

**ALTERNATIVA CONCEPTUAL PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS
GENERADOS EN LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL AMB**

DARWIN VACCA DURAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ALTERNATIVA CONCEPTUAL PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS
GENERADOS EN LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL AMB**

DARWIN VACCA DURAN

Trabajo de grado para optar el título de

INGENIERO QUÍMICO

Director

FREDY AVELLANEDA VARGAS Ph.D. Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

A mi madre por su amor infinito, todos sus sacrificios y por inculcar en mi un sueño que no alcanzo a ver cumplir pero que siempre llevo presente en mis pensamientos.

A mi padre por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por su motivación y sus sabios consejos que me han impulsado a ser mejor cada día.

A mis hermanos por su compañía, por siempre creer en mí y apoyarme en todos los momentos difíciles.

A mi esposa Claudia por sus grandes consejos, toda su paciencia y sobre todo por su amor incondicional que ha convertido cada día a su lado en una gran aventura llena de momentos inolvidables.

A mi hija Sofía por iluminar mi vida con su sonrisa, porque cuando te abrazo siento que tengo el mundo entre mis brazos y puedo culminar la más grande de las proezas.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Freddy Avellaneda director de este proyecto por todo el apoyo y comprensión, por su dedicación y todos los conocimientos brindados durante el transcurso de mi formación profesional.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en especial a la ingeniera Yolanda Otero por su enorme colaboración, así como por todos los consejos impartidos.

A la ladrillera San Francisco por abrirnos sus puertas y prestarnos toda la ayuda requerida, en especial al señor Olinto.

Al laboratorio de beneficio de minerales de la escuela de ingeniería metalúrgica por la ayuda brindada.

Al laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la escuela de ingeniería civil por la ayuda brindada.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme aprender grandes cosas y por todas las experiencias vividas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1 MARCO TEÓRICO.....	16
2 METODOLOGÍA.....	21
2.1 CUANTIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE LODOS.....	21
2.1.1 Cuantificación de lodos.....	21
2.1.2 Recolección de lodos.....	22
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.....	23
2.3 ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DESHIDRATACIÓN.....	23
2.4 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.....	24
2.4.1 Espesado.....	24
2.4.2 Deshidratación.....	24
2.5 APLICACIÓN DEL LODO SECO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS.....	25
2.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS.....	25
2.6.1 Resistencia mecánica a la compresión.....	26
2.6.2 Absorción de humedad.....	26
2.6.3 Pérdida de peso durante la cocción.....	26
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	27
3.1 CUANTIFICACIÓN DE LODOS.....	27
3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LODOS.....	28
3.3 ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DESHIDRATACIÓN.....	29
3.4 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.....	30
3.4.1 Espesado.....	30

3.4.2	Deshidratación.....	31
3.5	APLICACIÓN DEL LODO SECO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS.	32
3.6	CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS.....	33
3.6.1	Resistencia mecánica a la compresión.	33
3.6.2	Absorción de agua.	34
3.6.3	Pérdida de peso durante la cocción.	35
3.7	Capacidad de la ladrillera	36
4	CONCLUSIONES	38
5	RECOMENDACIONES.....	39
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	BIBLIOGRAFÍA.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de potabilización	16
Figura 2. Metodología utilizada.	21
Figura 3. Esquema general de la planta	22
Figura 4. Lodo después de 3,5 y 8 días de secado.....	32
Figura 5. A) Ladrillos después de moldeados B) Ladrillos después de cocidos...	33
Figura 6. Resistencia a la compresión (kg/cm²) vs lodo adicionado (% peso).	34
Figura 7. Disminución en la resistencia (%) vs lodo adicionado (%peso).....	34
Figura 8. Absorción de agua (%peso) vs lodo adicionado (% peso)	35
Figura 9. Pérdida de peso (%) vs lodo adicionado (%peso).	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Calificación por factor	23
Tabla 2. Volumen de lodos generados por cada equipo.....	27
Tabla 3. Volumen máximo de lodo generado por la planta en un mes.....	28
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodo.....	28
Tabla 5. Matriz de decisión para seleccionar la tecnología de deshidratación.....	29
Tabla 6. Humedad (%) y cantidad de lodo espesado.....	30
Tabla 7. Contenido de sólidos en el canal de conexión.....	31
Tabla 8. Propiedades medidas para cada porcentaje de lodo adicionado.....	36

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Ventajas y desventajas de las alternativas de deshidratación.....	46
ANEXO B. Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015	47
ANEXO C. Esquema general de la planta.....	48
ANEXO D. Método SM-2540 B Solidos totales secados a 103-105°C.....	49

RESUMEN

TITULO: ALTERNATIVA PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL AMB. S.A.*

AUTOR: DARWIN VACCA DURAN**

PALABRAS CLAVE: DEHYDRATION, SLUDGE, REUSE, ACUEDUCT, DRINKING WATER, CERAMIC BRICKS.

Los lodos producidos durante el proceso de potabilización del agua son vertidos en los cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado sin ningún tratamiento, lo que ocasiona graves problemas ambientales. Es por esto que se han estudiado nuevas formas de reutilizarlos donde sus propiedades puedan ser aprovechadas, entre las que se destaca la elaboración de ladrillos cerámicos, porque además de traer beneficios ambientales podría impulsar la industria ladrillera de la región. En el presente estudio el lodo proveniente de la planta de tratamiento de agua potable Floridablanca del AMB.S.A. fue recolectado, caracterizado, espesado y deshidratado mediante lecho de secado y filtro prensa, este lodo se utilizó como reemplazo de la mezcla control (65% arena-35%arcilla) en porcentajes entre el 0 y 100% peso en pasos de 10%, con la cual se moldearon ladrillos macizos de 25 x 12 x 5,5 cm que fueron cocidos por 24 horas en un horno artesanal. A los ladrillos obtenidos se les realizaron pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua y pérdida de masa, principales propiedades para establecer la calidad de los mismos, encontrándose que adicionar hasta un 20% de lodos permite obtener ladrillos con una resistencia a la compresión superior a los 100 kg/cm² por lo cual son aptos para uso no estructural y con un porcentaje de absorción de agua menor al 14% lo que permite que sean utilizados tanto en interiores como en exteriores según la NTC 4205.

