



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TÍTULO:

**Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas
residuales, para la fabricación de ladrillos**

AUTOR:

Orellana León Xavier Oswaldo

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Martínez Rehpani Colón Gilberto

**Guayaquil, Ecuador
2015**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Xavier Oswaldo Orellana León**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, Msc

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Xavier Oswaldo Orellana León**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2015

EL AUTOR

Xavier Oswaldo Orellana León



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Xavier Oswaldo Orellana León**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2015

EL AUTOR:

Xavier Oswaldo Orellana León

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por los buenos valores que me impartieron en mi hogar, por su esfuerzo para darme la mejor educación y por su apoyo en todo momento. A mi tutor, el cuál no solo me guío en el proceso de este trabajo, sino que me enseñó que con la perseverancia se pueden lograr grandes cosas. Un especial agradecimiento a mis amigos, los cuales han sido un apoyo fundamental en estos años de carrera universitaria.

DEDICATORIA

A Dios, y en particular a la naturaleza.

Xavier Oswaldo Orellana León

Índice

Introducción.....	13
Capítulo 1	17
Planteamiento del Problema	17
1.1 Caracterización del problema	17
1.2 Objetivos de la investigación	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
Capítulo 2	19
Marco teórico.....	19
2.1 Las aguas residuales. Su tratamiento.....	19
2.1.2 Lagunas de Oxidación.....	22
2.1.3 Pozos Sépticos.....	23
2.2 Lodos de aguas residuales	24
2.2.1 Clasificación de los lodos	26
2.2.2 Mecanismos para tratamiento de lodos	28
2.2.3 Factores limitantes en los lodos.	31
2.2.3.1 La concentración de metales pesados.	31
2.2.3.2 La existencia de organismos patógenos	36
2.2.4 Utilización del lodo para la obtención de materiales de construcción. Obtención de productos cerámicos	40
2.2.4.1 Fabricación de árido ligero	40
2.2.4.2 Fabricación de cemento	42
2.2.4.3 Fabricación de morteros.....	43
2.2.5 Proceso de fabricación del ladrillo utilizando los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales. Su impacto ambiental	46
Capítulo 3	56
Metodología.....	56
3.1 Revisión de los principales sitios de producción de lodos residuales y entrevistas a sus técnicos.....	56
3.2 Visita al relleno sanitario de Las Iguanas.....	60
3.3 Elección de la muestra de lodos residuales.	62
3.4 Ubicación del sitio experimental y contratación de personal idóneo. ..	63
3.5 Procesamiento de la muestra, fabricación de ladrillos artesanales con lodos residuales y proceso de secado.	64

3.6 Proceso de cocción de los ladrillos artesanales con adiciones de lodos residuales.....	68
3.7 Transporte y ensayos de laboratorio.....	71
3.8 Resultados.	73
Capítulo 4	76
Conclusiones.....	76
Recomendaciones.....	78
Bibliografía.....	79

Índice de Figuras

- Figura 2.1** Tratamientos típicos para aguas residuales 20
- Figura 2.2** Esquema de una laguna de oxidación 23
- Figura 2.3** Sistema de manejo de aguas domésticas (pozo séptico). 24
- Figura 2.1** Características de los metales pesados identificados por EPA (Agencia de Protección Ambiental) de Estados Unidos de América y que se encuentran en las aguas residuales. 32
- Figura 3.1** Lodos residuales en proceso de deshidratación de la Planta El Tornillo-Guayaquil. 57
- Figura 3.2** Lodos residuales en proceso de deshidratación de la Planta El Tornillo-Guayaquil. 58
- Figura 3.3** Vista en planta de lugar provisional de disposición de lodos residuales en la Planta El Tornillo-Guayaquil. 58
- Figura 3.4** Producción de lodos residuales. Planta de tratamiento de aguas AASS en la Urbanización Terranostra I de Guayaquil. 59
- Figura 3.5** Producción de lodos residuales. Planta de tratamiento de aguas AASS en la Urbanización Ciudad Santiago de Guayaquil 59
- Figura 3.6** Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de Guayaquil para el relleno sanitario de Las Iguanas. 60
- Figura 3.7** Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de Guayaquil para el relleno sanitario de Las Iguanas. 61
- Figura 3.8** Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de la ciudad de Guayaquil. Relleno sanitario de Las Iguanas. 61
- Figura 3.9** Área de deshidratación final de lodos residuales en la Planta de tratamiento de AASS de la Urbanización Portal al Sol – Guayaquil. 62
- Figura 3.10** Toma de muestra de lodos residuales de la Planta de tratamiento de AASS de la urbanización Portal al Sol – Guayaquil. 63
- Figura 3.11** Día de la elaboración de los ladrillos artesanales, con adiciones de lodos residuales. 65
- Figura 3.12** Preparación de ladrillos, muestra “A”, cruda. Ladrillos muestra “A” posterior a la cocción. 66
- Figura 3.13** Marcación de ladrillos muestra “E” con un contenido de 100% de lodos residuales. 66
- Figura 3.14** Preparación de ladrillos, muestra “E”, con un contenido de 100% de lodos residuales. 67
- Figura 3.15** Muestras “A” y “D”, con diferentes adiciones de lodos residuales, durante el proceso de secado. 67
- Figura 3.16** Muestras “E”, durante el proceso de secado. 68
- Figura 3.17** Elaboración de la pirámide de cocción. 69

- Figura 3.18** Elaboración de la pirámide de cocción. Muestras con adiciones de lodos residuales colocadas en la pirámide de cocción. 69
- Figura 3.19** Pirámide de cocción antes de la quema de ladrillos con diversos porcentajes de adición de lodos residuales. 70
- Figura 3.20** Pirámide de cocción posterior al proceso de quema de ladrillos con muestras que contienen diversos porcentajes de lodos residuales adicionados. 70
- Figura 3.21** Algunas muestras de ladrillos con diversas adiciones de lodos residuales después de la cocción. 71
- Figura 3.22** Muestras de ladrillos con adiciones de lodos residuales sumergidos en piscina para ensayo de absorción en laboratorio. 72
- Figura 3.23** Ladrillo con adiciones de lodos residuales, muestra "D" en análisis. 72
- Figura 3.24** Muestras de ladrillos con diversas adiciones de lodos residuales siendo ensayados. 73
- Figura 3.25** Distribución de la resistencia a la compresión simple promedio obtenida en las muestras ensayadas. 74
- Figura 3.26** Distribución de la absorción promedio obtenida de las muestras ensayadas. 75
- Figura 3.27** Distribución de la densidad promedio, obtenida en las muestras ensayadas. 75

Índice de Tablas

- Tabla 2.1** Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA. 27
- Tabla 2.2** Límite de calidad microbiológica de lodos. 28
- Tabla 2.3** Concentración característica de algunos metales pesados en lodos (g/g) de sólidos volátiles. 34
- Tabla 2.4** Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos. 34
- Tabla 2.5** Límites máximos de metales pesados. 35
- Tabla 2.6** Concentración máxima de microorganismos patógenos según EPA 40 CFR 503. 39
- Tabla 2.7** Variación de las propiedades de los ladrillos (% de la mezcla de referencia sin lodos). 46
- Tabla 2.8** Composición de lodos y arcilla. 48

RESUMEN

Se expone un proceso metodológico que posibilita demostrar que sí es factible emplear lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, instaladas en la ciudad de Guayaquil y de sus canales de drenajes de aguas servidas (AASS) en la elaboración de ladrillos cerámicos, lograr minimizar los impactos ambientales que se pudieran producir por la disposición final de estos fangos y lodos residuales, y conseguir utilizar este residuo peligroso como material de construcción. En este proyecto de investigación metodológica experimental, se propone un nuevo uso de los lodos residuales que actualmente son depositados en el relleno sanitario de Las Iguanas de la ciudad de Guayaquil.

Palabras Claves: Ladrillos artesanales, lodos residuales, impactos ambientales fluviales, optimización plantas tratamiento, desechos orgánicos ciudades.

Introducción

En las plantas de tratamiento de aguas residuales se generan sedimentaciones conocidas como lodos o barros, compuestos por sustancias que contaminan y ponen en riesgo la salud de los seres vivos. Dado los compuestos químicos y biológicos de los mismos, y la naturaleza de su origen, un tratamiento para esos lodos es necesario para que se su uso en la construcción sea provechoso. Para (Limón, 2013) la materia sólida contenida en las aguas residuales domésticas e industriales, en su mayoría, no supera el 12% del peso y nunca es menos del 0.25 %.

El lodo o barro es una mezcla semisólida de agua y sedimentos orgánicos, partículas de polvo y arcilla, que al aislarlos de las aguas servidas deben ser sometidos a procesos de espesamiento, estabilización y antisepsia, antes de disponer de ellos definitivamente. Los destinos de estos lodos suelen ser tres: cuerpos de agua, vertederos concebidos para ese fin y suelos agrícolas o forestales.

En los sistemas convencionales de tratamiento de agua, se explica (Arboleda, 2000) que la sedimentación produce entre el 60% y 70% del total de los sólidos totales y su disposición, sin ningún tratamiento, causa impactos sobre cuerpos de agua, suelos y riesgos a la salud pública debido a sus propiedades física, química y microbiológica (George, 1991; Kagawa, 2001; Novaes, 2003 & Taylor, 1989).

Los riesgos en la salud pública tienen un alto costo social, su descarga sin tratamiento y disposición adecuada traen impactos significativos al medio ambiente. Su manejo y traslado a sitios seguros hacen costosas las operaciones, debido a que deben ser depositados lejos de asentamientos humanos y donde no se contaminen las aguas y los suelos por el arrastre. Esta situación ha obligado a los organismos de manejo, estatales y medioambientales en nuestro país, y el mundo entero, a

buscar alternativas técnicas con un costo-beneficio positivo para la sociedad y el medio ambiente.

Una de las opciones de aprovechamiento está en la elaboración de materiales cementantes como morteros, constituidos parcial o totalmente por residuos con propiedades mecánicas similares, o en muchos casos superiores, a las de productos comerciales (Escalante-García, 2002 & Salazar, 2003).

En numerosos países se han realizado estudios que avalan el impacto que esto representa, uno de ellos fue en Colombia, donde un grupo de investigadores de la Universidad del Valle y de la Corporación Construir tomaron lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y evaluaron su potencial en productos cementantes y bloques para la construcción, lo que generó un material de alta resistencia, impermeabilidad, permitiendo que los metales pesados o sustancias lixiviables queden “encapsuladas” y no salgan al contacto con el agua (Salazar, Fortis, Vázquez, A., Vázquez, C., Fortis, 2003).

En el sector de la construcción se emplean también en la fabricación de cementos Portland y clinker (Geertsema , Knocke , Novak, & Dove , 1994) y en la producción de ladrillos cerámicos (Andreoli, 2005; Guimarães & Morita, 2003; Hernández, 2006; Mejía & Delvasto, 1998 & Nuvalori, 2002).

Este lodo se usa como reemplazo parcial de componentes utilizados para la fabricación de materiales constructivos como ladrillos cerámicos y el cemento Portland, esto trae beneficios al medio ambiente al tener determinada una disposición final segura para desechos peligrosos. En caso de no darles una disposición final adecuada, contribuirían de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos,

afectando de esta forma a los ecosistemas del área de disposición (NOM-004-SEMARNAT, 2002).

Por lo general, para la fabricación de ladrillos cerámicos se utilizan dos tipos de arcillas, rojas y negras, además arena de río, en dependencia de las características geológicas del lugar de ubicación de las canteras. Entonces varía la composición de los materiales y esto repercute de manera directa en la capacidad de resistir y absorber que tengan los ladrillos.

Elaborar un ladrillo cerámico supone el paso por un proceso extenso y de gran complejidad. Ocurre que las materias primas utilizadas tienen en su constitución elementos fundentes y estructurantes como es el caso de la arcilla y la arena, que es preciso adecuar y continuar con el moldeo, secado, cocción para, al final, lograr la normalización sobre la base de las normas vigentes, las cuales incluyen entre las variables, absorción de agua y resistencia a la compresión. Sin lugar a dudas, al final de este proceso el ladrillo adquiere una importancia notable en la construcción.

