y el fondo del recipiente.



Figura 27. Masa del espécimen sumergido

En la tabla 5 se muestran los valores que indica la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 respecto a la absorción inicial y absorción total en 24 horas.

Tabla 5. Valores máximos de absorción inicial y absorción total de agua en 24 horas

Tipo de material	Absorción inicial para muros expuestos al exterior (g/min)	Absorción inicial para muros interiores o con recubrimiento (g/min)	Absorción total en 24 h en porcentaje
Concreto	5	7.5	25
Arcilla artesanal	-	-	25
Arcilla extruida o prensada	5	7.5	20

#### 4.4 ETAPA IV. Determinación y evaluación de la mezcla para la elaboración de ladrillos

Con los resultados del pre diseño de mezclas, se pasará al diseño definitivo de mezclas con el objetivo de obtener la mezcla ideal con la cual se trabajará y se fabricarán los ladrillos. Como se había mencionado anteriormente, la mezcla estará compuesta por lodo de la industria papelera, suelo (RC todo en uno ¼" a finos), cemento, cal y agua.

#### 4.4.1 Descripción del diseño estadístico del experimento

Para el diseño experimental se utilizó el análisis de la varianza (ANOVA), el cual permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias significativas o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren.

El método de análisis de varianza se basa en el siguiente modelo estadístico lineal:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad \left( \begin{array}{l} i = 1, 2 \dots a \\ j = 1, 2 \dots n \end{array} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

$\mu$ = es el valor de tendencia central (media)

$\tau$ = efecto debido al tratamiento ( $a$  niveles de tratamiento y  $n$  observaciones efectuadas)

$\epsilon_{ij}$ = error aleatorio asociado al tratamiento u observaciones

De tal forma que:

$$E(y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i \dots\dots\dots \text{Ec. 3} \quad i = 1, 2 \dots a$$

Así:

$$H_0: m_1 = m_2 = \dots m_a$$

$$H_1: m_1 \neq m_2 \neq \dots m_a$$

La prueba de hipótesis se realiza utilizando el estadístico F el cual radica en:

F= varianza entre grupos/varianza al interior de los grupos

La  $F_c$  calculada se estima mediante:

$$F_c = \frac{\frac{SSA}{a-1}}{\frac{SSE}{n-a}}$$

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_k)^2$$

$$SST = SST_{\text{tratamientos}} + SSE$$



$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - yk)^2 = SST = r \sum_{i=1}^a (yk - Y)^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - yk)^2 \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

Los resultados del ANOVA se representan en una tabla como la siguiente:

Tabla 6. Tabla de resultados del ANOVA

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre tratamientos	$k-1$	$SS_A$	$SS_A / (k-1)$	$MS_A / MS_E$
Error	$(r-1)k$	$SS_E$	$SS_E / k(r-1)$	
Total	$kr-1$	$SS_T$		

Para este análisis, en cuanto a los tratamientos, se tomó como parámetro la cantidad de lodo empleada en cada mezcla; para esto se utilizaron los resultados de compresión y absorción obtenidos en 5 especímenes.

Para el análisis de la prueba de compresión, se utilizaron los resultados obtenidos de dicha prueba, cabe recordar que la resistencia a la compresión deseada es de 24 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 7. Análisis ANOVA. Compresión

		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg / cm <sup>2</sup> ) TRATAMIENTOS (k)		
MEZCLA		5 % Lodo - 7 % Cal y Cemento - 81 % RC 1/4"	6 % Lodo - 5.5 % Cal y Cemento - 83 % RC 1/4"	7 % Lodo - 9 % Cal y Cemento - 75 % RC 1/4"
repeticiones	1	55	31	48
	2	53	29	48
	3	55	29	47
	4	54	30	47
	5	54	31	48

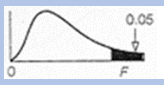
Teniendo los resultados de compresión, se pasa a obtener la suma de cuadrados totales (SS<sub>T</sub>) y la suma de cuadrados del error (SS<sub>E</sub>), con el fin de obtener la varianza entre grupos (F). En la tabla 8 se observan los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados ANOVA. Compresión

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre tratamientos	2	1,564.9	782.4666667	2.98
Error	12	3,154.0	262.8333333	
Total	14	1,572.9		

Ahora, se calcula la  $F_{\alpha (a-1), (a-1) (b-1)}$ , para una probabilidad de 0.05, donde se obtuvo una  $F_{\alpha 0.05 (2, 12)} = 3.89$ ; para la obtención de dicho resultado se consultó la tabla de distribución t de Student (Tabla 9).

Tabla 9. Tabla t de Student

		Grados de libertad para el numerador			
		1	2	3	4
Grados de libertad para el denominador	1	161	200	216	225
	2	18.5	19.0	19.2	19.2
	3	10.1	9.55	9.28	9.12
	4	7.71	6.94	6.59	6.39
	5	6.61	5.79	5.41	5.19
	6	5.99	5.14	4.76	4.53
	7	5.59	4.74	4.35	4.12
	8	5.32	4.46	4.07	3.84
	9	5.12	4.26	3.86	3.63
	10	4.96	4.10	3.71	3.48
	11	4.84	3.98	3.59	3.36
	12	4.75	3.89	3.49	3.26
	13	4.67	3.81	3.41	3.18
	14	4.60	3.74	3.34	3.11

Por último, se valida o rechaza la hipótesis nula de la siguiente manera:

$$F_{\alpha (a-1), (a-1) (b-1)} > F \dots\dots\dots \text{Ec. 5}$$

$$3.89 > 2.98$$

Como  $F_{\alpha (a-1), (a-1) (b-1)}$  es mayor a F, se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, estas cantidades de lodo empleadas en las mezclas no influyen en lo que respecta a la prueba de resistencia a la compresión.