* Trabajo dirigido de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. UIS
Director: Ph. D. Fredy Avellaneda Vargas.

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVE FOR THE DISPOSITION OF SLUDGES GENERATED IN THE FLORIDABLANCA PLANT OF AMB S.A.*

AUTHOR: DARWIN VACCA DURAN**

KEYWORDS: SLUGD, DEHYDRATED, PTAP, CERAMIC BRICKS,

The sludge produced during the treatment of potable water are discharged in the water bodies or sewage systems without any treatment, causing serious environment problems. That is why new forms of reuse there have been investigated taking advantage of their properties, among in which is highlight the elaboration of ceramic bricks, because in addition to bring environmental benefits, it could impulse the brick industry of the region. In the present study, sludge from the Floridablanca drinking water treatment plant was collected, characterized, thickened and dehydrated in drying beds and filter press, this sludge was used as replace of the base mix (65% sand- 35% clay) in percentages between 0 to 100% weight in steps of 10%, With which solid bricks of 25 x 12 x 5.5 cm were molded and cooked for 24 hours in a traditional oven. The obtained bricks were tested for compressive strength, water absorption and mass loss, main properties to establish the quality of the same, finding that adding up to 20% of sludge allows to obtain bricks with a resistance to compression Higher than 100 kg/cm² and therefore suitable for non-structural use and with a water absorption rate of less than 14%, which allows them to be used both indoors and outdoors according to NTC 4205.

* Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. UIS

Advisor: Ph.D. Fredy Avellaneda Vargas

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es un derecho fundamental de todos los seres humanos, pero durante su proceso de potabilización las plantas de tratamiento generan una gran cantidad de efluentes denominados lodos, que son una mezcla de agua, arena, sedimentos y coagulante (Al_2SO_4) el cual es agregado durante el proceso, estos lodos son vertidos en los cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo lo cual puede ocasionar graves problemas para el medio ambiente y la salud humana; Problemas que no se tuvieron en cuenta durante la construcción de dichas plantas debido a la falta de políticas claras, pero la legislación colombiana ha ido cambiando a través de los años hasta al punto de fijar plazos para implementar un proceso de tratamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

En algunos casos los lodos son vertidos en los sistemas de alcantarillado, pero esto no representa una solución ya que generan una carga adicional en las plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales emplean un proceso más complejo que el necesario para tratar los lodos mencionados, pues manejan un mayor contenido de materia orgánica y patógenos. Entre los principales tratamientos empleados para los lodos provenientes de las PTAP está la deshidratación y posterior disposición en rellenos sanitarios, pero debido a la actual situación del relleno el Carrasco, el cual según la CDMB terminó su vida útil y dos fallos judiciales ordenaron su cierre definitivo en septiembre del año 2011, fallos que no se acataron por la declaración de cuatro estados de emergencia ambiental que lo mantienen en funcionamiento pero no solucionan la problemática, se hace necesario un proceso de tratamiento para estos lodos donde además de ser deshidratados puedan ser reutilizados teniendo en cuentas sus propiedades y ser aprovechados en alguna industria de región.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es estudiar una alternativa de reutilización para los lodos provenientes de la planta Floridablanca del AMB. S.A. que pueda ser implementada en las demás PTAP, para ello inicialmente se realizó un estado del arte sobre sus posibles usos junto con una caracterización fisicoquímica,

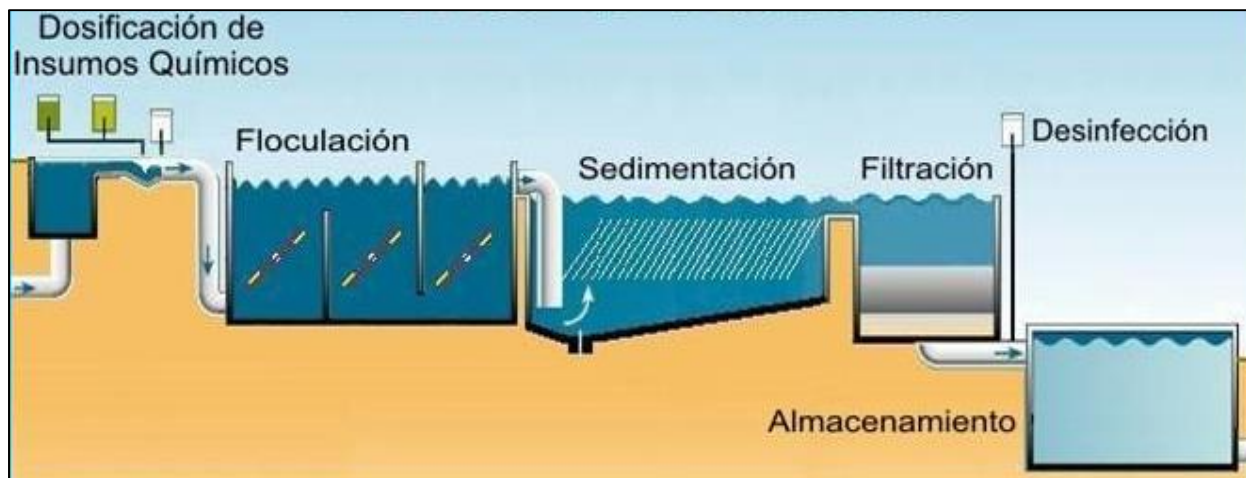
encontrándose una posible alternativa de reutilización en la fabricación de ladrillos cerámicos, alternativa que podría beneficiar la industria del departamento pues Santander es el mayor productor de ladrillos cerámicos del país.