Los ladrillos son comúnmente una de las unidades de mampostería más utilizados como material de construcción. Debido a la alta demanda, diferentes tipos de desperdicios se han investigado para ser incorporados en la fabricación de ladrillos. Varios tipos de lodos se han incorporado en ladrillos de arcilla provenientes de distintas industrias incluyendo los lodos de aguas residuales. El uso de este material de desperdicio tiene resultados positivos en las propiedades de los ladrillos de arcilla, tales como: peso más ligero, mayor contracción, porosidad y resistencia (Torres, Hernández, & Paredes, 2012).

Asimismo, Investigaciones previas han demostrado efectos positivos en las propiedades físicas y mecánicas, así como también contribuye con la disminución del impacto ambiental. Por consiguiente, usando lodos de

desperdicio, específicamente lodos provenientes de aguas residuales, se podrían producir ladrillos de buena calidad y ser una alternativa para la disposición final de los lodos contaminantes (Bermeo & Idrovo, 2014).

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

1.1 Caracterización del problema

Las administraciones públicas de los sitios comprometidos, o sea, de las ciudades o comunidades donde se están construyendo las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR), como por ejemplo, en la capital del país en el sector de Quitumbe se encuentran en la búsqueda de una solución viable de alternativas para implementar mecanismos que permitan el destino final de los lodos. Esta alternativa reduce a su vez la huella ambiental proporcionando un empleo adecuado de sus componentes con la sustitución de otras materias primas vírgenes, (El Telégrafo, 2014).

La disminución de sitios para su ubicación final sin contaminar o dañar al entorno es cada vez más visible, por lo que impera el uso más adecuado de estos lodos. Las políticas actuales de cuidado y preservación del medio ambiente, así como la reutilización de materiales desechados, es decir, la recuperación de materias primas y las estrategias de los gobiernos, están enfocadas hacia la búsqueda de alternativas que transformen estos desechos peligrosos en materiales útiles para el hombre y la naturaleza.

En definitiva, el presente trabajo de investigación está encaminado a la búsqueda de soluciones para el manejo y disposición final de los lodos generados en la PTAR, considerados desechos peligrosos; para ello debe realizarse el estudio de su composición y la posibilidad de su empleo en la elaboración de materiales de la construcción, fundamentalmente ladrillos y morteros.

1.2 Objetivos de la investigación

Los objetivos que se presentan a continuación son los que orientaron el desarrollo de la investigación, a través de ellos se pretende dar una solución viable a partir de varias alternativas que facilite la implementación de mecanismos para decidir el destino final de los lodos.

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica de emplear lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en la ciudad, en la elaboración de ladrillos cerámicos, para que se pueda dar otro uso a este residuo, que se puedan minimizar los impactos ambientales que pudiera producir la disposición final de estos lodos, y al mismo tiempo que contribuya a la elaboración de un producto necesario para la construcción.

1.2.2 Objetivos específicos

- Muestrear y caracterizar los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales, para utilizarlos como adición en la elaboración de ladrillos cerámicos.
- Elaborar y caracterizar especímenes de ladrillos artesanales utilizando arcillas del norte de Guayaquil, adicionadas con diferentes proporciones de lodos residuales de plantas de tratamiento, para desarrollar una metodología de fabricación artesanal de ladrillos que pruebe su viabilidad ejecutiva.
- Realizar ensayos de laboratorio de los ladrillos artesanales cerámicos con adiciones de lodos residuales de plantas de tratamiento, para analizar la viabilidad técnica de fabricar ladrillos que puedan ser utilizados en paredes de mampostería.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Las aguas residuales. Su tratamiento

A las aguas residuales se les denomina también aguas servidas y son las generadas por uso doméstico o industrial. Son residuales, una vez que se han usado en determinadas funciones: limpieza de viviendas y oficinas, descarga de lavabos, limpieza de autos, baño de personas y animales, fregado de las vajillas, entre otros. Estas aguas grises, si no son tratadas independientemente y se mezclan con las aguas negras, constituyen un residuo, el que no puede reutilizarse para otros usos sin un tratamiento previo, es decir algo que no sirve para el uso directo.

Generalmente le denominan aguas negras por el color que habitualmente tienen y cloacales porque se transportan mediante sumideros nombrando al colector: cloaca. Estas se conducen por el alcantarillado, aunque incluyen también las recogidas de depósitos individuales instalados en aquellos lugares donde el sistema de alcantarillado no llega y que se trasladan en carros cisternas hasta lagunas o colectores. Se incorporan a estas aguas, las de lluvia, que han ido a parar a las alcantarillas por el escurrimiento.

El incremento de las actividades productivas y el crecimiento de la población hacen que se generen grandes volúmenes de aguas residuales de origen industrial y doméstico, las cuales contienen una diversidad de contaminantes; por lo que antes de evacuarse al medio deben procesarse en las PTAR para su reutilización y/o disposición final. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012)

Para el tratamiento de aguas residuales, es necesario ejecutar determinadas fases, que a través de procesos físicos, químicos, y biológicos, purifican secuencialmente su composición. En la tesis de grado (Bermeo & Idrovo, 2014) se exponen tipos de tratamientos típicos para aguas residuales que se describe a continuación:

Figura 2.1 **Tratamientos típicos para aguas residuales**

TIPOS DE TRATAMIENTO	PROCESOS
RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema convencional por gravedad. • Sistema de gravedad para afluente de tanque séptico. • Sistema por bombeo para afluente de tanque séptico. • Sistema por vacío. • Utilización de sistemas alternativos.
PRETRATAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Tamiz grueso. • Tamiz fino. • Remoción de arena. • Remoción de grasas y aceites.
TRATAMIENTO PRIMARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Tanques sépticos. • Tanques Imhoff. • Tanque séptico con reactor de película bacteriana adherida.
TRATAMIENTO SECUNDARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados. • Filtro percolador y biorreactores. • Biodiscos. • Filtro de arena de flujo intermitente. • Filtro de grava con recirculación. • Filtro de turba. • Lagunas. • Humedales artificiales. • Tratamiento Acuático.
TRATAMIENTO TERCIARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento en el suelo. • Filtración rápida. • Humedales artificiales. • Desinfección de aguas residuales. • Remoción de sólidos residuales con filtración por membrana. • Sistemas de tratamiento con reutilización.

Fuente: Bermeo, M.; Idrovo Heredia, E. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción.

A continuación se explicará cada uno de los tratamientos señalados en la figura 2.1.

- *Tratamiento preliminar*, en esta etapa se produce la eliminación de residuos fácilmente separables y de determinados volúmenes debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, trampas de grasa, imanes, de tamices o cribas de modo que permitan la separación y remoción del material extraño que pueda entorpecer los procesos de tratamiento, obstruyendo los sistemas.

- *Tratamiento primario*, comprende procesos de sedimentación y tamizado. Se pretende como finalidad, la remoción de los sólidos suspendidos utilizando el proceso de sedimentación simple.

- *Tratamiento secundario*, abarca procesos biológicos tanto aerobios, como anaerobios, así como fisicoquímicos (floculación) que aminoran gran parte de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Tiene como objetivo remover los sólidos en solución y disgregados modificándolos biológicamente y posteriormente sometiéndolos a la sedimentación. Dicho proceso biológico y natural es controlado y en el mismo actúan los microorganismos que se encuentran en el agua servida junto a los que se desarrollan en el contenedor secundario. Estos son fundamentalmente bacterias, que viven de los sólidos coloidales suspendidos, generando en su degradación agua y anhídrido carbónico y formándose como resultado una biomasa bacteriana que cae sobre el estanque secundario.

- *Tratamiento terciario o avanzado*, direccionado a la disminución final de metales pesados, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y/o contaminantes químicos específicos, así como la erradicación de parásitos y agentes patógenos. Se lleva a cabo con el objetivo de eliminar algunos

contaminantes específicos tales como fosfatos derivados del empleo de detergentes domésticos e industriales, los cuales ocasionan un crecimiento vertiginoso de la flora acuática, consumiendo el oxígeno presente y diezmando la fauna propia del sitio del depósito.

2.1.2 Lagunas de Oxidación

De acuerdo con Martínez, (2003) las lagunas facultativas son las más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas en países de desarrollo, y que se les denomina lagunas de oxidación de agua residual doméstica o laguna fotosintéticas. El tiempo de retención hidráulica varía de 5 a 30 días y la profundidad de 1.5 a 2 m, dependiendo de su localización geográfica, clima y del volumen requerido para almacenar el lodo sedimentado. Se recomienda mantener un bordo libre de 0.5 a 0.8 m para minimizar los efectos del viento y el oleaje, así como absorber temporalmente sobrecargas hidráulicas.

Las lagunas facultativas poseen una zona aerobia y una anaerobia, ubicadas en la superficie y en el fondo respectivamente. La función de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando por las algas.

El objetivo de las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes, (Olivos, 2010).

Figura 2.2 Esquema de una laguna de oxidación



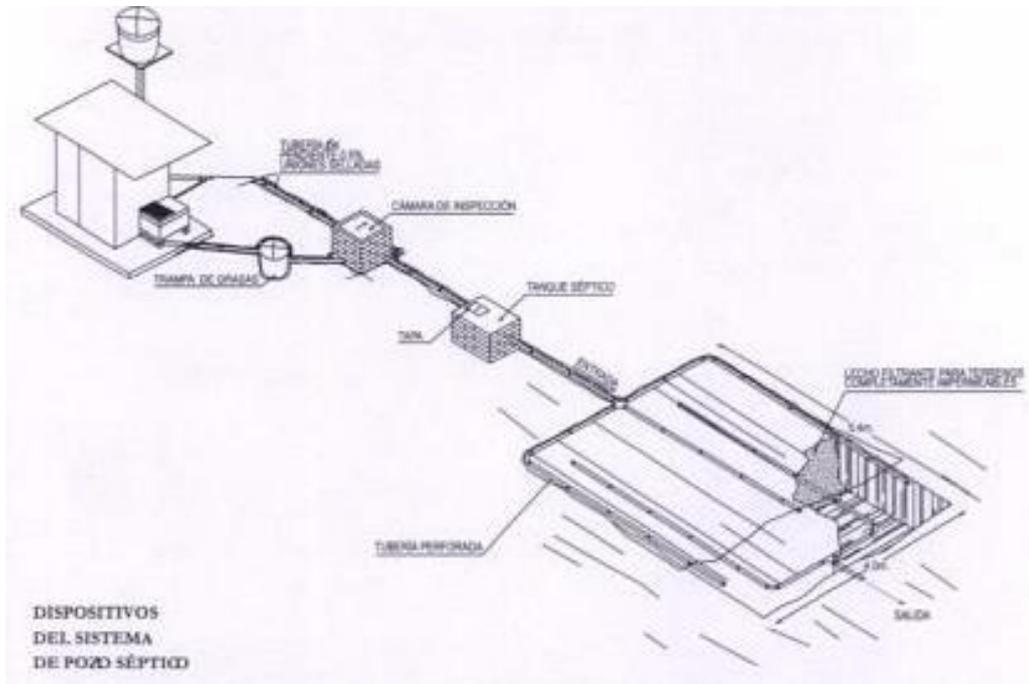
Fuente: Martínez, D. (2003). Análisis comparativo de diseño de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas.

2.1.3 Pozos Sépticos

De acuerdo a varias lecturas realizadas, se puede definir como pozo séptico al sistema más práctico para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de las viviendas rurales, cuando las zonas residenciales poco pobladas no cuentan con un sistema de alcantarillado.

El tanque séptico es una cámara que facilita la descomposición de la materia orgánica con la utilización de las bacterias contenidas en la misma agua residual. La materia se descompone transformándose en gases, líquidos y lodo, el cual se asienta en el fondo del tanque.

Figura 2.3 Sistema de manejo de aguas domésticas (pozo séptico).



Fuente: Villarreal, J. Cucunubá. (2000). Modelo para un desarrollo sostenible.

2.2 Lodos de aguas residuales

La locución lodo puede emplearse como sinónimo total de barro, si bien suele emplearse para especificar grandes formaciones de material sedimentado.

Es un subproducto del tratamiento de las aguas residuales, se pueden generar durante los tratamientos primario, que puede ser físico y/o químico; y secundario, que puede ser biológico; además, el terciario; representan un residuo acuoso, más o menos diluido, con una amplia variedad de coloides y otras partículas en diferentes formas; pueden existir también varios contaminantes peligrosos, como sales, contaminantes orgánicos y metales pesados.

La composición de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales varía en función del proceso que les da origen.