Ahora bien, con los resultados de absorción inicial y absorción total se volvió a emplear el ANOVA para validar o rechazar la hipótesis nula; para esta prueba, los valores deseados en cuanto a la absorción inicial son de 5 g/min esto para muros exteriores y 7.5 g/min para muros interiores; para la absorción total el valor deseado es 25%. En las tablas 10 y 11 se observan los resultados obtenidos.

Tabla 10. Análisis ANOVA. Absorción inicial

<b>ABSORCIÓN INICIAL PARA MUROS INTERIORES Y EXTERIORES (g / min)</b>				
<b>TRATAMIENTOS (k)</b>				
	<b>MEZCLA</b>	<b>5 % Lodo - 7 % Cal y Cemento - 81 % RC 1/4"</b>	<b>6 % Lodo - 5.5 % Cal y Cemento - 83 % RC 1/4"</b>	<b>7 % Lodo - 9 % Cal y Cemento - 75 % RC 1/4"</b>
<b>repeticiones</b>	1	6.3	6.6	6.2
	2	6.2	6.4	6.3
	3	6.3	6.6	6.2
	4	6.4	6.4	6.2
	5	6.2	6.5	6.3

Tabla 11. Análisis ANOVA. Absorción total en 24 h

<b>ABSORCIÓN TOTAL EN 24 H (%)</b>				
<b>TRATAMIENTOS (k)</b>				
	<b>MEZCLA</b>	<b>5 % Lodo - 7 % Cal y Cemento - 81 % RC 1/4"</b>	<b>6 % Lodo - 5.5 % Cal y Cemento - 83 % RC 1/4"</b>	<b>7 % Lodo - 9 % Cal y Cemento - 75 % RC 1/4"</b>
<b>repeticiones</b>	1	20	24	27
	2	19	26	29
	3	21	24	29
	4	20	25	28
	5	20	26	29

De igual forma, se obtiene la suma de cuadrados totales ( $SS_T$ ) y la suma de cuadrados del error ( $SS_E$ ), con el fin de obtener la varianza entre grupos (F). En las tablas 12 y 13 se observan los resultados obtenidos.

Tabla 12. Resultados ANOVA. Absorción inicial

<b>Fuente de variación</b>	<b>G.L.</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>
Entre tratamientos	2	0.2	0.098	3.56
Error	12	0.3	0.0275	
Total	14	0.3		

Tabla 13. Resultados ANOVA. Absorción total en 24 h

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre tratamientos	2	178.5	82.27	2.20
Error	12	487.0	40.58	
Total	14	187.7		

Por último, se valida o rechaza la hipótesis nula, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

$$F_{\alpha (a-1), (a-1) (b-1)} > F$$

Para absorción inicial:

$$3.89 > 3.56$$

Para absorción total en 24 h:

$$3.89 > 2.20$$

De igual forma,  $F_{\alpha (a-1), (a-1) (b-1)}$  es mayor a F, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula; estas cantidades de lodo empleadas en las mezclas no influyen en la absorción inicial en muros interiores y en la absorción total del espécimen.

Con los resultados obtenidos del ANOVA, la cantidad de lodo empleada para la elaboración de ladrillos no influye en lo que es la resistencia a la compresión y a la absorción inicial en muros interiores; aunque en lo que se refiere a la absorción inicial en muros exteriores los resultados obtenidos de la prueba arrojaron valores que rebasan el límite máximo que es de 5 g/min, pero teniendo en consideración que los lodos tienen un alto porcentaje de absorción, se considera lógico que el valor promedio de los resultados de la prueba de absorción inicial sea de 6.34 g/min, dicho valor comparado con el límite máximo para muros

exteriores, da una diferencia de 1.34 g/min, que siendo muy estrictos no influye en la fabricación del ladrillo.

#### **4.5 ETAPA V. Beneficios del proyecto**

Determinación de los beneficios económicos y ambientales que se generan al agregar lodos de plantas de tratamiento de la industria papelera para la fabricación de ladrillos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Resultados de caracterización de lodos

#### Análisis físico-químico

Los resultados que se obtuvieron en este análisis no tienen ninguna afectación para la fabricación del ladrillo.

Tabla 14. Parámetros físico-químicos

Parámetro	Resultado
pH	8.72
Conductividad	534.6 $\mu\text{s/cm}$
Humedad	56.60%
Cenizas	29%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	462.95 g/kg

#### Análisis microbiológico

Este análisis indica si el lodo con el que se trabajará tiene microorganismos por posible mezcla con el agua residual proveniente de los servicios sanitarios en la planta de Bio Pappel. Ambos parámetros se evaluaron conforme marca la normativa para lodos. La cuantificación de coliformes fecales se realizó con base en la norma NMX-AA-102-1987 y de huevos de helmintos con base en la NMX-113-SCFI-1999.

Tabla 15. Resultados de análisis microbiológicos

Parámetro	Resultado
Coliformes fecales	ND
Coliformes totales	ND
Huevos de Helmintos	ND

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos son los que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN Coliformes fecales NMP/g en base seca	PATÓGENOS <i>Salmonella</i> spp. NMP/g en base seca	PARÁSITOS Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor 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

En este caso no fue rebasada la normativa.

## 5.2 Resultados de prueba de resistencia a la compresión

Con los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión, se pasa a realizar una comparación de dichos resultados contra los valores que indica la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013, con el fin de corroborar y determinar que mezcla es la idónea para la fabricación de ladrillos.