La metodología utilizada comienza con la recolección de muestras y la cuantificación de las descargas de los lodos de la planta, a los cuales se les realizó un proceso de desaguado ya que su contenido de sólidos era muy bajo, obteniéndose un lodo sólido que se utilizó en diferentes proporciones como sustituto parcial de las materias primas usadas en la fabricación de ladrillos macizos a los que se les realizaron pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua y pérdida de peso, principales propiedades para determinar la calidad de los ladrillos.

1 MARCO TEÓRICO

La planta Floridablanca del AMB.S.A. está ubicada en la zona sur-oriental del área metropolitana de Bucaramanga, y capta el agua del río Frio para abastecer la zona sur de Floridablanca y parte de Girón a razón de 520 L/s, aunque cuenta con una capacidad máxima de 620 L/s entre sus dos secciones, la planta antigua (P.A.) y la planta nueva (P.N.). El proceso empleado para potabilizar el agua tiene como primer paso la aireación, donde se genera turbulencia en el agua para eliminar olores y sabores producidos por los gases disueltos; Continuo a esto se mide el caudal en una canaleta Parshall y se adiciona sulfato de aluminio tipo b que junto con una mezcla rápida da inicio a la coagulación, allí se desestabilizan las partículas que producen la turbiedad y color del agua. Después de esto, el agua pasa al floculador donde los pequeños coágulos establecen puentes entre si formando flocs de mayor tamaño, y una vez el agua entra al sedimentador los flocs precipitan por acción de la gravedad, generando un lodo en el fondo y un líquido claro en el tope, este último pasa a una batería de filtros donde se retienen las partículas más finas en un medio poroso compuesto por arena y antracita. Terminado este proceso el agua pasa a la zona de desinfección donde se adiciona cloro gaseoso para eliminar los patógenos presentes y finalmente ser almacenada para su distribución.

Figura 1. Proceso de potabilización



Cuando se lavan las unidades de floculación, sedimentación y filtración, el lodo depositado durante la potabilización es removido y los efluentes producidos son vertidos en el río sin ningún tratamiento previo, lo cual ocasiona problemas ambientales importantes, ya que estos vertimientos pueden formar bancos de lodos en los tramos lentos de los ríos, y aumentar la turbiedad del agua, problemática que se agrava si hay presencia de contaminantes como metales pesados, o restos de carbón activado que puede disminuir la actividad fotosintética[1]. Es por esto que la legislación colombiana se ha hecho más estricta en este tema como lo demuestran los decretos 3930 y 4728 de 2010 y el decreto 2667 de 2012 que establece el pago de tasas retributivas para quien utilice las fuentes de agua como receptores de vertimientos puntuales y además fija plazos para disminuir la carga de contaminantes o implementar un plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos.

En algunos casos los lodos son vertidos en los sistemas de alcantarillado, pero esto no representa una solución, ya que genera una carga adicional en las plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales emplean un proceso más complejo que el necesario para los lodos mencionados. El tratamiento convencional para los lodos producidos en plantas potabilizadoras consiste principalmente en eliminar el agua contenida mediante espesamiento y posterior deshidratación[2]. Las dos etapas difieren principalmente en la concentración y fase del lodo obtenido.

El espesamiento por gravedad permite eliminar el exceso de agua libre mediante sedimentación en un tanque circular en cuya parte superior se encuentra ubicado un canal periférico que separa el líquido claro por rebose y por la abertura central del fondo cónico se descarga el lodo espeso, adicionalmente unos brazos radiales (rastras) giran a baja velocidad y arrastran los sólidos hacia el fondo favoreciendo la compactación de las partículas, lo que produce una descarga con mayor concentración de sólidos que la que se alcanza por simple sedimentación en un menor tiempo de operación .

El propósito de la deshidratación es aumentar la concentración en los lodos ya espesados hasta obtener una fase sólida, esto se logra eliminando el agua ligada que se encuentra en los intersticios de los flóculos, ya sea de forma natural, como en los lechos de secado

o de forma mecánica aplicando una fuerza adicional que depende de la tecnología empleada, entre las alternativas mecánicas más utilizadas se encuentran la centrifugación y la filtración. A continuación, se detallan las principales características de las alternativas de deshidratación:[3]

Lechos de secado: La remoción de agua ocurre en dos pasos, el primero es un drenado a través de una cama de arena y grava debajo de la cual se instala una tubería de recolección, el segundo es la evaporación ya que, al estar expuesto al sol, el lodo puede alcanzar humedades relativamente bajas. En algunas ocasiones se hace un drenado adicional por decantación si se forma sobrenadante o se aplica vacío para acelerar el drenado; También se pueden emplear cubiertas para proteger los lechos de la lluvia [4][5].

Centrifugación: Utiliza la fuerza centrífuga sobre una corriente de lodo, para acelerar la separación entre la fracción líquida y sólida. El proceso separa el lodo en forma de torta del líquido clarificado mediante la diferencia de densidad entre los sólidos y el líquido circundante de manera similar a la clarificación por gravedad, con la diferencia que utiliza fuerzas hasta 3.000 veces mayores.[3]

Filtro prensa: Consta de una serie de placas verticales con canales en las caras que ayudan a retirar el agua filtrada, entre las cuales se intercalan telas filtrantes. El lodo se introduce en las cámaras que forman dos placas contiguas y es sometido a una elevada presión por medio de un dispositivo hidráulico. El funcionamiento es discontinuo y muy laborioso ya que se tiene que retirar la torta y lavar la tela filtrante periódicamente para disminuir la pérdida de carga, pero se obtiene una torta con alto contenido de sólidos[6].

Filtro de bandas: Consisten en una banda continua de tela filtrante en la cual se vierte el lodo, que al pasar a través de una serie de rodillos giratorios es comprimido, además una placa rascadora va separando el lodo deshidratado de la banda para continuar el ciclo. En estos filtros se consiguen bajas concentraciones de sólidos por lo que el lodo se debe acondicionar con un polielectrólito para aumentar la eficiencia de separación [5].