Tipos de lodos

Los tipos de lodos dependen del nivel de tratamiento de las aguas residuales, entre ellos encontramos:

- *Lodo primario*, resultantes de decantación primera. Habitualmente presenta una buena cuantía de papel, materia orgánica, frutas, vegetales, entre otros durante el inicio de su descomposición. Su densidad se caracteriza por ser espesa con un porcentaje en agua fluctuante entre un 92% y un 96%.

- *Lodos de precipitación química*, son generalmente de color negro y su olor, aunque puede llegar a ser desagradable, es menor que los de decantación primaria típica y la velocidad de descomposición de los lodos es mucho menor.

- *Lodos de tratamiento secundario*, es de color marrón, relativamente ligeros, no suelen producir olor con tanta rapidez como el lodo primario; por no estar suficientemente aireados, su color se oscurece y producen un olor tan fuerte como el lodo primario. El lodo secundario es rico en lodo activo.

- *Lodos provenientes de lechos bacterianos*, color marrón y no producen olores molestos si están frescos; se degradan a una velocidad menor que los lodos procedentes del sistema secundario de lodos activados.

- *Lodos digeridos*, color entre marrón oscuro y negro y olor a tierra, contienen gran cantidad de gas, si está bien digerido prácticamente no produce olor o produce un olor relativamente débil que no es desagradable.

Se desarrollan en los procesos de digestión aeróbica, con una razón de presencia de materia orgánica en el rango del 45% al 60%.

2.2.1 Clasificación de los lodos

Los lodos a los que se hace referencia en este trabajo, se clasifican principalmente de acuerdo al contenido de metales pesados y a su calidad microbiológica, de acuerdo a lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos en sus apartados 260 y 261, (Valderrama, 2013):

- *Lodo peligroso*, presencia de contaminantes tóxicos.

- *Lodo no peligroso*, las concentraciones de sus componentes son inferiores a los valores establecidos por la EPA.

Para la aplicación en suelo, la EPA publicó la reglamentación concerniente a los sólidos biológicos, su uso y disposición bajo el Code of Federal Regulations (CFR), 40 CFR parte 503 de 1993, ofrece límites numéricos a 10 metales.

Tabla 2.1. Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.

Nro.	Elementos	Valores límites (mg/Kgm at. Seca)	Tasa de carga acumulativa del elemento, (Kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/Kg)	Tasa de carga anual del elemento (Kg/Ha/año)
1	Arsénico	75	41	41	2.0
2	Cadmio	85	39	39	1.9
3	Cromo	-	-	-	-
4	Cobre	4300	1500	1500	75
5	Plomo	840	300	300	15
6	Mercurio	57	17	17	0.85
7	Molibdeno	75	-	-	-
8	Níquel	420	420	420	21
9	Selenio	100	100	100	5.0
10	Zinc	7500	2800	2800	140

Fuente: Valderrama, M. (2013) Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del Municipio de Chinavita (Boyacá) (Tesis de Maestría).

De acuerdo con los límites de calidad microbiológica de la EPA presentados en la Tabla 2.1 un lodo de buena calidad, se clasifica como Lodo Clase A o Lodo Clase B:

- *Lodo Clase "A"*, Los agentes patógenos no pueden ser detectados. Las imposiciones de atracción de vectores y el escaso contenido de metales son satisfechos. Solamente será necesario la demanda de permisos para certificar el cumplimiento de las normas.

- *Lodo Clase "B"*, Deben ser tratados y los patógenos se detectan. pero aún contienen niveles detectables de agentes patógenos.

A las dos clases de lodo se les debe hacer análisis microbiológicos para determinar ciertos parámetros que se demuestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Límite de calidad microbiológica de lodos.

Parámetro	Lodo clase "A"	Lodo clase "B"
Coliformes Fecales o Salmonella	<1000 NMP/g o UFC/g <3 NMP/4g	<2000000 NMP/g o UFC/g
Huevos de helminto	1 huevo viable/4 g –	-

Fuente: Valderrama, M. (2013) Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá) (Tesis de Maestría).

Cabe señalar que los parámetros son medidos en términos de Número Más Probable (NMP) y Unidades Formadoras de Colonia (UFC).

2.2.2 Mecanismos para tratamiento de lodos

El tratamiento de los lodos para mejorar su calidad microbiológica, que proporciona información sobre métodos analíticos y procedimientos de muestreo es el Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos residuales. Los procesos de tratamiento del lodo se clasifican en cuanto a su capacidad de remoción de organismos patógenos en Procesos de Reducción Avanzada de Patógenos (PFRP) y Procesos de Significativa Reducción de Patógenos (PSRP).

Los procesos reconocidos por la EPA como Procesos de Significativa Reducción de Patógenos PRSP son:

- *Secado*, el lodo de agua residual es secado al aire, durante un mínimo de tres meses. Dos de ellos a una temperatura media diaria ambiente superior a 0°C.
- *Estabilización térmica*, un lodo resultante de estos procesos de tratamiento, es denominado tipo "A", según las condiciones especificadas

por Valderrama (2013) de acuerdo a la norma EPA 40, el contenido de bacterias patogénicas, virus entéricos y huevos viables de helmintos son reducidos a los niveles detectables indicados en la normativa. Estos lodos pueden ser aplicados en suelo para uso agrícola sin restricciones. Este lodo debe ser monitoreado para parámetros de huevos de helminto, coliformes fecales, salmonellas, asegurando que no ocurra recrecimiento.

- *Compostaje*, es la forma viable para lograr la estabilización de los lodos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR; se lo conoce también como un proceso en el que se degrada biológicamente la materia orgánica hasta obtener un producto final estable. Entre un quinto y un tercio de los sólidos volátiles pasa a ser dióxido de carbono y agua; además, las temperaturas alcanzadas pueden llegar a estar entre 50 y 60°C, capaces de destruir organismos patógenos.

El proceso de compostaje permite su disposición final al aplicarles en áreas de siembra con el fin de acrecentar la producción y optimizar la calidad y estructura del suelo, el aporte de carbono, nitrógeno, azufre, potasio y fósforo y algunos micronutrientes como zinc, hierro y cobre, que favorecen las condiciones para el desarrollo de las plantas. No obstante, su aplicación se ve limitada por la aparición de ciertos compuestos como es el caso de los metales pesados en los lodos (Torres et al., 2008).

- *Digestión aerobia*, el lodo de agua residual es agitado con una cantidad de oxígeno necesaria para mantener las condiciones aerobias, el tiempo medio de retención es de 40 días a 20°C y de 60 días a 15°C. La digestión aeróbica es empleada fundamentalmente en plantas con una capacidad bastante pequeña. Entre las ventajas fundamentales de la digestión aeróbica se obtienen concentraciones bajas de DBO en el líquido

sobrenadante, la transformación primaria suele ser mínima; se logra un fruto terminal biológicamente inalterable, carente de olores.

Los prejuicios pueden ser significativos, entre ellos: un mayor precio energético coligado a la provisión del oxígeno necesario; el lodo digerido no presenta las mejores cualidades para aplicarle la deshidratación mecánica. Además, debe tenerse en cuenta que la manipulación en la digestión anaeróbica es bastante delicada.

La DBO es el parámetro que regula la cuantía de materia posible a oxidarse o consumirse por agentes biológicos que contiene una porción líquida, disuelta o suspendida.

- *Digestión anaerobia*, es uno de los procesos de equilibrio de lodos más antiguos, basado en la descomposición de la materia orgánica, sin la presencia de oxígeno molecular. La materia orgánica implícita en la argamasa de lodos primarios y secundarios, se transforma, fundamentalmente, en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

El asunto se realiza en un reactor hermético, en el cual se meten continua o intermitentemente los lodos, perdurando en el interior del reactor por períodos considerables; el lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos, (Tchobanoglous , Burton , & Stensel , 2003).

Es realizada en ausencia de oxígeno con tiempo medio de retención de 15 días, entre 35°C - 55°C y 60 días a 20°C .

- *Tratamiento químico*, es un proceso donde se adiciona cal al lodo para elevar el pH, la cal es el reactivo que más se utiliza por su reducido costo y alcalinidad, mata a las bacterias e impide la fermentación ácida. La estabilización alcalina pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y

mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos, (Valderrama, 2013).

Los lodos generados por estos procesos, se clasifican según las condiciones especificadas por la Norma EPA 40. La selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, la situación financiera en cada caso, (Oropeza, 2006).

2.2.3 Factores limitantes en los lodos.

2.2.3.1 La concentración de metales pesados.

Entre los metales pesados existentes, algunos son micronutrientes esenciales para las plantas como el cobre y el Zinc, pero otros como cadmio, plomo, cromo, Níquel , y mercurio, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la cadena trófica suelo-planta-animal-hombre (Acosta, Gutiérrez & Ramírez, 2003). Algunas de las características de los metales pesados resumidas por Martínez (2003), se presentan en la Figura 4.

Figura 2.1 Características de los metales pesados identificados por EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América) y que se encuentran en las aguas residuales.

Nro.	Metal	Características
1	Arsénico	<p>La presencia de arsénico en el agua potable puede ser el resultado de la disolución del mineral presente en cuencas hidrográficas cercanas a volcanes y naturalmente en el suelo por donde fluye el agua antes de su captación para uso humano; o bien, por vía antrópica por contaminación industrial o por pesticidas. En los cuerpos de agua se acumula en la cadena trófica, su ingestión, aun en dosis bajas, produce desórdenes gastrointestinales, afectación del tejido dérmico y alteraciones del sistema nervioso central.</p> <p>El arsénico tiene diversos usos entre ellos para la fabricación de semiconductores y como componente de semiconductores III-V como el arseniuro de galio (es un importante material semiconductor empleado en circuitos integrados más rápidos, y caros, que los de silicio. También se usa en la construcción de diodos láser y LED).</p>
2	Plomo	<p>Elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, las actividades humanas como la fabricación de pinturas, insecticidas, vidrios y baterías eléctricas, además como antidetonante de la gasolina, provocan emisiones peligrosas al ambiente. El plomo afecta a los microorganismos retardando la degradación de la materia orgánica. En los animales superiores afectan los glóbulos rojos, hígado y riñones, causando gran diversidad de padecimientos.</p> <p>El plomo puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida. Esta es la razón por la que los sistemas de tratamiento de aguas públicas ajustan el pH del agua potable. El plomo no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano; este puede principalmente hacer daño después de ser ingerido en la comida, o a través del aire o el agua.</p> <p>Está clasificado como desecho peligroso.</p>
3	Níquel	<p>Se utiliza como catalizador en la industria metalúrgica y en la fabricación de cerámica. Inhibe la actividad biológica de los microorganismos. Es cancerígeno y altamente tóxico.</p>
4	Zinc	<p>Se usa en la metalúrgica como recubrimiento de otros metales; no es muy tóxico. El Zinc metal no está considerado como tóxico pero sí algunos de sus compuestos como el óxido y el sulfuro.</p>
5	Cadmio	<p>Subproducto de la explotación de otros metales como el cobre, zinc y plomo. Se utiliza en el electroplateado, fabricación de pinturas y plásticos y, en la fabricación de baterías. Su forma tóxica es el ion Cd^{2+} su acumulación afecta hígado y riñones.</p> <p>Las aguas residuales con cadmio, procedentes mayoritariamente de las industrias, terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son, por ejemplo, la producción de zinc, minerales de fosfato y las bio-industrias del estiércol. El cadmio de las corrientes residuales puede también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles.</p>

Nro.	Metal	Características
6	Cobre	Las actividades mineras pueden provocar la contaminación de ríos y aguas subterráneas con cobre y otros metales durante su explotación así como una vez abandonada la minería en la zona. El cobre es uno de los pocos materiales que no se degradan ni pierden sus propiedades químicas o físicas en el proceso de reciclaje. Puede ser reciclado un número ilimitado de veces sin perder sus propiedades, siendo imposible distinguir si un objeto de cobre está hecho de fuentes primarias o recicladas.
7	Cromo	Se utiliza en la industria del cromado, fabricación de acero y curtido de pieles.
8	Mercurio	Es uno de los metales más peligrosos, se usa en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos en la industria del papel y en la agricultura. Su ingestión altera el sistema nervioso. El mercurio puede ser inhalado y absorbido a través de la piel y las mucosas, por lo que los contenedores de mercurio deben estar bien sellados para evitar derrames y evaporación. El mercurio puede causar intoxicación aguda y crónica. Debido a los efectos de salud de la exposición al mercurio, los usos industriales y comerciales se rigen en muchos países. La Organización Mundial de la Salud, OSHA y NIOSH ordenan que todo el mercurio se debe tratar como un riesgo laboral, y han establecido límites específicos de exposición ocupacional.
9	Selenio	Se considera un no metal. Normalmente se produce durante el refinamiento del cobre o la creación de ácido sulfúrico. A pesar de que es tóxico en grandes dosis, es un micronutriente esencial en el cuerpo.
10	Molibdeno	El humo y el polvo del molibdeno pueden ser generados por la minería o la metalurgia, pueden ser tóxicos, especialmente si se ingieren. Los niveles bajos de exposición prolongados pueden causar irritación en los ojos y la piel. La inhalación o ingestión directa de molibdeno y sus óxidos se debe evitar.