En la tabla 17, se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión; para esta tabla no se tienen los valores de las mezclas A1 y A2, debido a que estas mezclas al momento de fabricar los ladrillos no se lograron hacer (Ver figuras 28 y 29); esto se debe, a que la cantidad de lodo utilizado para estas mezclas fue mayor en comparación al resto de las mezclas, por lo que se concluye que no es posible elaborar ladrillos con grandes cantidades de lodos que provengan de la industria papelera, ya que la consistencia con la que salen los ladrillos es muy débil.



Figura 28. Mezcla A1



Figura 29. Mezcla A2

Tabla 17. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

Especimen No.	Carga máxima		Resistencia individual	
	kg	kN	kg /cm <sup>2</sup>	MPa
A1	0	0.0	00.0	0.0
A2	0	0.0	00.0	0.0
A3	6 200	60.8	20.0	2.0
A4	7 600	74.5	24.0	2.4
A5	17 200	168.7	55.0	5.4
A6	14 100	138.3	45.0	4.4
A7	10 800	105.9	35.0	3.4
A8	15 000	147.1	48.0	4.7
A9	11 200	109.8	36.0	3.5

Nota: Se hizo el secado de los ladrillos a una temperatura que vario de 70 a 120 °C con el desecador solar



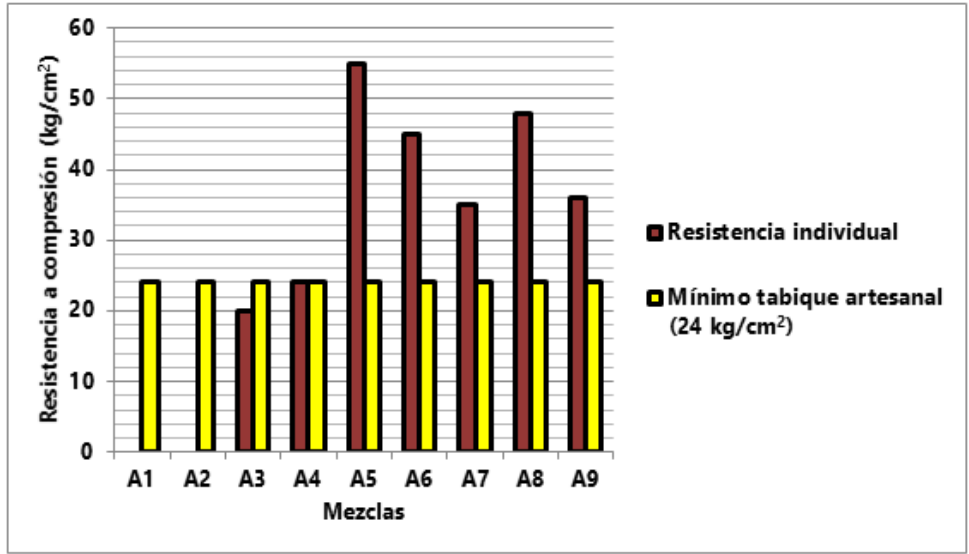


Figura 30. Comparativa de resistencia a compresión del pre diseño de mezclas

Teniendo todos los valores, se identifica la mezcla idónea para la fabricación de ladrillos, donde se determinó que la mejor mezcla fue la A5, ya que su resistencia individual fue la más alta entre las mezclas propuestas; analizando los valores de la resistencia individual de la tabla 4 donde se tiene un valor de 2.4 MPa, ahora bien, comparando dicho valor con el obtenido de la mezcla A5 de la tabla 17, donde su valor resultó de 5.4 MPa, demuestra que el ladrillo fabricado de la mezcla A5 sobrepasa la resistencia mínima que se indica en la norma NMX-C-411-ONNCCE-2013, por lo que se considera satisfactorio el resultado obtenido en esta etapa del proyecto.



Figura 31. Ladrillos de la mezcla A5

### 5.3 Resultados de prueba de absorción

Como se mencionó en la prueba de resistencia a la compresión, en la tabla 18 tampoco se cuenta con los resultados de las mezclas A1 y A2, esto se debe a la falta de consistencia en las mezclas.

Tabla 18. Resultados de la prueba de absorción inicial.

Espécimen No.	Coefficiente de absorción Inicial, g / min Individual
A1	0.0
A2	0.0
A3	7.6
A4	8.4
A5	6.3
A6	6.3
A7	8.8
A8	6.2
A9	6.5

Nota: Se hizo el secado de los ladrillos a una temperatura que vario de 70 a 120 °C con el desecador solar