Filtro al vacío: Son cilindros que rotan en posición horizontal y requieren un diferencial de presión a través del medio filtrante que rodea el cilindro para lograr extraer el agua y

que los sólidos retenidos formen una torta en su superficie. El tambor está sumergido parcialmente en el depósito de lodo que puede tener una agitación lenta para mantener los sólidos en suspensión, el vacío aplicado en el interior del tambor succiona el filtrado a través del medio hasta una tubería de recolección [5].

Después de la deshidratación, el lodo seco suele ser depositado en un relleno sanitario, pero teniendo en cuenta la actual situación del vertedero municipal, el Carrasco, el cual según la CDMB terminó su vida útil y dos fallos judiciales ordenaron su cierre definitivo el 30 de septiembre de 2011, fallos que no se acataron por la declaratoria de cuatro estados de emergencia ambiental que lo han mantenido en funcionamiento pero que no han solucionado la problemática, se hace inviable esta alternativa de disposición y se requiere una etapa adicional en el proceso de tratamiento donde los lodos producidos además de ser deshidratados puedan ser reutilizados en alguna industria de la región aprovechando sus propiedades.

Entre los posibles usos, los lodos procedentes de las PTAP se consideran inadecuados como sustitutos de fertilizantes por su bajo nivel de nutrientes y la baja retención de agua [7][8]. Diversos estudios plantean que la recuperación del coagulante residual no es una alternativa económicamente viable por el empleo de grandes cantidades de ácido que elevan los costos del proceso[9][2], aunque el lodo puede ser utilizado directamente en el tratamiento de aguas residuales para absorber el fósforo disuelto con la desventaja que aumenta ligeramente los niveles de nitrógeno [10].

Una alternativa que ha tomado fuerza en los últimos años es la utilización del lodo como aditivo para producir materiales cerámicos. La utilización de estos lodos en la industria de los cerámicos es prometedora y los productos obtenidos no presentan contaminantes peligrosos, lo que puede traer beneficios como la disposición adecuada de residuos, reducción de la contaminación hídrica y menor utilización de recursos naturales[11].

La literatura reporta que lodo secado por atomización fue utilizado como reemplazo de la arcilla en la fabricación de Clinker el cual es el principal componente del cemento Portland, donde el análisis microestructural no mostró variaciones significativas en el

tamaño de los cristales de silicato o diferencias en la composición con respecto a la muestra control. Sin embargo, la energía adicional requerida hace que el proceso sea escasamente viable.[12]

También se ha reportado el uso de lodo deshidratado como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de mortero, obteniendo resistencias a la compresión por debajo de las del mortero estándar, adicionalmente el mortero presentó valores altos de contracción por secado debido al alto porcentaje de humedad del lodo[13]. Al igual, se reporta su uso en la elaboración de agregados ligeros utilizados para la fabricación de hormigón, cuya resistencia a la compresión cumplió con la norma ASTM C330[14].

Los resultados de algunas investigaciones afirman que se pueden producir ladrillos cerámicos utilizando lodos como reemplazo parcial de la arcilla en una cantidad que depende de la temperatura de cocción, la humedad del lodo y las características de las materias primas. En general, a medida que aumenta la humedad del lodo disminuye el porcentaje de este que puede ser adicionado sin que las propiedades del ladrillo se vean afectadas significativamente.[15][16].

Teniendo en cuenta que en Colombia existen 1.343 ladrilleras en 14 departamentos de las cuales el 77% operan de forma artesanal y que es Santander el departamento con mayor producción, ya que abarca el 26% de las 835.280 toneladas de material cerámico que se fabrican al mes[17], se considera la utilización de los lodos en la fabricación de ladrillos una alternativa que podría beneficiar el medio ambiente y también impulsar la industria de la región.

2 METODOLOGÍA

La Figura 2 resume la metodología utilizada en el presente estudio.

Figura 2. Metodología utilizada.



2.1 CUANTIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE LODOS

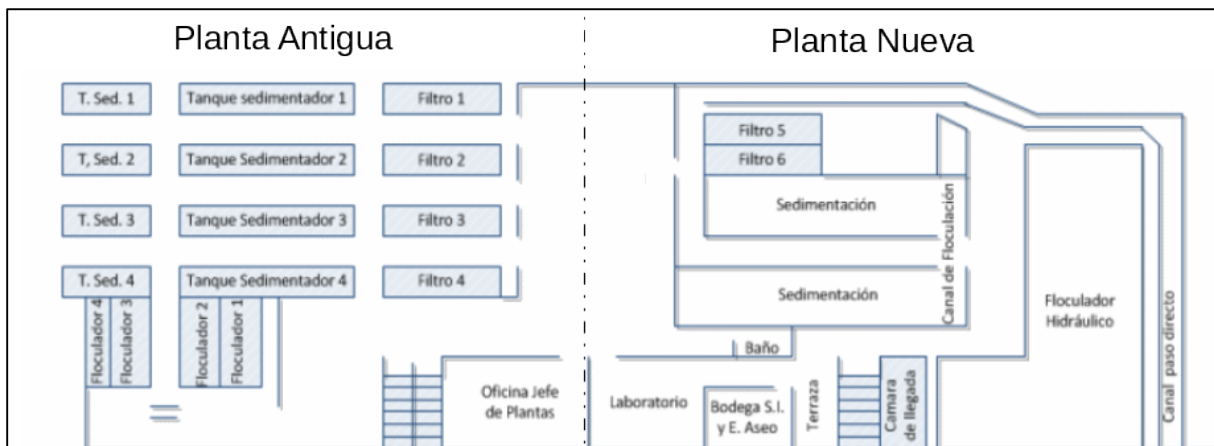
2.1.1 Cuantificación de lodos: Durante el lavado de los floculadores y sedimentadores, las unidades son vaciadas y se utilizan mangueras con agua a presión para remover el lodo adherido a las paredes y el fondo, es por esto que la cantidad de lodos generados se calculó como la suma del volumen de cada unidad y el agua utilizada para su lavado. El valor del volumen de cada unidad y el caudal de las mangueras de lavado fue proporcionado por el AMB.S.A.