Fuente: Martínez, D. (2003). Análisis comparativo de diseño de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas.

Los metales pesados pueden llegar a ser potencialmente tóxicos para los animales y los seres humanos como puede observarse en la tabla, por lo que su concentración en los lodos no debe sobrepasar valores límites admisibles según las normativas.

La concentración de metales pesados, de acuerdo con Hernández (1994), puede reducir la fermentación en los digestores, y la posibilidad de inutilizar los lodos para uso en agricultura. Es imprescindible señalar los siguientes efectos sobre la digestión:

- La toxicidad de los metales pesados sobre las bacterias decrece en el siguiente orden: Cr>Cu>Zn>Cd>Ni.

- Las concentraciones de metales pesados, reducen la producción de metano en un 10%, expresada en g/g de sólidos volátiles (S.V), son generalmente del siguiente orden: (Ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Concentración característica de algunos metales pesados en lodos (g/g) de sólidos volátiles.

Metal	Concentración
Cr	3.37x10 ⁻³
Cu	13.48x10 ⁻³
Zn	3.37x10 ⁻³
Ni	7.27x10 ⁻³
Cd	9.00x10 ⁻³

Fuente: Hernández, A. (1994). Depuración de Aguas Residuales.

La producción de gas disminuye el contenido de materia orgánica que permanece sin digerir, cuando la concentración de ácidos grasos volátiles y de sólidos volátiles aumenta en el licor de mezcla del digestor o cultivo biológico que se encuentra constituido por microorganismos congregados en flóculos simultáneamente con minerales y materia orgánica.

En la Tabla 2.4 se muestran concentraciones típicas de metales pesados que permiten procesos biológicos en el caso de lodos activados.

Tabla 2.4. Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos.

Lodos activados	Metales			
	Cr	Cu	Ni	Zn
Concentración en continuo en agua	10	1	1-2.5	0.08-1.0
Dosis en agua residual	500	75	50<200	160

Fuente: Hernández, A. (1994) Depuración de Aguas Residuales.

En la Tabla 2.5 se muestran los requerimientos establecidos sobre el contenido máximo de metales contaminantes en el compost en Estados Unidos (EPA) a partir de Residuos Sólidos Urbanos; de igual manera los referidos al contenido de metales pesados para el compost elaborado a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de acuerdo al Decreto 822 de 1998 de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Tabla 2.5. Límites máximos de metales pesados.

Nro.	Metal	Tierras agrícolas y forestales, sitios públicos, recuperación de suelos*		Límites máximos permitidos en compost**(mg/kg - peso seco)
		Concentración máxima (mg/kg)	Aplicación máxima (kg/ha)	
1	Arsénico	75	41	54
2	Cadmio	85	39	18
3	Cromo	3000	3000	1200
4	Cobre	4300	1500	1200
5	Plomo	840	300	300
6	Mercurio	57	17	300
7	Molibdeno	75	18	20
8	Níquel	420	420	180
9	Selenio	100	100	14
10	Zinc	7000	2800	1800

Fuente: (*Norma 503 EPA, ** Decreto 822/98 Ministerio de Desarrollo)

Como fuente de polución generalmente puede señalarse las industrias mineras y de refinerías de petróleo. La emisión de estas industrias a los sistemas hídricos modifica considerablemente el ecosistema, puesto que se manifiesta la bioacumulación en los organismos acuáticos de metales pesados y mercurio, así como de otros contaminantes.

De esta forma resulta importante que tales contaminantes se sometan a tratamiento en plantas de aguas residuales para restringir su introducción en la cadena alimenticia. Asimismo, es preciso estudiar cómo se deben remover aquellos ya inmersos, prioridad para las industrias responsables,

con vistas a que replanteen en sus procesos el empleo de determinados químicos perjudiciales para los ecosistemas.

2.2.3.2 La existencia de organismos patógenos

Para que suceda todo proceso biológico, los organismos necesitarán de la coexistencia de tres factores esenciales:

- Nutrientes suficientes
- Ausencia de compuestos tóxicos
- Condiciones ambientales apropiadas.

Para las bacterias de manera general se requerirá esencialmente, carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno; en pequeña medida, fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro y magnesio, y como agregado nutricional cuantías mínimas de zinc y molibdeno. No es muy inusual la presencia de los nutrientes demandados para el desarrollo y proliferación de las bacterias.

En gran parte de las aguas servidas industriales se encuentran compuestos que resultan difíciles o improbables a degradar microbiológicamente, por lo que resulta imprescindible el empleo de procesos físico-químicos previos para removerlos. Para la descomposición de algunos materiales, por ejemplo la lignina, será necesaria la presencia de bacterias especializadas, pues no todas las bacterias tienen la capacidad de producción de enzima celulosa.

Observado desde una óptica global, principalmente en los países en vías de desarrollo, no existe una adecuada capacidad para tratar las aguas residuales. Esta se debe a la superpoblación, la escasez de suficiente alcantarillado, el desconocimiento de algunos funcionarios y empleados que

trabajan en los organismos de control ambiental y por el elevado coste de la construcción de plantas de transformación de las aguas residuales.

Como consecuencia de este tratamiento impropio de las aguas servidas, potencialmente se incrementan los riesgos de enfermedades. Es así como lo plantea Jong-Wook (2004) al expresar que:

El agua y el saneamiento son uno de los principales motores de la salud pública. Suelo referirme a ellos como «Salud 101», lo que significa que en cuanto se pueda garantizar el acceso al agua salubre y a instalaciones sanitarias adecuadas para todos, independientemente de la diferencia de sus condiciones de vida, se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades. (p. 10)

Como ejemplo de esta situación se puede mencionar a África y Asia, donde existen grandes conglomerados de personas en condiciones de extrema pobreza, insalubridad, sin acceso a los más elementales servicios y en situaciones de inestabilidad política, que no permite a los gobiernos ocuparse de sus problemas.

El mayor uso dado a los lodos residuales tratados en las plantas es destinado a la agricultura, por ejemplo la planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Managua, Nicaragua, funciona por medio de un filtrado total. La planta también cuenta con un sistema de lodo que produce tierra fértil para usarse en la agricultura, con una capacidad de procesamiento de hasta 180 mil m³ de aguas residuales por día.

Existen riesgos para la salud colectiva si las aguas residuales se colectan, pero no les trata debidamente antes de su eliminación o reutilización. Las plantas de tratamiento de aguas servidas se construyen para evitar o mitigar los efectos de las sustancias que contaminan y afectan

tanto al hombre, como a los demás seres vivos. Según (Benítez, Ortega, Vanegas & Vergara, 2015) estos proyectos tienen impactos directos e indirectos.

Los impactos directos, la disminución de molestias y peligros para la salud, mejoramientos en la calidad y uso beneficiosos de las aguas receptoras. La instalación de un sistema de recolección y tratamiento de las aguas servidas posibilita un control más efectivo de las aguas servidas industriales mediante su tratamiento previo y conexión con el alcantarillado público, y ofrece el potencial para la reutilización beneficiosa del efluente tratado y de los fangos.

Los impactos indirectos, la provisión de sitios de servicio para el desarrollo, mayor productividad y rentas de las pesquerías, mayores actividades y rentas turísticas y recreativas, mayor productividad agrícola y forestal o menores requerimientos para los fertilizantes químicos.

La información y el monitoreo sobre la calidad microbiológica de los lodos es mínima o inexistente en gran parte de los países en vías de desarrollo y constituye el principal obstáculo en la disposición del lodo para tierra agrícola, sobre todo por el riesgo potencial que representan las enfermedades virales, bacterianas y parasitológicas de origen fecal, transmitidas a través del ciclo: hombre-lodo tierra-cultivo-hombre. (Research Gate, s.f.)

Uno de los riesgos para la salud más frecuentes en el tratamiento inadecuado de las aguas presente en los lodos que se utilizan en la agricultura es el huevo de helminto. Este término, que significa gusano, se usa sobre todo en parasitología para referirse a especies animales de cuerpo largo o blando que infestan el organismo de otras especies, y en especial al hombre. El procesamiento inadecuado del mismo podría provocar cólera, fiebre tifoidea, poliomielitis, meningitis, hepatitis, diarrea,

entre otras. A pesar de que estos padecimientos normalmente no causan la muerte, sí modifican el ritmo de vida normal de las personas y disminuyen la capacidad de trabajo con la aparición de efectos colaterales.

Los huevos de helminto se han convertido en uno de los principales grupos indicadores de contaminación microbiológica en muestras de lodos y aguas residuales. De acuerdo a Valderrama (2013), las concentraciones de microorganismos patógenos de acuerdo a la Norma EPA 40 CFR 503 limita las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos.

En el lodo Clase “A” las concentraciones de microorganismo son tan bajas que no genera riesgos en la salud pública, puede utilizarse en la agricultura sin ningún tipo de restricción. Para que un lodo adquiriera las características de clase “A” debe someterse a tratamientos de desinfección, los cuales garanticen la reducción de las concentraciones de los microorganismos patógenos presentes en el material hasta niveles no infecciosos.

Para esto, las concentraciones finales no deben sobrepasar las máximas admitidas por la EPA, tal como se observa en la Tabla 2.6

Tabla 2.6. Concentración máxima de microorganismos patógenos según EPA 40 CFR 503.

Parámetro	Concentraciones
Coliformes fecales	< 1.0E+03 UFC/g Base Seca
Salmonella	< 3.0 NMP/4g Base Seca
Enterovirus	< 1 PFP/4g Base Seca
Huevos de helminto	< 1 huevo viable/4g Base Seca

Fuente: Valderrama, M. (2013) Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del Municipio de Chinavita (Boyacá) (Tesis de Maestría).

En la tabla 2.6 PFP se refiere a las partículas formadoras de placa.

Los biosólidos clase “A” pueden utilizarse sin restricciones de sitio de aplicación, por lo cual antes de su utilización, deben examinarse las concentraciones de coliformes fecales o Salmonella, ya que las bacterias pueden presentar recrecimiento, aun después de aplicados los tratamientos de desinfección. Esto no ocurre con los virus, ni con los parásitos, ya que estos microorganismos requieren de un huésped para llegar a su estado infectivo. Las bacterias pueden reproducirse si las condiciones ambientales, como humedad y temperatura, lo permiten (Araque, 2006).

Los lodos Clase “B” constituyen un material con mayor contenido patogénico, la EPA reglamentó una serie de normas de manejo para este material cuando es aplicado sobre terrenos agrícolas y no agrícolas. Estos lodos deben ser monitoreados constantemente, se analizan los coliformes fecales y su concentración debe ser menor de $2.0E+06$ UFC/g seco, no es necesario analizar los enterovirus, ni huevos de helminto.

2.2.4 Utilización del lodo para la obtención de materiales de construcción. Obtención de productos cerámicos

2.2.4.1 Fabricación de árido ligero

Conforme al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), se ha evaluado la posible utilización de los lodos de tratamiento de agua para la producción de árido ligero, tanto para uso estructural ($d_p=1.2$ a 1.8 g/cm³) como no estructural ($d_p < 1,0$ g/cm³). Los resultados obtenidos, que han incluido pruebas a gran escala, indican que se pueden obtener este tipo de áridos en un horno rotatorio comercial.

Los áridos resultantes presentan una densidad de partícula de $1,35$ g/cm³ o $0,98$ g/cm³ y una densidad aparente de 726 kg/m³ o 518 kg/m³

para el árido ligero estructural y no estructural, respectivamente. El primero cumple con los requisitos de norma ASTM C330 “Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete”.