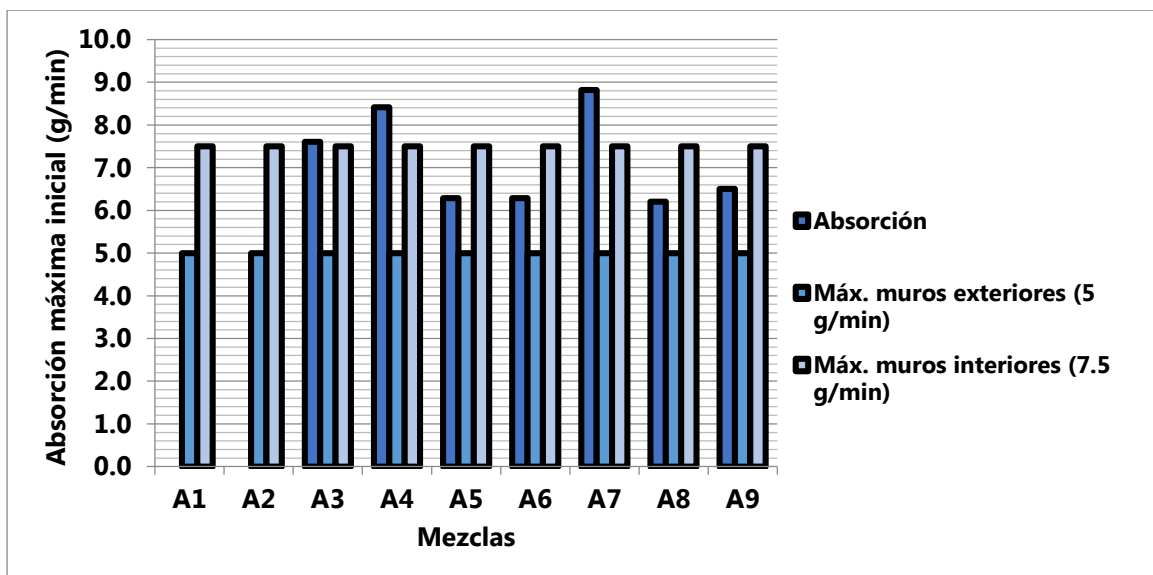


Figura 32. Comparativa de absorción de agua máxima inicial del pre diseño de mezclas

Con base en los resultados obtenidos en la prueba y con los valores de la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013, se puede concluir que la mezcla A8 cumple con lo que es la absorción inicial para muros interiores, ya que su valor es de 6.2 g/min y es menor a 7.5 g/min; respecto a la absorción inicial para muros exteriores, donde la norma indica que se debe tener un valor igual o menor a 5 g/min, las mezclas no lograron cumplir con dicho valor, pero, esto debido a las altas cantidades de lodos empleadas en las mezclas.

En esta etapa solo se realizó la prueba de absorción inicial, ya que dicha prueba dio una idea de qué mezcla utilizar.

#### 5.4 Diseño de mezclas

Teniendo los resultados de las pruebas de compresión y absorción, se pasó a determinar el diseño de mezclas que ayudó a identificar la mezcla ideal con la cual se trabajó a lo largo de este proyecto. De igual forma, para el diseño de mezclas también se realizaron las pruebas de compresión y absorción para los especímenes, pero ahora añadiendo el valor de absorción total. A continuación, en la tabla 19 se presenta los porcentajes utilizados para la fabricación de ladrillos.

Tabla 19. Diseño de mezclas

Mezcla	% Lodo	% Cemento	% Cal	% Suelo (RC todo en uno ¼" a finos)
B1	5	7	7	81
B2	5	8	8	79
B3	5.5	6	6	82.5
B4	5.5	7	7	80.5
B5	5.5	7.5	7,5	79.5
B6	5.5	8	8	78.5
B7	6	5.5	5.5	83
B8	6.5	5	5	83.5

### 5.4.1 Prueba de resistencia a la compresión

Se aplicó la prueba para los nuevos especímenes, también se volvió a realizar el ensayo a la mezcla A5 esto para tenerla como referencia para las nuevas mezclas elaboradas. Como se explicó en el punto 4.3.3, la prueba de resistencia a la compresión se basó en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013. En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 20. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

Especimen No.	Carga máxima		Resistencia individual	
	kg	kN	kg /cm <sup>2</sup>	MPa
B1	17 200	168.7	55.0	5.4
B2	12 000	117.7	38.0	3.7
B3	9 200	90.2	29.0	2.8
B4	17 820	174.8	57.0	5.6
B5	16 400	160.8	53.0	5.2
B6	9 200	90.2	29.0	2.8
B7	9 600	94.1	31.0	3.0
B8	10 400	102.0	33.0	3.2

Nota: Se hizo el secado de los ladrillos a una temperatura que vario de 70 a 120 °C con el desecador solar

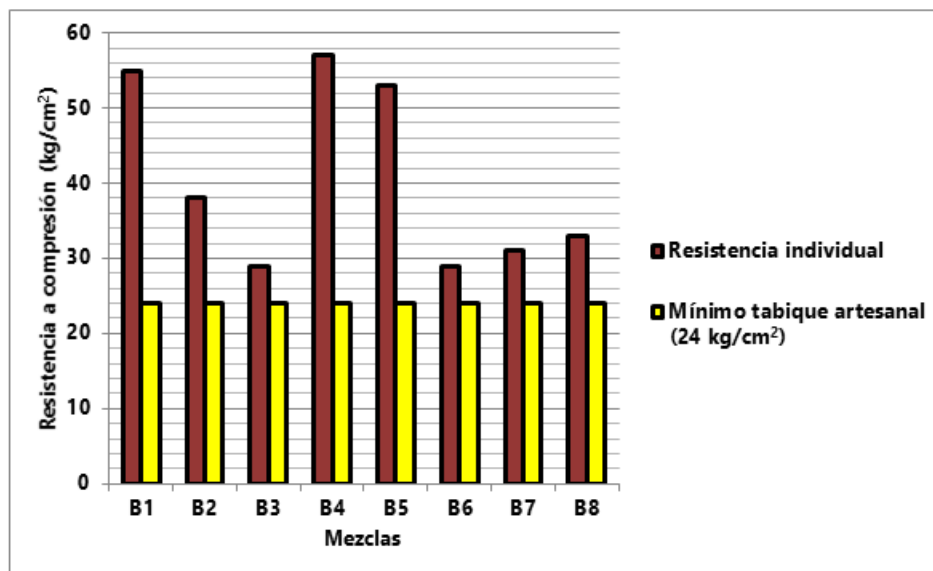


Figura 33. Comparativa de resistencia a compresión del diseño de mezclas

En este caso, la mezcla A5 que para este nuevo ensayo se nombró B1, sigue teniendo la misma capacidad de carga que la prueba anterior, las demás mezclas cumplen con la resistencia mínima individual de 2.4 MPa (24 kg/cm<sup>2</sup>) especificada en la norma NMX-C-411-ONNCCE-2013. La mezcla que obtuvo una mayor resistencia individual fue la B4 con 5.6 MPa (57 kg/cm<sup>2</sup>).