Para el caso de las unidades de filtración, el agua vaciada tiene un contenido de sólidos muy bajo, por lo cual puede ser recirculada para iniciar nuevamente el proceso de potabilización, por lo anterior, la cantidad de lodos generados en los filtros solo está conformada por el agua del retro lavado. Esta operación esta automatizada y el caudal fue proporcionado por el AMB.S. A

2.1.2 Recolección de lodos: Se recolectaron muestras de lodos en las descargas de los equipos durante el lavado para realizar las pruebas de deshidratación. Teniendo que el floculador y el sedimentador de la planta nueva se lavan en conjunto por lo cual producen una sola descarga, en adelante se tomaran como una sola unidad llamada planta nueva.

Se recolectaron 15 muestras de 2 litros durante el lavado de los floculadores, sedimentadores y la planta nueva, esta recolección se realizó del fondo del pozo número 4 para obtener una composición más homogénea. Para el caso de los filtros 5 muestras de 2 litros se tomaron directamente de la superficie de los mismo ya que el retro lavado produce un flujo ascendente de composición homogénea.

Figura 3. Esquema general de la planta



Adicionalmente, se recolectaron 150 litros de lodo procedente del canal de conexión entre el floculador y el sedimentador de la P.A, ya que al tener una concentración mayor de sólidos se reduce el volumen necesario para obtener la cantidad de lodo requerido en las pruebas.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.

La caracterización fisicoquímica fue realizada por el centro de estudios e investigaciones ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y los datos fueron proporcionados por el AMB quien encargo el estudio antes del inicio del presente estudio. Se analizaron las concentraciones de algunos metales como el aluminio, el zinc y el plomo, y propiedades microbiológicas como la DQO, DBO y el contenido de Coliformes.

2.3 ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DESHIDRATACIÓN.

La selección de la alternativa de deshidratación idónea se realizó empleando una matriz de decisión, para ello a cada variable se le asignó un porcentaje de acuerdo a su relevancia, siendo la humedad de la torta la de mayor valor dado que es el objetivo de la deshidratación, dicha variable fue calificada con un valor del 1 al 5 de acuerdo a las características de cada alternativa como se muestra a continuación.

Tabla 1. Calificación por factor

Variable de decisión	%
Humedad de la torta	20
Calidad del filtrado	15
Costos de inversión	15
Espacio requerido	15
Consumo de energía	10
Mantenimiento	10
Mano de obra	10
Consumo de aditivos	5
Total	100

2.4 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

Para eliminar el agua contenida en las muestras de lodo recolectadas se siguieron los dos pasos empleados en los tratamientos convencionales: espesado y deshidratación, esta última se realizó mediante la alternativa seleccionada en la sección 2.3.

2.4.1 Espesado: El lodo recolectado, cuyo proceso fue explicado en la sección 2.1.2, se homogenizó antes de dejarlo sedimentar durante 6 horas, después de esto se retiró el agua sobrenadante y el lodo espesado pasó a la etapa de deshidratación.

2.4.2 Deshidratación: Únicamente se deshidrató el lodo espesado procedente del canal de conexión, se emplearon las tecnologías seleccionadas con el propósito de comparar los valores de humedad obtenidas para cada torta según la norma SM 2540B y así brindar información más detallada sobre cada una de ellas.

2.4.3 Filtro prensa: Se realizó una prueba con 5 litros de lodo espesado en el filtro prensa del laboratorio de beneficio de minerales adscrito a la escuela de Ingeniería Metalurgia de la Universidad Industrial de Santander, el cual tiene una cámara fija de 20 L. Se empleó aire comprimido para obtener un diferencial de presión de 13 psi y papel kraft como medio filtrante.

2.4.4 Lecho de secado: El lodo espesado se depositó en canastas plásticas de 55 cm de largo, 35 cm de ancho y 30 cm de alto, con el fin de obtener una altura aproximada del lecho de 20 cm como lo recomienda la literatura, se usó papel kraft para retener los sólidos junto con una tela de poliéster para darle mayor resistencia y evitar que el papel se rompiera una vez húmedo.

2.5 APLICACIÓN DEL LODO SECO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS.

Basándose en la revisión bibliográfica y los resultados de la caracterización fisicoquímica se decidió evaluar la posibilidad de utilizar el lodo como agregado en la elaboración de ladrillos macizos de referencia T1 y dimensiones 25 x 12 x 5,5 cm, los cuales fueron elaborados en las instalaciones de la ladrillera San Francisco, ubicada en la vereda San Francisco del municipio de Piedecuesta.

La mezcla base utilizada por los fabricantes contiene 65% peso de arena extraída de un terreno propiedad de la empresa y 35% peso de arcilla proporcionada por diferentes proveedores, a la cual se le adicionó agua en una relación másica de 5:1 y se dejó en remojo por 24 horas. Posteriormente, esta mezcla se pasó por un molino horizontal para eliminar los aglomerados y ser homogenizada.

Al lodo deshidratado se le aplicó el mismo procedimiento de remojo y molido anteriormente descrito y fue adicionado como reemplazo de la mezcla base en porcentajes de entre 0 a 100% en pasos de 10%. La mezcla resultante pasó a la etapa de moldeo donde se les dio su forma característica, adicionalmente, la superficie fue cubierta con aserrín para evitar que se adhieran al suelo. Una vez terminados, los ladrillos se secaron bajo techo durante 4 días y posteriormente fueron apilados bajo el sol donde permanecieron 8 días más, para finalmente ser cocidos en un horno artesanal durante 24 horas.