El proceso de producción del árido ligero consiste fundamentalmente en tres fases principales:

- *Mezcla, homogeneización, trituración y paletización*, la mezcla se granula a tamaños entre 5-10 mm de diámetro, utilizando posteriormente un mezclador de tambor para obtener una forma esférica.

- *Secado de la mezcla*, esta etapa se realiza aprovechando el calor residual del proceso, a una temperatura de 100°C.

- *Sinterización de los gránulos*, es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

En la fabricación de cerámicas, este tratamiento térmico transforma un producto en polvo en otro compacto y coherente. La sinterización se utiliza de modo generalizado para producir formas cerámicas de alúmina, berilia, ferrita y titanatos. Este proceso se realiza mediante cocción a 1000°C durante 10-15 min.

Se han estudiado áridos ligeros obtenidos con diferentes porcentajes de arcilla y lodos, obteniendo que las mezclas con un 75% de lodo producen áridos de calidad adecuada para usos no estructurales, en relación a la densidad, absorción de agua, resistencia al desgaste y lixiviación de metales pesados. En particular, la absorción de agua de este tipo de árido ligero es aproximadamente un 50% inferior a la del árido ligero convencional.

La utilización de lodos de depuradora provoca una disminución de la resistencia a compresión y flexión de hormigón, tanto mayor cuanto mayor es el porcentaje de lodo utilizado, pudiendo obtener hormigones ligeros de uso no estructural ($f_{cm} > 15 \text{ N/mm}^2$) con una densidad entre 1400-1500 kg/m^3 y conductividad térmica de 0,59 a 0,73 W/mK ., de acuerdo a lo observado en el catálogo de residuos, (CEDEX, 2013).

2.2.4.2 Fabricación de cemento

Existen estudios mencionados por el CEDEX en el catálogo 2013, sobre la utilización de lodos de aguas residuales previamente tratados con cal, como materia prima alternativa en la fabricación del clinker, aportando calcio en el crudo en sustitución de la caliza. Los resultados realizados indicaron que la clinkerización del crudo con este material produce clínkeres de composición mineralógica adecuada, similar a la obtenida utilizando un crudo industrial.

En lo referente a los resultados del análisis de riesgo de la utilización de este material, se concluye que el tratamiento elimina a los microorganismos presentes en los lodos y por tanto, el riesgo biológico asociado.

Se están realizando estudios sobre la utilización de los pellets de los lodos de depuradora (PLD) que son partículas de lodo de depuradora seco con un diámetro comprendido entre 1 y 5 milímetros para la fabricación de cementos. Unos primeros resultados muestran que sería posible reducir el resto de materias primas, especialmente la adición de caliza.

2.2.4.3 Fabricación de morteros

El CEDEX, mencionado en el apartado anterior, indica que los PLD tienen una alta proporción de materia orgánica, entre un 45% a 50%, una elevada porosidad y presencia de fibras, pero aun así se están realizando ensayos de aplicación en morteros. Las pruebas demuestran que la resistencia disminuye con la adición de los pellets pero se pueden conseguir resistencias aptas para un elevado número de aplicaciones. Gracias a la alcalinidad y la impermeabilidad de los morteros, los pellets permanecen estables ante la lixiviación, encontrándose una alta capacidad de retención por la matriz hidráulica, una escasa lixiviación de los elementos metálicos y una despreciable liberación de elementos tóxicos. Además, se han conseguido resistencias considerables añadiendo acelerantes al mortero.

La incorporación de un residuo como el fango en una matriz con cemento provoca alteraciones en su comportamiento normal debido básicamente al contenido de materia orgánica, que actúa como un retardador de fraguado, y de algunos metales pesados que interfieren en las reacciones de endurecimiento.

Otros estudios han obtenido que las resistencias de hormigones con un 2,5-5% de lodo son similares a las de un hormigón convencional, pero si se añade hasta un 10% las resistencias disminuyen considerablemente, lo que descarta la adición de lodo en grandes proporciones al hormigón. Estos estudios también muestran que la lixiviación de los metales pesados es prácticamente inexistente en los hormigones con pequeñas cantidades de lodos, aunque la porosidad aumenta y la velocidad de carbonatación también. Al añadir pequeñas cantidades de lodo al hormigón, éste podría utilizarse como hormigón de baja resistencia.

En España se han realizado algunos estudios sobre la utilización de lodos secos de depuradora en el hormigón. Así, se fabricaron adoquines con un 2% de lodo seco sobre el peso del cemento y se determinaron las propiedades de dicho producto comparadas con el producto sin adición del lodo.

Se concluye, que la adición de lodos de depuradoras al hormigón puede suponer una disminución de la porosidad y de la absorción y un aumento de la resistencia mecánica, lo que lleva a que la utilización de los lodos en los adoquines aumente su durabilidad. En cuanto a los contaminantes lixiviables que presentaron los adoquines se comprobó que estaban por debajo de los exigidos por la norma holandesa NEN, para la adición de residuos en matrices cementantes, lo que indica que pueden ser clasificados como productos inertes.

2.2.4.4 Fabricación de ladrillos.

Otros estudios realizados por CEDEX sobre la valorización de fangos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) en la fabricación de ladrillos, resulta de especial interés porque determinados materiales cerámicos disponen de gran capacidad de inertización de metales pesados. Este término técnico significa "dejar quieto", "dejar inactivo", se aplica en la ingeniería ambiental para indicar un proceso de tratamiento de residuos catalogados como residuos peligrosos, sean líquidos o sólidos, para inactivar o minimizar su potencial naturaleza química y su posterior disposición final.

Durante la cocción, los compuestos orgánicos del fango: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales

pesados, etc.), quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inmovilizados.

Los costos de fabricación de un producto de cerámica estructural se pueden desglosar en un 25% correspondiente a la materia prima, un 25% de costos energéticos y un 50% de amortización y costos laborales. En general, la introducción de fangos en matrices cerámicas tiene aspectos positivos energéticamente, pudiéndose apuntar los siguientes:

- Importante ahorro energético durante la cocción cerámica en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los fangos (en cualquier caso, el balance total energético debe tener en cuenta también el proceso de secado).
- Ahorro del consumo de agua por la aportación de los fangos (contienen un promedio del 70% de humedad).
- Poder calorífico de los fangos, que aproximadamente se sitúa en las 3.400 kcal/kg.

El máximo porcentaje de lodos que se podría mezclar con la arcilla cerámica está en el entorno del 40%, aunque con esta cantidad, la adherencia de la mezcla es pobre y la textura superficial del ladrillo irregular. Así, las proporciones óptimas están entre el 10% y 20%, (CEDEX, 2013).

Tabla 2.7. Variación de las propiedades de los ladrillos (% de la mezcla de referencia sin lodos).

PROPIEDADES		Incorporación del 10% de fangos	Incorporación del 40% de fangos
Peso específico		97%	83%
Retracción (Contracción)	Antes de la cocción	105%	100%
Después de la cocción		102%	130%
Pérdida al fuego		200%	400%
Resistencia a compresión		70%	43%

Fuente: CEDEX, (2013). Catálogo de residuos.

2.2.5 Proceso de fabricación del ladrillo utilizando los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales. Su impacto ambiental

El empleo de diferentes tipos de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales para la fabricación de ladrillos cerámicos cocidos, siempre induce muchas ventajas en las propiedades físicas y mecánicas, como baja densidad, ladrillos aligerados, mayor fortaleza e incluso reducción del consumo de energía durante la cocción a pesar de algunos inconvenientes demostrados, (Castells, 2000).

Además, se ha confirmado a través de investigaciones, un significativo bajo impacto ambiental al incorporar estos lodos a la fabricación de ladrillos. Luego de haberlos incorporado, la mayor parte de su composición química tanto como los metales pesados fueron extintos durante la cocción o solidificados durante el curado, así el producto final es totalmente conforme a las normas. De manera general, la utilización de lodos recuperados para fabricación de ladrillos cerámicos produce ladrillos de buena calidad a la vez que provee de una disposición final amigable con el medio ambiente para estos lodos, (Montaño, 2011).

En la fabricación de ladrillos y elementos de mampostería el material más empleado es la arcilla. Dentro de la mampostería se distinguen tres tipos básicos de unidades de arcilla cocida, diferenciados atendiendo a la disposición del volumen de sus orificios y la cantidad que estos presenten.

Conforme a lo anteriormente expuesto por los investigadores García Ubaque, García Vaca y Vaca Bohórquez, (2013), las unidades pueden ser de Perforación Vertical (PV), Perforación Horizontal (PH) y Macizos (M). El uso dado a cada tipo de unidad y sus respectivas características físicas deben estar de acuerdo con los cálculos y requisitos demandados por las normas sismo resistente, para garantizar la estabilidad de la estructura. Los requisitos a satisfacer por las unidades de mampostería son:

- *Absorción de agua*, agua absorbida por los poros de la unidad con respecto al peso seco.
- *Resistencia mecánica a la compresión*, resistencia mínima nominal de la mampostería a compresión, medida sobre el área transversal neta y sobre la cual se basa su diseño.
- *Tasa inicial de absorción*, es la medida de la cantidad de agua que absorbe una unidad de mampostería de arcilla en contacto con el agua por unidad de área, durante un minuto.

A las propiedades descritas anteriormente se pueden añadir otros requisitos y características especiales de diseño y calidad, por razones de exigencias acústicas, térmicas, de resistencia al fuego, arquitectónica o constructiva, pero deben cumplir con las exigencias de absorción de agua y resistencia a la compresión para su uso primordial que puede ser para interiores, exteriores o estructurales. Las unidades de mampostería arquitectónica pueden tener formas, texturas y acabados libres, pero,

igualmente, deben mantener los requisitos pertinentes para su aplicación principal.

La introducción de lodos procedentes de PTAR es viable, puesto que existe similitud de composición química entre ambos compuestos químicos, como así le han demostrado García Ubaque, García Vaca y Vaca Bohórquez en su estudio publicado en 2013, y se muestra en la tabla a continuación.

Los lodos utilizados presentan un alto contenido tanto de materia inorgánica como de minerales de sílice junto con óxidos de diferentes metales, propios del proceso. (García Ubaque, et al.)

Tabla 2.8. Composición de lodos y arcilla.

LODOS PTAR		ARCILLAS	
Sustancia	%	Sustancia	%
SiO ₂	41	SiO ₂	58.5
Al ₂ O ₃	16	Al ₂ O ₃	24.7
CaO	12.5	CaO	0.5
MgO	2.5	MgO	0.3
Fe ₂ O ₃	8.6	Fe ₂ O ₃	4.8
P ₂ O ₅	8.4	P ₂ O ₅	0.5
N ₂ O ₅	3.5	TiO ₂	0.9
CaCO ₃	2.5	K ₂ O	1.5
K ₂ O	0.8	MnO	0.8
MnO	0.7	Humedad	7.5
TiO ₂	1.1		
Fe ₂ SiO ₄	0.4		
Humedad	2.0		

Fuente: García Ubaque, C; García Vaca, M & Vaca Bohórquez, M. (2013). Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

En esta categoría se incluyen los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales domésticas, de la industria del papel, hierro, arsénico, cenizas de lodos y curtiduría. Incorporaron estos lodos en partes de los componentes como le sigue 5%, 15%, 25% y 50% en lodos de hierro y

arsénico para fabricar ladrillos cocidos a tres rangos de temperaturas: 950°C, 1000°C y 1050°C.

En este estudio (García Ubaque et al.) se pretendió demostrar que la humedad óptima del lodo oscila del 15% al 18% para sustituciones del orden del 15% al 25%. Concluían además que la resistencia a compresión del ladrillo depende significativamente de las cantidades de lodo incorporadas y de la temperatura de cocción.

Los resultados mostraban que la sustitución ideal es el 15% de lodo del peso total, con temperatura de cocción de 1000°C. Sin embargo, la resistencia de la fábrica puede ser tan alta como en ladrillos normales, con sustituciones de material por lodos hasta el 25% con temperatura de cocción de 1050°C.

El área superficial específica de la correspondiente mezcla, la finura de las partículas y los requerimientos de agua incrementan proporcionalmente a la cantidad de lodo agregada a la arcilla. Sin embargo, disminuye el comportamiento plástico de la arcilla. La absorción de agua del ladrillo también disminuye cuando se reducen las cantidades de lodo añadidas, con un incremento en la temperatura de cocción. La cantidad de lodo añadido es inversamente relativa a la densidad de masa seca.