Figura 34. Resistencia a la compresión

### 5.4.2 Prueba de absorción

Se realizaron las pruebas de absorción inicial y total, como se mencionó en la etapa del pre diseño de mezclas. En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 21. Resultados de la prueba de absorción inicial y total

Espécimen No.	Absorción total, %	Coficiente de absorción Inicial, g / min (Individual)
B1	20	6.3
B2	26	7.9
B3	21	6.9
B4	20	6.8
B5	18	7.1
B6	26	6.3
B7	24	6.6
B8	20	7.8

Nota: Se hizo el secado de los ladrillos a una temperatura que vario de 70 a 120 °C con el desecador solar

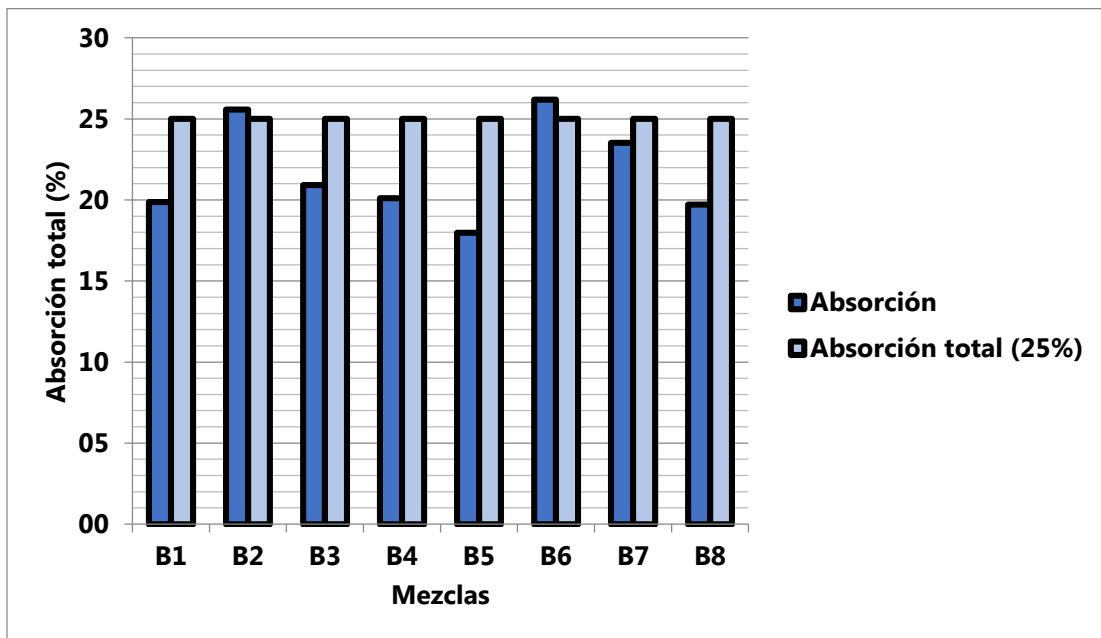


Figura 35. Comparativa de absorción total a 24 h del diseño de mezclas

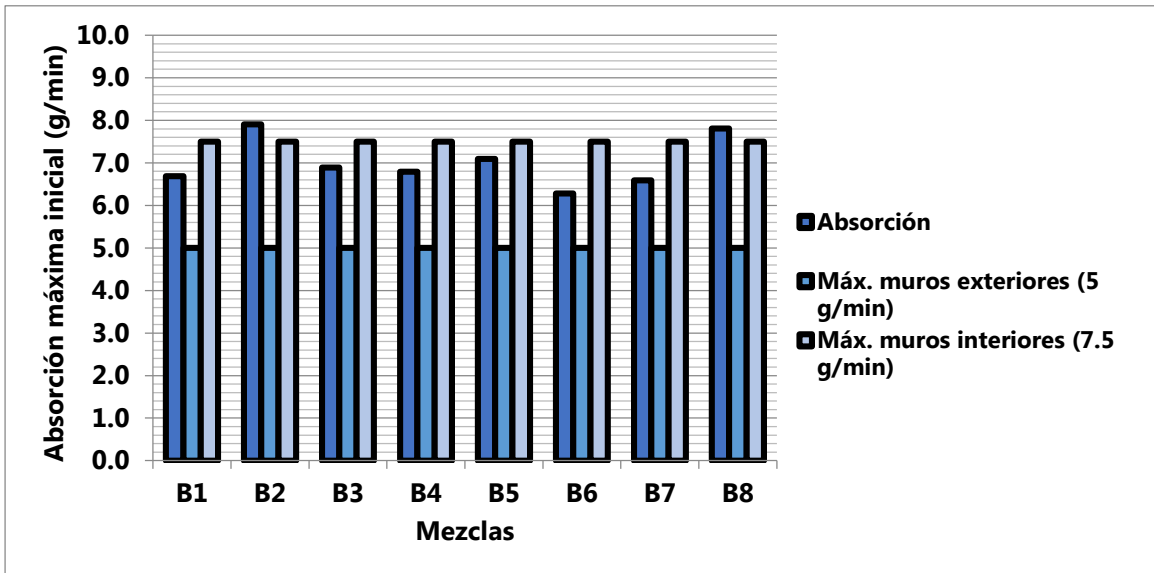


Figura 36. Comparativa de absorción de agua máxima inicial del diseño de mezclas

Teniendo los resultados de la prueba de absorción, se puede observar en la tabla 21 que los valores de absorción total cumplen, excepto la mezcla B2 y B6, pero solamente se sobrepasan por 1%; en cuanto a la prueba de absorción inicial para muros exteriores, todas sobrepasan el valor de 5 g/min que marca la norma, y para lo que es la absorción inicial para muros interiores, las únicas mezclas que no cumplen son la B2 y B8, ya que sobrepasan los 7.5 g/min que indica la norma.



Figura 37. Absorción total

## 5.5 Resultados complementarios

Trabajando en la elaboración de la mezcla ideal para la fabricación de ladrillos, también se trabajó en un prototipo de maseta ambiental que pueden ser empleada para una pared verde, donde el ladrillo fabricado con el lodo de la industria papelera, sirvió como maseta; en dicha maseta se cultivó una planta con ayuda del lodo deshidratado como sustrato para plantas ornamentales, también en el fondo se incluyeron residuos de pañal, ya que el gel del pañal conserva el agua para que pueda florecer la planta. En la figura 38 se observa el prototipo de maseta ambiental fase 2, ya que la fase 1 fue cuando se sembró la semilla.



Figura 38. Prototipo de maseta ambiental



## **5.6 Beneficios del proyecto**

### **5.6.1 Beneficios ambientales**

En la actualidad, bloques y ladrillos son dos de los materiales mayormente empleados en la construcción. Generalmente estos materiales son hechos a partir de una mezcla de arena y arcilla a la cuál en ocasiones se agrega un estabilizante como cal o cemento, para posteriormente secarlos al sol o mediante un horno de cocción. Los procesos de producción de dichos materiales consumen grandes cantidades de materiales vírgenes, combustibles y no son amigables con el ambiente (Murmu y Patel, 2018).

Los ladrillos sustentables fabricados con lodo de las plantas de tratamiento de la industria papelera y los residuos de construcción de ¼" a finos, cumplen en general con los parámetros técnicos establecidos en la norma NMX-C-411-ONNCCE-2013, exceptuando el parámetro de absorción máxima en muros exteriores. También, se tiene que hacer hincapié que para tener una mejor moldeabilidad y evitar agrietamientos, se adicionaron cal y cemento.