2.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS.

La norma técnica colombiana NTC 4205 establece que la resistencia a la compresión y la absorción de agua son las principales propiedades físicas de las unidades de mampostería usadas para determinar si son aptas para su comercialización, es por esto que se midieron dichas propiedades.

2.6.1 Resistencia mecánica a la compresión: La resistencia mecánica a la compresión se midió siguiendo la norma técnica colombiana NTC-4017, se empleó la prensa hidráulica del laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón, adscrito a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

El método de ensayo consiste en aplicar una carga a las muestras en la dirección en que van a estar puestos en servicio hasta que se presente una falla. El valor de la resistencia se calcula dividiendo la carga máxima de prueba entre el área de la sección transversal, el cual se midió para cada porcentaje de lodo adicionado.

2.6.2 Absorción de humedad: El porcentaje de absorción de agua se midió siguiendo la norma NTC-4017, para ello los ladrillos se sumergieron en agua fría durante 24 horas, tiempo después del cual se les retiró el exceso de agua con un paño húmedo y se pesaron inmediatamente.

2.6.3 Pérdida de peso durante la cocción: Se calculó la pérdida de peso durante la cocción, aunque no es una propiedad contemplada en la norma NTC 4205, se consideró importante puesto que da una medida del contenido de materia orgánica. Para ello se pesaron los ladrillos antes de ingresar al horno, y después de ser cocidos, los resultados se reportan en porcentaje de peso perdido basándose en la norma AASHTO T-267.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CUANTIFICACIÓN DE LODOS

La mayor cantidad de lodos se producen durante el lavado del floculador, este resultado es razonable teniendo en cuenta que es el equipo con mayor volumen debido a que posee cuatro cámaras. Cabe resaltar que se requiere mayor cantidad de agua para lavar la planta nueva debido a la forma en zig-zag de su floculador hidráulico, la cual genera una mayor área superficial donde se adhiere el lodo.

Tabla 2. Volumen de lodos generados por cada equipo.

Equipo	Flujo [l/s]	Tiempo [min]	Agua de lavado [m ³]	Agua vaciada [m ³]	Volumen descargado [m ³]
Floculador	14	143	120	1200	1320
Sedimentador	14	71	60	600	660
Filtros	300	5	90	-	90
Planta nueva	21	190	240	800	1040

Los filtros se lavan cada 24 horas, por lo cual se realizan 30 lavados al mes, el sedimentador y el floculador se lavan cada dos meses, pero se consideró que se lavarían todos el mismo mes para calcular la descarga máxima, la planta nueva se lava una vez al mes. Teniendo en cuenta la frecuencia de lavado y la cantidad de equipos, se obtuvo el volumen máximo de lodos producidos al mes por la planta como se muestra en la Tabla 3. Todas las frecuencias de lavado pueden variar dependiendo del criterio del jefe de la planta y factores como la temporada o la suciedad de las unidades. Los filtros generan el mayor volumen al mes, con 16.200 m³ que corresponden al 76,4% del total de lodo producido, esto se debe a que son los equipos que están en mayor número y además presenta la mayor cantidad de lavados por mes.

Tabla 3. Volumen máximo de lodo generado por la planta en un mes.

Equipo	Cantidad de equipos	Lavados/mes	Volumen de descarga [m ³]	Volumen total [m ³]
Floculador	1	1	1.320	1.320
Sedimentador	2	1	660	2.640
Planta nueva	1	1	1.040	1.040
Filtro	6	30	90	16.200
			Total	21.200

3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LODOS.

Lo norma que rige los vertimientos en los cuerpos de agua superficiales es la resolución 0631 del 17 de marzo del 2015 del ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodo

Parámetro	Método (SM)	Unidad	Norma	PLANTA ANTIGUA			PLANTA NUEVA
				Floculador	Sedimentador	Filtro	
Aluminio	3500 B	mg Al /L	A/R	6,04	22,86	5,6	44,3
Cadmio	3500 B	mg Cd/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cobre	3500 B	mg Cu /L	1,00	<0,038	<0,038	<0,038	<0,038
Cromo	3500 B	mg Cr /L	0,10	<0,076	<0,076	<0,076	0,38
Magnesio	3500 B	mg Mg /L	A/R	0,74	0,41	0,85	1,69
Zinc	3500 B	mg Zn /L	3,00	0,19	5,98	0,07	0,68
Plomo	3500 B	mg Pb /L	0,10	<0,26	<0,26	<0,26	<0,26
Turbiedad	2130 B	NTU	-	46.875	23.000	945	6.625
DBO₅	5210 B	mg/L O ₂	50	<2	22,98	14	5,57
DQO	5220 D	mg/LO ₂	150	3.060	9.426	71,04	85,14
E-coli	9221 B	NMP/100ml	-	0	500	6.600	<180
Coliformes totales	9221 B	NMP/100ml	-	33.800	9.700	21.600	2.300

La DBO en el sedimentador y floculador no cumple con la norma, aunque presentan una similitud con los encontrados por el AMB en la planta La Flora y los reportados por otros autores [21][2]. Los valores de E. Coli y coliformes totales también presentaron fluctuaciones entre las unidades, similares a la de los demás parámetros biológicos, pero fueron mayores en comparación a los reportados en la planta La Flora. El contenido de cadmio, cromo y plomo presento el mismo valor en todas las unidades estudiadas, aunque el plomo no cumple con la norma, en general la concentración de metales es similar a la reportada por la literatura [18][19][20]

3.3 ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DESHIDRATACIÓN.

Se asignaron las calificaciones de la matriz de decisión teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada tecnología que se resumen en el Anexo A. Se escogió la humedad final del lodo como la variable con mayor porcentaje de relevancia, dado que el objetivo principal del proceso es retirar la mayor cantidad de agua posible.

Tabla 5. Matriz de decisión para seleccionar la tecnología de deshidratación.