Con el contenido de humedad adecuado en la mezcla, ninguna deformación o superficies desiguales no se manifestaron en ninguna de las muestras a ninguna de las temperaturas. La proporción de lodo añadido y la temperatura de cocción son los dos principales factores para controlar la retracción en el proceso de quema y para producir un ladrillo de buena calidad a la vez. Se demostró que las características propias de ladrillos cerámicos normales se mantienen con una sustitución del 25% en lodo y la

lixiviación de arsénico es reducida cuando se cosen las piezas a altas temperaturas.

Otro estudio fue realizado por Tay (1987) al emplear lodos de aguas residuales municipales mezcladas con arcillas para producir ladrillos. Los porcentajes en peso de sustitución utilizados en esta ocasión fueron entre el 10% y 40% a 1080°C de temperatura de cocción. La retracción y la absorción, luego de cocidas las muestras, incrementaron con el aumento de sustitución de lodos. En el producto terminado, se encontraron superficialmente áreas irregulares, debido al contenido orgánico del lodo.

En otra ocasión, el investigador mencionado anteriormente utilizó ceniza de lodo, que era recolectada después de la incineración de los lodos a 600°C. La adición de un 10% a 50 % de cenizas de lodo pulverizado se llevó a cabo y se concluyó que un 50% por peso es el máximo valor para producir un buen aglomerado de ladrillo. La absorción del agua aumenta a medida que es incorporada mayor cantidad de ceniza de lodo.

La resistencia obtenida en las pruebas fue más alta que la normalmente obtenida en ladrillos de arcilla con 10% de cenizas de lodo y mucho mejor que los de arcilla con lodo seco. El máximo porcentaje de lodos secos y cenizas de lodo municipales que podría ser mezclado con arcilla para la fabricación de ladrillos es 40% y 50% por peso, respectivamente.

Evidencias de las pruebas realizadas sobre el producto lodos también mostraron resultados positivos, sin signos de problemas de contaminación potencial por aplicaciones similares. Tay y Yip (1989), también informaron que eran “bioladrillos” manufacturados con arcilla mezclada y esquisto con lodos con un contenido sólido, que oscila entre un 15% y 25%.

Liew (2004), discutió la incorporación de lodos de aguas residuales en ladrillos de arcilla y su caracterización. En este estudio, del 10% al 40% del peso de lodo seco fue añadido para producir ladrillos de arcilla. El ladrillo manufacturado era moldeado a mano mediante un método de compactación y horneado a 985°C. Aunque la superficie exterior de los ladrillos de arcilla mejorados con lodo era más bien rugosa y pobre, un contenido de lodo de hasta un 40% todavía cumplía con los estándares requeridos en términos de propiedades físicas y químicas.

Sin embargo, los investigadores concluyeron con este estudio, que el porcentaje máximo de lodo no podía ser mayor que el 30% del peso debido a su fragilidad y que la adición de un 20% de lodo mantendría las características funcionales del ladrillo.

En general, un alto contenido de lodo añadido a la mezcla del ladrillo de arcilla aumenta su contracción de secado pero disminuye la contracción de cocción. El valor de absorción de agua aumenta hasta un 37% y la resistencia a compresión disminuye a 2 N/mm² contra 15,8 N/mm² para el control del ladrillo, los cuales fueron obtenidos con la adición de un 40% de lodo.

Gases, incluyendo vapor y CO₂, fueron emitidos durante el proceso de cocción debido a la combustión del contenido orgánico en el lodo. Simultáneamente, un agrietamiento y expansión fueron observados también en el ladrillo cocido. Las secciones transversales del ladrillo también revelaban muestras negras atribuidas a la materia orgánica.

Un significativo incremento de los poros fue identificado y contribuye a las propiedades mecánicas que fueron alcanzadas con la inclusión de lodo desde un 10 al 40%. Debido a todas sus debilidades, los ladrillos fabricados

en este estudio son considerados apropiados solamente como ladrillos comunes debido a la deficiente superficie exterior.

La validación de la cantidad específica de valor calorífico es difícil de verificar pero un valor calorífico estimado de 10,000 kJ/kg de fracción seca es estimado para salvar desde el 10% (Mesaros, 1989) hasta el 40% y podría aumentar. Según varios autores, una contribución positiva puede ser alcanzada desde menos de 2% hasta un 25% a 30% (Allemen, 1989) de los residuos añadidos a la arcilla de ladrillo. Asimismo, se expresó (Brosnan & Hochleitner, 1992 & Mesaros, 1989) que un elevado contenido de lodo podría conducir a resultados negativos para el ladrillo manufacturado.

Las principales ventajas están relacionadas con la cantidad de energía ahorrada y la manera ambientalmente amistosa de disponer de los residuos de lodo (Churchill, 1994 & Slim & Wakefield, 1991).

El aumento de la plasticidad debido a la naturaleza fibrosa de los residuos añadidos hace más fácil el moldeo del ladrillo (Allemen, 1987; Mesaros, 1989). Sin embargo, los resultados de contracción seca obtenidos no estaban de acuerdo, ya que algunos casos parecían mostrar un aumento significativo en la contracción con la formación de grietas durante el proceso de secado (Allemen, et al) mientras que otros mostraban menos contracción en seco y sensibilidad de secado (Brosnan & Hochleitner, 1992).

En otros artículos revisados consta que donde utilizaban lodos de plantas de tratamiento se revelaba un porcentaje aumentado de la absorción de agua, la contracción de cocción y una disminución en la densidad seca, por ejemplo un 30% de los lodos de aguas residuales redujo la densidad seca un 15% (Tay, 1987). De la misma manera, este autor indicó que la resistencia mecánica también disminuyó de un 40 a un 30%, y con una

mayor adición de lodos (40%), se observó hasta un 50 % de reducción de la resistencia.

Aspectos negativos del proceso de cocción incluyen el olor desagradable emitido por el efecto de las eflorescencias y la presencia de manchas negras en el producto final (Brosnan & Hochleitner, 1992). Dondi (1997) también revisó el lodo procedente del proceso de tratamiento de aguas residuales de la industria del papel. Con un 20 % de masa de peso seco de sustancias orgánicas y un valor calorífico de alrededor de 8400 kJ / kg, el peso del ladrillo fue reducido por más de un 50% de la masa (Zani, 1990) debido al gran contenido orgánico en los residuos.

También afirmaron, que se llevaron a cabo estudios de incorporación y no más de un 10 % en masa de los lodos se secó para los cuerpos de arcilla. Se concluyó que el rango óptimo estaba entre un 3% y 8% de la masa. La incorporación del lodo en el cuerpo del ladrillo aumenta la contracción seca y el contenido de agua requerido para el ladrillo fabricado.

No ocurrieron problemas significativos durante el moldeo y el proceso de secado aunque, de acuerdo al autor citado anteriormente, algunos estudios revelaron que la naturaleza fibrosa de los residuos conllevó a dificultades durante la conformación y moldeo, de igual manera afectó a la cantidad de residuos que debían ser incorporados.

Según, Kutassy (1982) una baja adición de estos residuos no afectó a las propiedades de ladrillo extensivamente, pero sí condicionó un ligero aumento en la absorción de agua, una insignificante reducción en la resistencia mecánica y el deterioro de los ladrillos cocidos fueron algunos de los efectos de la adición de los residuos. Además, para (Zani, 1990) el ahorro de combustible varía desde valores muy bajos hasta

aproximadamente 18 % con la incorporación de lodos. Sin embargo, se hicieron conclusiones diferentes entre los estudios realizados. Se alegó que estos residuos ofrecen beneficios económicos mientras que todavía mantienen las propiedades de los ladrillos fabricados.

Contextualizando este estudio en Ecuador, Bermeo e Idrovo (2014), han llevado a cabo estudios similares para el reciclado de lodos procedentes de las PTAR y de las Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAPS), fundamentalmente en la Universidad de Cuenca, donde en el 2014 se establecían como objetivo la utilización de los lodos de PTAP y PTAR como agregados para materiales de construcción, caracterizando los productos finales tanto física como mecánicamente.

La sustitución de hasta el 15% del árido fino por el lodo desecado de PTAP y PTAR, disminuye considerable la resistencia a la compresión y tracción indirecta en las probetas que contenía lodo proveniente de la planta potabilizadora. Siendo diferente en las probetas elaboradas con lodo desecado de la planta depuradora, mostrando mejor desempeño para probables usos estructurales; se presume sea debido al aporte de aluminio y hierro dominantes en la composición del lodo, que contribuyen a la formación de la matriz cementante.

Se recomienda como porcentaje óptimo de sustitución de árido fino el 10% con lodos provenientes de PTAR, con el cual se alcanza a los 28 días de edad una resistencia a compresión de 198.61 kg/cm² y resistencia a tracción indirecta una carga máxima de 86.20 KN. Para la primera propiedad muy similar al valor de diseño del hormigón y para la siguiente supera en 22.7% al valor de la probeta usada como testigo.

Las probetas confeccionadas con lodo desecado de la planta potabilizadora muestran signos de corrosión a causa de la presencia de iones de sulfato. La granulometría de los lodos desecados de ambas fuentes para la sustitución en cualquiera de los porcentajes, transforma desfavorablemente la granulometría del árido fino que es el responsables de reducir los vacíos entre agregados.

En cuanto a la fabricación de ladrillos, no se aconseja el uso del lodo de las potabilizadoras. Los nuevos ladrillos de lodos de la planta de “Ucubamba” tienen mayor semejanza visual a los de elaboración tradicional. En términos de resistencia los nuevos ladrillos que incorporan lodo presentan un incremento del 54% en relación al ladrillo convencional, considerando el 5% como porcentaje óptimo de sustitución del peso del ladrillo para la obtención de estos resultados.

Las emisiones producidas de los principales gases (CO, NO₂, SO₂), emiten concentraciones dentro de límite permisible, garantizando así un ambiente laboral adecuado.

En conclusión, se recomienda además en el mismo estudio, el análisis continuo de los lodos producidos en las lagunas de estabilización; puesto que, los componentes tienen estrecha relación con las características del agua residual cruda, por lo que la utilidad del lodo será variable y en función del tiempo de residencia en las lagunas, (Bermeo & Idrovo, 2014).

Capítulo 3

Metodología

3.1 Revisión de los principales sitios de producción de lodos residuales y entrevistas a sus técnicos.

Con la finalidad de lograr la fabricación de los ladrillos, utilizando los lodos provenientes de aguas residuales, se efectuaron visitas a distintas PTAR ubicadas en nuestra ciudad. Se incluyó visitas a las plantas administradas por empresa proveedora del servicio de alcantarillado, las localizadas en la vía Terminal Terrestre-Pascuales, planta El Tornillo y planta Guayacanes-Samanes. Se revisó también las plantas de tratamiento ubicadas en la vía a la costa.

Estas revisiones tuvieron como objetivo analizar los volúmenes de lodos que se producen y localizar el sitio de muestreo apropiado para el presente proyecto experimental. Se pudo observar que no se realizan análisis a estos lodos con frecuencia, por lo tanto, el enfoque prioritario es observar la calidad del efluente. La remoción de lodos en las lagunas de oxidación se realiza cada cuatro años por razones de presupuesto.

Entre las plantas de tratamiento que se revisaron se destacan las siguientes:

- Planta de tratamiento Terranostra I
- Planta de tratamiento Terranostra II
- Planta de tratamiento Belohorizonte
- Planta de tratamiento Portofino
- Planta de tratamiento Valle Alto
- Planta de tratamiento Portal Al Sol
- Planta de tratamiento Ciudad Santiago (vía a Daule)
- Planta de tratamiento Bosques de Castilla (vía a Samborondón)

- Planta de tratamiento urbanización Guayaquil Tennis (vía a Samborondón)
- Planta de tratamiento urbanización La Puntilla (vía a Samborondón)
- Canales de aguas servidas de la ciudad

Paralelamente se pudieron realizar entrevistas a los técnicos encargados de las plantas, quienes compartieron información referente al manejo logístico de los lodos y sobre el funcionamiento de las plantas de tratamiento.

Figura 3.1 Lodos residuales en proceso de deshidratación de la Planta El Tornillo-Guayaquil.



Figura 3.2 Lodos residuales en proceso de deshidratación de la Planta El Tornillo–Guayaquil.