En este proyecto se utilizó un desecador solar cuyo funcionamiento se basa en la radiación solar, con esto se evita las emisiones que provocan los hornos tradicionales del sector ladrillero.

Estos ladrillos pueden sustituir los ladrillos convencionales, utilizándolos como muros no estructurales ya que no requieren soportar cargas de la estructura, por ejemplo, en bardas, muros divisorios, parapetos o con fines estéticos. A continuación, en la tabla 22 se presenta una comparación de las ventajas de los ladrillos sustentables con los ladrillos convencionales.

Tabla 22. Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos sustentables

Ladrillo sustentable (lodo de las plantas de tratamiento de la industria papelerera y residuos de construcción de ¼" a finos)	Ladrillo convencional
Disminución de la explotación de banco de materiales	Explotación de banco de materiales vírgenes
Eliminación de emisiones al ser ladrillos que no requieren cocción	Emisión de GEI al ser cocidos en hornos mediante la quema de combustibles
Disminución del costo de adquisición y transporte de materiales	Elevación del costo por la compra y transporte de materiales
Permite el tamaño de acuerdo a las necesidades	Tamaños estandarizados

Por último, como en todo análisis estructural, se debe de verificar el comportamiento que tendrán los muros, ya que hay la necesidad de reforzarlos con castillos y estribos, con el fin de evitar problemas con el muro.

### 5.7.2 Beneficios económicos

Para la fabricación de un ladrillo sustentable, el costo por pieza es de \$2.00 ya que su fabricación es principalmente de residuos de construcción y del lodo paplero. Para la obtención del costo unitario del ladrillo sustentable, se realizaron con precios del 2019 y en la herramienta se tomó un 3% del costo de materiales.

Tabla 23. Integración del precio unitario del ladrillo sustentable

<b>Materiales</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Importe
Agua	m <sup>3</sup>	0.00075	7.43	\$ 0.01
RC 1/4" a finos (Incluye transporte)	kg	1.73	0.56	\$ 0.97
Lodo	kg	0.118	-	\$ -
Cal	kg	0.1505	2.36	\$ 0.36
Cemento	kg	0.1505	4.25	\$ 0.64
				<b>\$1.98</b>
<b>Mano de obra</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Importe
Trabajador	Jornada	0.004	120.7	\$ 0.48
Trabajador	Jornada	0.004	120.7	\$ 0.48
				<b>\$0.96</b>

<b>Herramienta</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Importe
Herramienta menor		0.03		<b>\$0.03</b>
<b>Total</b>				<b>\$2.97</b>

Si se tiene planeado producir ladrillos sustentables en serie, se debe considerar que en este proyecto la fabricación de ladrillos se lleva a cabo por dos personas, fabricando en promedio de 18 a 20 ladrillos por hora, es decir, que aumentando el personal se puede llegar a generar una mayor producción de ladrillos.