Variable de decisión	%	Lecho secado	Centrifuga	Filtro prensa	Filtro de bandas	Filtro al vacío
Humedad de la torta	20	5	3	4	3	3
Calidad del filtrado	15	4	2	5	3	3
Costos de inversión	15	4	3	2	3	3
Espacio requerido	15	1	4	4	3	3
Consumo de energía	10	4	2	3	3	3
Mantenimiento	10	4	3	3	2	3
Mano de obra	10	2	4	3	3	3
Consumo de aditivos	5	4	2	2	2	2
Total	100	3,6	3,0	3,5	2,9	3,0

Como se muestra en la Tabla 5, las alternativas con mayor puntuación final fueron el lecho de secado y el filtro prensa, resultados acorde a los encontrados en la literatura [22][23][24][25], estos dos alternativas presentaron los valores más altos en cuanto a la humedad de la torta y la calidad del filtrado. Dado que las dos alternativas tuvieron puntuaciones similares se decidió realizar la deshidratación mediante los dos métodos y poner establecer así una comparación cuantitativa entre los mismos.

3.4 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

3.4.1 Espesado: Después de dejar sedimentar el lodo recolectado (R) por 6 horas, se separó el líquido clarificado (C) del lodo espesado (E) y se midió la concentración de sólidos según la norma SM-2540 que se resume en el Anexo C, esta se expresó como porcentaje de humedad. El lodo espesado con mayor humedad fue el proveniente de los filtros, este se debe posiblemente a que el lodo recolectado tenía también la mayor humedad. La planta nueva, el floculador y sedimentador presentaron contenidos de sólidos muy similares.

Tabla 6. Humedad (%) y cantidad de lodo espesado.

	Planta Antigua									Planta Nueva		
	Filtros			Floculador			Sedimentador			R	E	C
Unidad	R	E	C	R	E	C	R	E	C			
% Humedad	99,89	90,92	99,97	98,29	82,1	99,97	98,17	81,5	99,97	98,23	81,8	99,97
Volumen prueba[L]	10	0,074	9,926	30	2,45	27,55	30	2,54	27,46	30	2,48	27,52
Volumen máximo[m3]	16.200	93	16.107	1.320	108	1.212	2.640	224	2.416	1.040	86,08	953,92

La cantidad de lodo espesado obtenido a partir del volumen de prueba en cada unidad fue extrapolada para calcular el volumen máximo mensual de lodo espesado producido mensualmente.

$$\left(\frac{0,074}{10}\right) * 16.200 + \left(\frac{2,45}{30}\right) * 1.320 + \left(\frac{2,54}{30}\right) * 2.640 + \left(\frac{2,48}{30}\right) * 1.040 = 537 \text{ m}^3$$

De los 150 litros de lodo procedentes del canal de conexión se obtuvieron 114,5 litros de lodo espesado con una humedad del 81,16% como se puede ver en la Tabla 7, un volumen considerablemente mayor a los 7,54 litros obtenidos en conjunto por todas las unidades. La humedad de este lodo fue muy similar a la obtenida en las demás unidades, solo variando en un 9,76% con respecto a los filtros, es por esto que se decidió utilizar el lodo espesado proveniente del canal de conexión para realizar las pruebas de deshidratación, pues de no ser así se tendrían que recolectar cerca de 1.500 litros de las otras unidades para lograr el mismo volumen de lodo espesado.

Tabla 7. Contenido de sólidos en el canal de conexión.

Unidades	Recolectado	Espesado	Clarificado
% Humedad	84,95	81,16	99,97
Volumen [L]	150	114,50	35,50

3.4.2 Deshidratación: Se utilizaron los 114,5 litros de lodo espesado proveniente del canal de conexión para realizar las pruebas de deshidratación, donde la mayor parte se utilizó para los lechos de secado.

3.4.2.1 Filtro Prensa: Durante los primeros 30 minutos de la prueba se observó un flujo continuo de líquido filtrado, tiempo después del cual el flujo se volvió intermitente debido a la pérdida de carga del medio filtrante a medida que los sólidos se iban depositando sobre la superficie del mismo, al cabo de 90 min el goteo seso y se dio por terminada la prueba. De los 5 litros iniciales se obtuvo 1,39 kg de lodo, es decir el 24,17% del valor inicial con una humedad del 22,31%.

3.4.2.2 Lecho de secado: Se observó escurrimiento de agua los primeros 3 días de la prueba, después de esto el lodo presentó una consistencia gelatinosa que permitió retirarlo de las canastas para así dejar que una mayor área de este estuviera expuesto al sol. Así permanecieron 5 días más hasta que se no observó presencia de agua, y que el lodo tomó consistencia de roca polvorienta. Cabe mencionar que la prueba se realizó en época de verano y no se presentaron lluvias, lo cual benefició el tiempo total de deshidratación.

De los 109,5 litros de lodos iniciales se obtuvo 25,5 kg de lodo seco con una humedad del 7,11%, es decir un 20,25% peso del lodo inicialmente tratado. Este método permitió obtener un contenido de humedad 15,2% menor que el obtenido mediante el filtro prensa, pero requirió un mayor tiempo de secado por lo cual hace necesario una gran área para su aplicación.

Figura 4. Lodo después de 3,5 y 8 días de secado.



Con la relación entre la cantidad de lodo inicial y la cantidad de lodo deshidratado que se obtuvo de la prueba, se calculó la cantidad de lodo deshidratado que se produciría mensualmente en la planta si se emplean lechos de secado, obteniéndose un valor de 125.199 kg.

3.5 APLICACIÓN DEL LODO SECO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS.

Se moldearon manualmente ladrillos con un porcentaje de adición de lodo del 0 al 100% en pasos de 10%, en esta etapa se observó que a medida que aumentaba el

porcentaje de lodo adicionado la rigidez del ladrillo disminuía, tomando una consistencia gelatinosa para porcentajes mayores al 70 %; esto dificultó la manipulación y fue necesario un nuevo proceso de moldeo pasadas 24 horas para corregir las curvaturas presentadas, adicionalmente se presentó mayor adherencia a los moldes por lo cual se empleó una mayor cantidad de aserrín.