Figura 3.3 Vista en planta de lugar provisional de disposición de lodos residuales en la Planta El Tornillo–Guayaquil.



Figura 3.4 Producción de lodos residuales. Planta de tratamiento de aguas AASS en la Urbanización Terranostra I de Guayaquil.



Figura 3.5 Producción de lodos residuales. Planta de tratamiento de aguas AASS en la Urbanización Ciudad Santiago de Guayaquil.



3.2 Visita al relleno sanitario de Las Iguanas.

Como parte de este trabajo investigativo se realizaron visitas al relleno sanitario de Las Iguanas, donde se depositan parte de estos lodos residuales, provenientes de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales y también de canales de drenaje de aguas servidas de la ciudad.

Se pudo analizar el proceso de traslado en volquetas, vaciado y enterramiento de estos lodos en el mencionado relleno sanitario.

Figura 3.6 Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de Guayaquil para el relleno sanitario de Las Iguanas.



Figura 3.7 Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de Guayaquil para el relleno sanitario de Las Iguanas.



Figura 3.8 Lodos residuales provenientes de la limpieza de canales de drenaje de AASS de la ciudad de Guayaquil. Relleno sanitario de Las Iguanas.



3.3 Elección de la muestra de lodos residuales.

Concluidos los recorridos y visitas a las diversas plantas de tratamiento, se procedió a seleccionar la planta de tratamiento de la urbanización Portal al Sol ubicada en el km 11 ½ de la vía Costa, para la realización de la respectiva toma de muestras para la fabricación a futuro de ladrillos artesanales con adiciones de estos lodos residuales.

En esta planta se localizó lodo residual, cuyo proceso de secado se inició en diciembre del 2014. El secado se había realizado de forma natural, aprovechando los rayos UV en una cámara construida para el efecto. De la información táctil visual en el sitio se estima que la humedad natural actual de la muestra está alrededor del 25%.

También se aprecia que estos lodos están biológicamente estabilizados y que pueden ser utilizados como un componente en la fabricación de ladrillos artesanales con adiciones de lodos residuales.

Figura 3.9 Área de deshidratación final de lodos residuales en la Planta de tratamiento de AASS de la Urbanización Portal al Sol - Guayaquil.



Figura 3.10 Toma de muestra de lodos residuales de la Planta de tratamiento de AASS de la urbanización Portal al Sol - Guayaquil.



3.4 Ubicación del sitio experimental y contratación de personal idóneo.

Para la elaboración de ladrillos artesanales experimentales con adiciones de lodos residuales y la posterior quema de los mismos fue necesaria la contratación de una cuadrilla de trabajadores hábiles en esta actividad artesanal para poder asegurar la calidad de las muestras que se iban a fabricar. Además, se provisionó al personal de equipos de protección individual por la presencia de patógenos.

De la misma manera, fue necesario ubicar el sitio apropiado en cuanto a accesos y molestias a los vecinos para poder realizar el mencionado trabajo experimental, así como la consideración de alguna medida de seguridad. Este sitio fue ubicado en el noroeste de la ciudad de Guayaquil, en una zona de topografía ondulada, donde las depresiones se han

rellenado con sedimentos arcillosos erosionados de las laderas de las elevaciones constituidas por arcillas residuales de la formación Piñón.

Estas arcillas sedimentarias de las depresiones mencionadas, constituyó la matriz principal del ladrillo artesanal con adiciones de lodos residuales que se procedió a fabricar.

3.5 Procesamiento de la muestra, fabricación de ladrillos artesanales con lodos residuales y proceso de secado.

Las adiciones porcentuales experimentales escogidas fueron 5:

- Ladrillos A (0% de adición de lodos residuales)
- Ladrillos B (10% de adición de lodos residuales)
- Ladrillos C (20% de adición de lodos residuales)
- Ladrillos D (30% de adición de lodos residuales)
- Ladrillos E (100% de adición de lodos residuales)

Para la fabricación de los ladrillos artesanales se retiró la cobertura vegetal ubicada sobre los sedimentos arcillosos de las depresiones. Se utilizó la arcilla de transición restante del sitio, a la que no se le practicó ensayo de contenido de materia orgánica, debido a que se le iba a agregar adiciones ricas en materia orgánica.

A esta arcilla sedimentaria natural del sitio, se le adicionaron los porcentajes de lodos residuales muestreados en la planta de tratamiento de Portal al Sol.

Las medidas del molde que se decidió utilizar fueron 14.5 x 29.5 x 9.5. Para este lote de fabricación experimental se utilizó aserrín para ayudar en la combustión. El agua que se empleó fue agua potable. Una vez lograda la trabajabilidad de la mezcla arcilla + lodos residuales + agua + aserrín, se

procedió a moldear los ladrillos y codificarlos de acuerdo al porcentaje de lodos residuales utilizado.

Se moldearon 300 ladrillos, 60 ladrillos por cada tipo de muestra que se proyectó analizar, 0%, 10%, 20%, 30% y 100% de adiciones de lodos residuales.

Conforme se incrementó el porcentaje de lodos residuales en la mezcla, aumentó la plasticidad de la misma y las dificultades en el manejo del molde. Se necesitó incrementar el contenido de humedad para retirar el ladrillo crudo del molde.

El proceso de secado de los ladrillos crudos se realizó de manera natural, aprovechando la radiación solar. El secado duró 15 días y durante el acompañamiento del mismo se observó el apareamiento de fisuras en las muestras con 100% de lodos residuales. En las muestras con 30% de lodos residuales el proceso de fisuración fue mínimo y poco visible. Las muestras con 10%, 20% y 0% de lodos residuales no sufrieron fisuramiento.

Figura 3.11 Día de la elaboración de los ladrillos artesanales, con adiciones de lodos residuales.



Figura 3.12 Preparación de ladrillos, muestra "A", cruda. Ladrillos muestra "A" posterior a la cocción.



Figura 3.13 Marcación de ladrillos muestra "E" con un contenido de 100% de lodos residuales.



Figura 3.14 Preparación de ladrillos, muestra “E”, con un contenido de 100% de lodos residuales.



Figura 3.15 Muestras “A” y “D”, con diferentes adiciones de lodos residuales, durante el proceso de secado.



Figura 3.16 Muestras “E” durante el proceso de secado.



3.6 Proceso de cocción de los ladrillos artesanales con adiciones de lodos residuales.

Una vez logrado el secado natural de todas las muestras de ladrillos crudos, se procedió a armar la pirámide de cocción para el respectivo incremento de la temperatura y el cocimiento de los ladrillos experimentales.

Se construyó una pirámide de 5.000 ladrillos aproximadamente para lograr una temperatura superior a los 750°C, de acuerdo con la literatura (Gnecco & Marquina, 2000). Por razones de accesibilidad al sitio, seguridad y presupuesto, se decidió no intentar medir la temperatura de cocción, y más bien ubicar los ladrillos, que posteriormente serían ensayados en el laboratorio, en la parte central de la pirámide, zona donde se asumió que habría la mayor temperatura.

Los ladrillos estuvieron sometidos a esta temperatura aproximadamente durante 3 días. Concluido este proceso se pudo observar que los ladrillos elaborados con el 100% de lodos residuales habían sufrido la quema parcial de la materia sólida, ya que la materia orgánica se quema cuando se superan los 550°C, y funciona como combustible. El manipuleo de los ladrillos tipo E se tornó difícil.

Figura 3.17 Elaboración de la pirámide de cocción.



Figura 3.18 Elaboración de la pirámide de cocción. Muestras con adiciones de lodos residuales colocadas en la pirámide de cocción.



Figura 3.19 Pirámide de cocción antes de la quema de ladrillos con diversos porcentajes de adición de lodos residuales.



Figura 3.20 Pirámide de cocción posterior al proceso de quema de ladrillos con muestras que contienen diversos porcentajes de lodos residuales adicionados.



Figura 3.21 Algunas muestras de ladrillos con diversas adiciones de lodos residuales después de la cocción.



3.7 Transporte y ensayos de laboratorio.

Concluido el proceso de quema, se embodegaron los especímenes con adiciones de lodos residuales, y en esta primera etapa, se transportaron al laboratorio 15 especímenes por cada tipo de mezcla, hasta esperar los primeros resultados de laboratorio, 10 para roturas a compresión simple y 5 para absorción y densidad.

Los ladrillos que fueron conducidos al laboratorio para ensayos, fueron tomados al azar, verificando apenas que los seleccionados para roturas, tengan sus aristas y deformaciones de tal manera que permitan su ubicación segura en la prensa.

En el laboratorio se realizaron ensayos de absorción, densidad y de compresión simple de los ladrillos en posición de canto, sugestiva de la

posición en la que trabajarían en una pared convencional. Además de las mediciones geométricas y de peso convencionales.

Figura 3.22 Muestras de ladrillos con adiciones de lodos residuales sumergidos en piscina para ensayo de absorción en laboratorio.



Figura 3.23 Ladrillo con adiciones de lodos residuales, muestra "D".



Figura 3.24 Muestras de ladrillos con diversas adiciones de lodos residuales siendo ensayados.



3.8 Resultados.

La Fig.3.25 muestra los resultados obtenidos en las pruebas de compresión simple en los ladrillos con adiciones de lodos residuales con 0, 10, 20, y 30%. La desviación estándar observada en las muestras tipo A estuvo alrededor de 2,75 kg/cm². Para las muestras tipo B alrededor de 7,25 kg/cm². Para las muestras tipo C 5,5 kg/cm² y para las muestras tipo D 2,1 kg/cm². Los ladrillos con 100% no fue posible romperlos porque había desagregación con el manipuleo de los mismos.

Figura 3.25 Distribución de la resistencia a la compresión simple promedio obtenida en las muestras ensayadas.



Las Imágenes 3.26 y 3.27 muestran los resultados obtenidos en las pruebas absorción y densidad obtenidas en los ladrillos con adiciones de lodos residuales con 0%, 10%, 20%, y 30%. En los ladrillos con 100% de lodos residuales no fue posible ensayarlos.

Figura 3.26 Distribución de la absorción promedio obtenida de las muestras ensayadas.

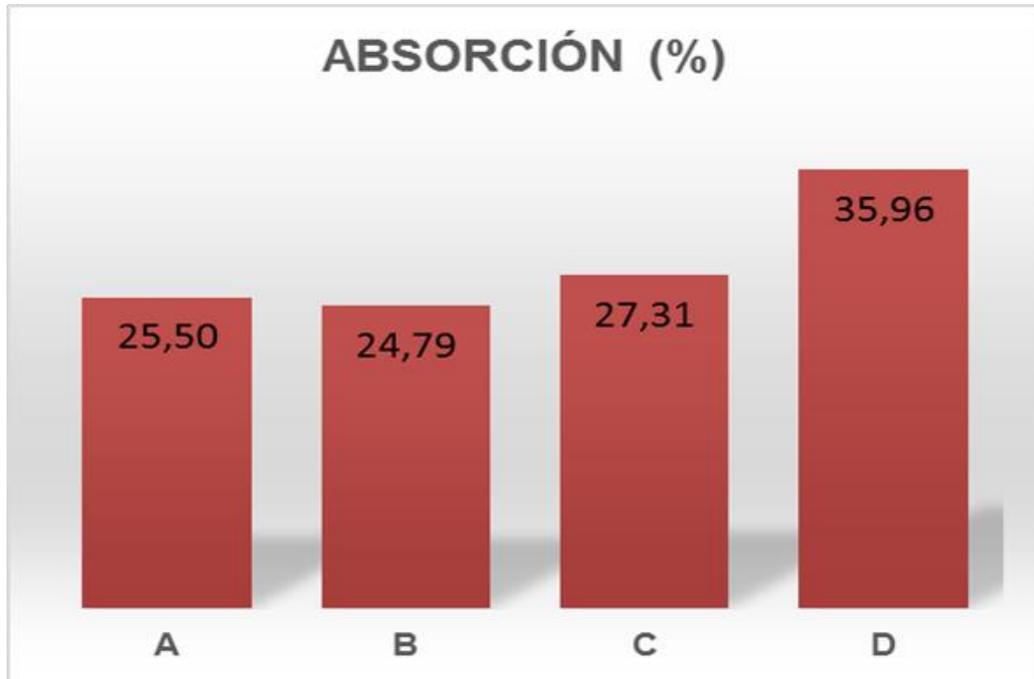


Figura 3.27 Distribución de la densidad promedio, obtenida en las muestras ensayadas.