Teniendo el costo unitario de ladrillo sustentable que es de \$2.97/M.N. y con los costos que se manejan actualmente en el mercado de la construcción, donde un ladrillo convencional tiene un costo aproximado de \$3.00/M.N. y \$3.30/M.N., esto demuestra que el ladrillo sustentable es más económico y que puede ser de gran ayuda para las constructoras en México.

## 6. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos fueron suficientes para considerar factible técnica y económicamente el uso de los ladrillos en muros divisorios o con fines estéticos.
2. Los ladrillos fabricados con lodo de la industria papelera, residuos de construcción de ¼" a finos, cal y cemento, obtuvieron una resistencia de 5.6 MPa (57 kg/cm<sup>2</sup>), con lo cual cumple con lo especificado en la NMX-C-441-ONNCCE-2013.
3. En cuanto a los resultados de pruebas de absorción total, se logró un resultado de 18%, indicando que su capacidad de absorción de agua en 24 horas es poco, considerando que el valor máximo de absorción que puede tener un ladrillo artesanal es de 25% de acuerdo con la norma.

Por otra parte, en cuanto a la absorción inicial, los mejores resultados fueron de 6.3 g/min, pero aquí se debe tener en consideración que este valor es válido solamente para la absorción inicial para muros interiores (7.5 g/min).

4. Estos resultados reafirman que no es posible utilizar una gran cantidad de lodo en la fabricación de ladrillos, ya que como se mencionó anteriormente, los ladrillos que cuentan con un porcentaje elevado de lodos en su composición tendrán una resistencia menor y una absorción elevada.
5. Los beneficios ambientales y económicos de los ladrillos son buenos, ya que se evita daños al ambiente en su fabricación y su costo es más económico que un ladrillo convencional.

6. El proceso constructivo que se planteó desde un inicio del proyecto es práctico, debido a que se produce por hora 18 a 20 ladrillos, donde solamente intervienen dos personas y si se planea hacer la fabricación de ladrillos a gran escala, esto puede ser de gran ayuda.

## 7. RECOMENDACIONES

- Si se planea elaborar ladrillos sustentables con lodos de la industria papelera, se recomienda utilizar un porcentaje entre 5% y 7% de lodo, esto debido a que, si se añade más lodo, su capacidad de resistencia disminuye y su absorción aumenta.
- Al momento de utilizar el lodo para elaborar la mezcla, lo más recomendable es secarlo al ambiente por un periodo de 4 días, ya que, si no se seca, al momento de hacer la mezcla, esta tendrá un exceso de agua y complicará el moldeo del ladrillo.
- Los ladrillos elaborados con lodo de la industria papelera y residuos de la construcción de ¼" a finos, son preferentemente útiles para muros dentro de una vivienda.
- En México se necesita promover más el reúso y reciclaje de estos materiales (lodo de la industria papelera y residuos de construcción), debido a la sobre explotación de materiales vírgenes que se tiene en el país.

## 8. REFERENCIAS

1. Aguilar Penagos, Armando de Jesús (2017). Fabricación de bloques ecológicos a base de material producto de la construcción. Tesis para obtener el título de maestro en ingeniería, Ciudad de México, 146 pp.
2. Aquino Bolaños, Esperanza (2015). Reciclaje de residuos de la construcción para la fabricación de ladrillos sustentables. Tesis para obtener el título de maestro en ciencias, Ciudad de México, 151 pp.
3. Ariful Islam, J., Mizan, A., y Ahmed, T. (2017). Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. *Waste Management*, 60, 259-269.
4. Barton, R.G., Seeker, W.R., y Bostian, H.E. (1991). The behavior of metals in municipal sludge incinerators. *Trans. Inst. Chem*, 69, 29-36.
5. Buruberri, L.H., Seabra, M.P., y Labrincha, J.A. (2014). Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 252-260.
6. Chen, Z, LI, J.S., y Poon, C.S. (2018). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1447-1459.
7. Cusidó, J.A., Cremades, L.V., Soriano, C., y Devant, M. (2015). Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. *Applied Clay Science*, 108, 191-198.
8. Devi Gottumukkala, L., Haigh, K., Collard, F.X., van Rensburg, E., y Görgens, J. (2016). Opportunities and prospects of biorefinery-based valorisation of pulp and paper sludge. *Bioresource Technology*, 215, 37-49.
9. Donado H., Roger (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta.

Tesis para obtener el título de magister en gestión ambiental, Bogotá, Colombia, 86 pp.

10. García, A. (2010). Study of thehydrated phases present in calcined paper sludge (metakaolinite)/saturated CaO dissolution system cured at 40°C and 28 days of reaction. *Material sciences and engineering*.
11. Garnica Daza, Catalina (2013). Alternativas de gestión de lodos papeleros en la industria de papel Tisú y Kraft. Bogotá, Colombia, 71 pp.
12. Kameshima Y. (2007). Preparation and sorption properties of materials from paper sludge. Department of Metallurgy and Ceramics Science, TokyoInstitute of Technology.
13. Kikuchi R. (2001). Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker, *Resources Conserv. Recycl*, 31, 137–147.
14. Mabee Warren, E. (2001). Study of woody fibre in papermill sludge. National Library of Canada. 1-202.
15. Marín Maldonado, Sergio (2011). Muestreo y caracterización de los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales de la industria papelera ubicadas en el Distrito Federal y área conurbada para la síntesis de Zeolitas. Tesis para obtener el título de ingeniero químico, Ciudad de México, México, 43 pp.
16. Martínez Herrera, Iván Emilio (2016). Producción de concretos ligeros con agregados vitrocerámicos elaborados con lodos de plantas potabilizadoras, UNAM. Tesis para obtener el título de maestro en ingeniería, Ciudad de México, 95 pp.
17. Monte, M.C., Fuente, E., Blanco A., y Negro, C. (2008), Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29, 293-308.
18. Murmu A.L., Patel A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and building materials* 165. 112-125.