Capítulo 4

Conclusiones

Se puede concluir que los ladrillos de arcillas residuales de la formación Piñón de la ciudad de Guayaquil con adiciones de hasta un 20% de lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento, no presentan diferencias importantes en su resistencia a la compresión simple con relación a los mismos ladrillos sin adiciones de estos lodos residuales.

Los ladrillos con adiciones del 10% de lodos residuales presentaron mayores resistencias que los ladrillos sin adiciones, presumiblemente por el llenado de espacios vacíos intersticiales en la mezcla total por la parte mineral inorgánica contenida en los lodos residuales.

Se observó dispersión en los resultados de compresión simple en los ladrillos con adiciones de lodos residuales, posiblemente porque el mezclado fue realizado manualmente. Un mezclado mecanizado posiblemente reduzca un poco esta dispersión, que fue más notoria en los ladrillos con 10% de adiciones de lodos residuales.

No se encontró ninguna correlación importante entre los resultados de densidad y absorción.

Durante la fabricación y quema de ladrillos utilizando el 100% de lodos residuales se pudo observar una importante pérdida de humedad durante el proceso de secado. Durante la quema de estos ladrillos se pudo determinar también que fue consumido el 77% en peso de la materia orgánica sólida. Se puede concluir que el remanente encontrado, posterior a la quema de estos ladrillos, es del 23% en peso y que correspondería a material mineral no orgánico.

La fabricación lograda de estos ladrillos con adiciones de lodos residuales de las plantas de tratamiento de la ciudad de Guayaquil, permitiría

abrigar la idea de que se pueda implementar a futuro, una planta automática que logre procesar, conjuntamente con las arcillas residuales y sedimentarias de nuestra ciudad, los lodos residuales y otros productos contaminantes industriales de difícil disposición, así como también los materiales obtenidos en la limpieza de canales de aguas residuales.

De esta manera será posible aprovechar estos subproductos de múltiples maneras en la construcción, tales como ladrillos para paredes de mampostería, ladrillos para relleno de losas aligeradas, paneles para vivienda social, entre otros.

Los resultados que se encuentran en el presente documento corresponden a los primeros que se realizan para ladrillos artesanales fabricados con arcillas de la formación Piñón del noroeste de Guayaquil, con adiciones de lodos residuales. Estos análisis deben continuar realizándose con las mismas muestras, en la segunda etapa, cortadas y ubicadas en paneles, para un posible uso en paneles para vivienda social, por lo que aún no se deberían extrapolar para suelos de otras regiones.

Recomendaciones

El uso de Geotubos para poder reducir los tiempos de deshidratación y manejo de los lodos residuales en las plantas de tratamientos de nuestra ciudad es una alternativa que debe ser considerada.

Con el uso de Geotubos se reducirían los volúmenes de sedimento y los costos de la disposición final de los lodos, además de mitigar los impactos en el medio ambiente. El uso de Geotubos no afecta la operación continua de lagunas y digestores.

Los Geotubos podrían proveer una parte de la materia prima necesaria para la fabricación de los ladrillos con adiciones de lodos residuales. Otra fuente importante de lodos residuales podrían ser los que se obtendrían de los pantanos artificiales secos, actualmente en construcción en el sector El Salitral-Tres Bocas.

Para lograr mayor eficiencia en el secado de los lodos residuales, se puede, implementar galpones traslucidos de secado, con efecto invernadero. Los volúmenes de lodos residuales que se podrían obtener anualmente en la ciudad de Guayaquil, superarían las 100 toneladas, suponiendo que cada habitante aporte con 0,1 gr de lodo estabilizado por litro de agua utilizada por persona al día.

Se considera que el presente trabajo es perfectible, por lo que se sugiere continuar investigando para poder fabricar materiales de construcción de uso masivo, utilizando los lodos residuales obtenidos de cámaras sépticas, lagunas de oxidación y de la limpieza de canales de drenaje de aguas residuales de nuestra ciudad.

Bibliografía

- Acosta González, Y., Gutiérrez, E., & Ramírez, E. (2003). Poder Fertilizante de los Lodos Residuales provenientes del Tratamiento de Aguas Servidas. Universidad del Zulia, Núcleo Punto Fijo. Venezuela.
- Allemen J. E. (1989), "Beneficial use of sludge in building components, 2, Full scale production of sludge amended bricks", *Interbrick*, 5(1), 28-32.
- Andreoli , V. (2005). Utilización de Lodos Aluminosos como Materia Prima en la Industria Cerámica,. Brasil: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.
- Arauzo , I., & Permuy Vila , D. (Julio-Agosto de 2011). La gestión de lodos y el protocolo de Kyoto. El secado térmico y la valorización en cementera. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*(945).
- Araque, M. (2006). *Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El salitre*. Bogotá, , Colombia: Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Colombia.: Mc-Graw Hill.
- Bermeo Barreto, A. M., & Idrovo Heredia, E. P. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca Facultad de Ingeniería.
- Benítez, A., Ortega, E., Vanegas, A., & Vergara, L. (2015). Tratamiento de Aguas Residuales. Manizales.
- Brosnan, D., & Hochleitner, W. (1992). Additions of oxidized sewage sludge in brick manufacture as a means of revenue generation. *Journal of the Canadian Ceramic Society*, 61 (2), p. 128- 134.
- Cabezas, C., Bolaños, G., & Salazar, A. (2001). Recuperado el Julio de 2015, de <http://supercriticos.univalle.edu.co>.

- Castells, X. (2000). *reciclaje de residuos industriales*. (S. Díaz de Santos, Ed.)
- CEDEX. (2013). Catálogo de residuos. Obtenido de <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=68&idmenu=80>
Cedex. (s.f.).
- CEMEX España y Saneamiento de Aguas de Valencia firman un convenio para el secado de lodos de la comunidad valenciana. (2006). REVISTA TÉCNICA CEMENTO-HORMIGÓN. España: CEMEX. Recuperado el 28 de julio de 2015, de <http://www.cemento-hormigon.com/>
- Dondi M., M. M. (1997). *Recycling of industrial and urban wastes in brick production-A review (Part 2)* (Vol. 13). Tile & Brick International.
- Elías, X. (Febrero de 2006). (B. D. CATALUNYA, Ed.) Recuperado el Septiembre de 2006, de http://departamentos.unican.es/quimica/doctorado/Conferencias%20005-2006/Xavier%20EI%C3%ADas_Valorizacion%20integral%20de%20fangos%20EDAR.pdf
- El Telégrafo (3 de agosto, 2014). Planta de tratamiento de aguas residuales de Quitumbe tiene un avance del 15%. Recuperado de <http://www.telegrafo.com.ec/noticias/quito/item/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-quitumbe-tiene-un-avance-del-15.html>
- Escalante-García, J. (21. marzo-abril de 2002). Materiales alternativos al cemento Portland. Avance y Perspectiva, Pp. 79-88.
- García Ubaque, C. A., García Vaca, M. C., & Vaca Bohórquez, M. L. (Octubre-Diciembre de 2013). Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. *Tecnura*, 17(38), 68-81.
- Geertsema , W., Knocke , W., Novak J. T., J., & Dove , D. (1994). Long-term effects of sludge application to land. *Journal of the American Water Works Association*, 64-74.
- Gnecco, M., & Marquina, J. (2000). Ladrillos que ahorran energía: manual para pequeños productores de ladrillos. Lima.

- Guimarães , M., & Morita , D. (2003). Incorporação de Lodo de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. Brasil: Universidade de São Paulo. Iniciação Científica Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.
- Helaine, D. (2000). Les boues de curage des réseaux d'assainissement; caractéristiques et techniques de traitement/valorisation. TMS(4).
- Hernández, A. (1994). Depuración de Aguas Residuales. (pp. 987). Madrid: Cátedra de Ing. Sanitaria y Medio Ambiente. Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Tercera edición.
- Hernández, D. (2006). Aprovechamiento de Lodos Aluminosos (de la Etapa de Sedimentación) de Sistemas de Potabilización como Agregado en la Fabricación de Ladrillos Cerámicos. (U. d. Facultad de Ingeniería, Ed.) Colombia: Tesis Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). Ladrillos cerámicos. Definiciones, clasificación y condiciones generales. Ecuador, Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN 293:78), Catalogo 2012. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Jong-Wook, L. (2004). Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud. Hechos y cifras. Organización Mundial de la Salud.
- Kutassy , L. (1982). *Utilization of special wastes in the brick and tile industry (Hungarian)*„. Epitoanyag.
- Lightweight Aggregates from Sewage Sludge. (2007). Polish Science and Innovations for the Environment. Recuperado el 15 de julio de 2015, de http://spin-project.eu/index.php?node_id=58.95&lang_id=1
- Limón Macías, J. G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?
- Martínez, D. (2003). Análisis comparativo de diseño de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas. México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad profesional Zacatenco.
- Mejía , R., & Delvasto, S. (1998). Aprovechamiento de Lodo Aluminoso Generado en el Proceso de Potabilización del Agua,. Colombia: EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle.

Mesaros , R. (1989). *Use of sludge from the municipal sewage system for brickmaking, new life for obsolescent brickwork*. Ziegelindustries International 5.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Plan Nacional de Calidad de las Aguas (2007-2015).

Ministerio de Medio Ambiente. (2005). Obtenido de <http://www.mma.es>

Montaño, A. M. (2011). Gestión de lodos de depuración en las Comunidades Autónomas de España. Producción, tratamiento y destino. Tecnología del Agua.

Monzó , J., Payá, J., Borrachero , M., & Córcoles, A. (1996). Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(9), 1389-1398.

NOM-004-SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental. Publicada en el Diario Oficial el 15 de agosto de 2003.

Novaes , R., Isaac , R., & Morita , D. (2003). *Incorporação de Lodo de ETA na Indústria Cerâmica*,. São Paulo, Campinas, Brasil: Seminário de Acompanhamento de Pesquisa em Saneamento e Ambiente.

Nuvalori, A. (2002). Inertização de Biossólidos em Tijolos Cerâmicos Maciços: Aspectos Tecnológicos e Ambientais. Brasil: Tesis Doutorado em Engenharia Civil. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. Mexico: Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo.

Research Gate. (s.f.). Obtenido de http://www.researchgate.net/publication/267797155_EVALUACION_MICROBIOLOGICA_DE_UN_LODO_RESIDUAL_DE_MXICO_PERSPECTIVAS_DE_RESO

Salazar, A. (2003). Los Ecomateriales: Una alternativa económica para la construcción. . (U. d. Valle, Ed.) Cali, Colombia: Agencia Universitaria de Periodismo Científico y Cultural.

Slim, J., & Wakefield, R. (1991). *The utilization of sewage sludge in the manufacture of clay bricks* (Vol. 17). Water SA.

- Tay, J. H. (1987). Bricks manufactured from sludge. *Journal of Environmental Engineering*, 113(2), 278-284.
- Tay, L., & Yip, W. (1989). Sludge ash as lightweight concrete material. *Journal of Environmental Engineering*, 115(1), 56-64.
- Taylor, J. (1989). Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. Acidic Precipitation: Biological and Ecological Effects. (Adriano, Ed.) In *Advances in Environmental Science*.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. Metcalf and Eddy. McGraw-Hill Professional, 1848.
- Torres Lozada, P., Madera Parra, C.A y Martínez Puentes, G. (2008). Estabilización Alcalina de Biosólidos Compostados de Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para Aprovechamiento Agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol.61(no.1).
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos.
- Trejos Vélez, M., & Agudelo Cardona, N. (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa "Comestibles La Rosa" como alternativa para la generación de biosólidos. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Valderrama, M. (2013). Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá) (Tesis de Maestría). Recuperado de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/Probarros/file/231.pdf>
- Vázquez, C., Vázquez, A., Fortis, M., & Salazar, E. (2003). *Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo*. Recuperado el 25 de julio de 2015, de Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo : <http://www.smcs.org.mx/pdf/libros/abonos>
- Villarreal, J. (2000). Cucunubá: modelo para un desarrollo sostenible.
- Wang K., Chiang K., Perng J., Sun C. (1998), The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes, *Journal of Hazardous Materials*, 59 (2-3), 201 - 210.

Zani A., Tenaglia A. & Panigada A. (1990), "Reuse of paper making sludge in brick production", *Ziegelindustries International*, (12), p. 682-690.