19. NMX-036-ONNCCE-2013 (2013) Industria de la construcción mampostería-resistencia a la compresión de bloques, tabiques o adobes y tabicones y adoquines – método de ensayo. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
20. NMX-037-ONNCCE-2013 (2013) Industria de la construcción mampostería determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o adobes y tabicones – método de ensayo. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
21. NMX-113-SCFI-2012 (2012) Análisis de agua–Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica-Método de prueba. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
22. NMX-404-ONNCCE-2012 (2012) Industria de la construcción-Mampostería-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-Especificaciones y métodos de ensayo. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
23. NMX-AA-102-1987 (1987) Calidad del agua-Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y escherichia coli presuntiva-Método de filtración en membrana. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
24. NMX-C-038-ONNCCE-2013 (2013) Industria de la construcción mampostería determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o adobes y tabicones – método de ensayo. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
25. NMX-C-441-ONNCCE-2013 (2013) Industria de la construcción mampostería bloques, tabiques o adobes y tabicones para uso no estructural especificaciones y métodos de ensayo. Official Journal of the Federation, City of Mexico, Mexico.
26. NOM-004-SEMARNAT-2002 (2002) Protección ambiental. - Lodos y biosólidos. - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

27. NOM-083-SEMARNAT-2003 (2003) Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
28. NOM-161-SEMARNAT-2011 (2011) Establece los criterios que deberán considerar las Entidades Federativas y sus Municipios para solicitar a la Secretaría la inclusión de otros Residuos de Manejo Especial.
29. Oropeza García, N. (2009). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51-58.
30. Quinchía-Figueroa, A., Valencia-García, M. & Uribe, J. (2013). Evaluación de la Incorporación de Lodos Papeleros como Cargas en Materiales Poliméricos. *Revista Colombiana de Materiales*, No. 5, pp. 64-70.
31. Rojas Remis, R., Mendoza Espinosa, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *SciELO*, 7-2.
32. Sales, A., y Rodrigues de Souza, F. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Construction and Building Materials*, 23, 2362-2370.
33. Sikder Amit, S.K., y Rafiqul Islam, M. (2016). Application of paper sludge ash in construction industry. *ICCESD 2016*. 737-746.
34. Singh, M., Garg, M. (1999). Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes. *Cement Concrete Res*, 29, 309–314.
35. Suriyanarayanan, S., Mailappa, A.S. (2010), Studies on the Characterization and Possibilities of Reutilization of Solid Wastes from a Waste Paper Based Paper Industry. *Global Journal of Environmental Research*. 4 (1), 18-22.
36. Tebbutt, T.H.Y. (1995). Incineration of wastewater sludges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water, Maritime Energy*. 112, 39-47.

37. Vinay K.J. (2005). Effect of grinding and heating on Ni<sup>2+</sup> uptake properties of waste paper sludge. Department of Metallurgy and Ceramics Science.
38. Zhan, B.J., y Poon, C.S. (2015). Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 101, 174-179.
39. Zhang, Y.M., Jia, L.T., Mei, H., Cui, Q., Zhang, P.G., Sun, Z.M. (2016). Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge. *Construction and Building Materials*, 121, 154-160.

### **Electrónicas**

1. APSA S.A. DE C.V. Recuperado el 31 de agosto de 2018, de <http://www.apsa.com.mx/empresa-apsa.html>
2. BIO PAPPEL S.A.B. de C.V. Recuperado el 4 de septiembre de 2018, de <https://www.biopappel.com>
3. CECOSO. Celulosa y Corrugados de Sonora S.A. de C.V. Recuperado el 3 de septiembre 2018, de <http://cellufibra.com> de 2018, de <http://www.cecso.mx/>
4. COPAMEX. Recuperado el 4 de septiembre de 2018, de <http://www.copamex.com>
5. Manufacturas 8-A S.A. de C.V. Recuperado el 31 de agosto de 2018, de <http://www.crepe.com>
6. POTOSI. Fábricas de papel Potosí S.A. de C.V. Recuperado el 3 de septiembre de 2018, de <http://www.papelpotosi.com/>
7. SAJOSA. Fábricas de papel San José S.A. de C.V. Recuperado el 31 de agosto de 2018, de <http://www.sajosa.com.mx/>

# **ANEXO 1**

# **PÓSTER DEL EVENTO**



[conferenceseries.com](http://conferenceseries.com)

11<sup>th</sup> World Congress and Expo on

# Recycling

June 13-14, 2019 | Edinburgh, Scotland

UK: Conference Series LLC Ltd  
47 Churchfield Road, London, W3 6AY  
Toll Free: +0-800-014-8923

# **ANEXO 2**

# **CONSTANCIA**

conferenceseries.com

47 Churchfield Road, London, W3 6AY, UK

# Certificate of Recognition

*Conference Series and the Editors of Advances in Recycling & Waste  
Management and Expert Opinion on Environmental Biology wish to thank*

*Prof/Dr/Mr/Ms.* Hugo Alberto Quintero Navanno  
UNAM, Mexico

*for his/her Participation*

*at the "11<sup>th</sup> World Congress and Expo on Recycling"  
held during June 13-14, 2019 in Edinburgh, Scotland*

*B. Mishra*

**Brajendra Mishra**

NSF Center for Resource Recovery & Recycling, USA