Figura 5. A) Ladrillos después de moldeados B) Ladrillos después de cocidos



3.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS.

3.6.1 Resistencia mecánica a la compresión: Se encontró que el porcentaje máximo de lodo que puede ser agregado sin que la resistencia a la compresión de los ladrillos descienda de los 100 kg/cm² recomendados para su uso no estructural es del 20% peso, lo cual produce que esta propiedad tome un valor de 101,2 kg/cm². En la Figura 8 se puede observar ninguna de las muestras, ni siquiera la muestra control (0% lodo) es apta para uso estructural, pues su resistencia no sobrepasa los 150 kg/cm².

La resistencia descendió 8,8% con respecto a la muestra control cuando se adiciono 20% de lodo y 15% cuando el porcentaje de lodo fue del 30%, muy por debajo de los reportados por diversos autores que varían entre el 19,9 y el 30,6 % para el 20% de lodos, y del 35 al 80% para el 30% de lodos [11], [15], [26], lo anterior indica que esta propiedad no sufrió un cambio tan drástico con la adición de lodo.

Figura 6. Resistencia a la compresión (kg/cm²) vs lodo adicionado (% peso).

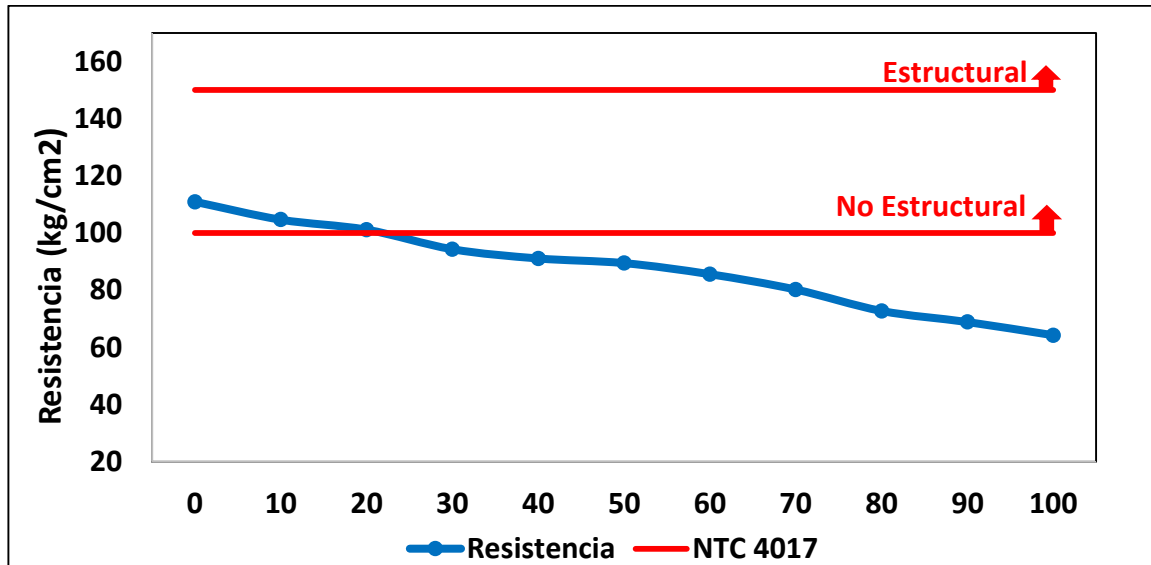
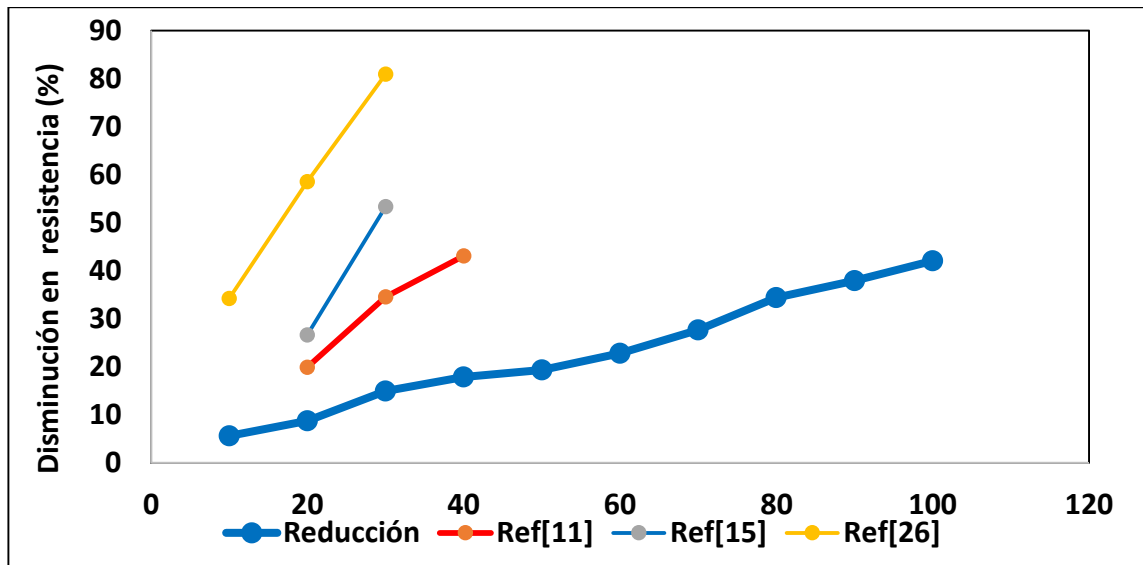


Figura 7. Disminución en la resistencia (%) vs lodo adicionado (% peso).

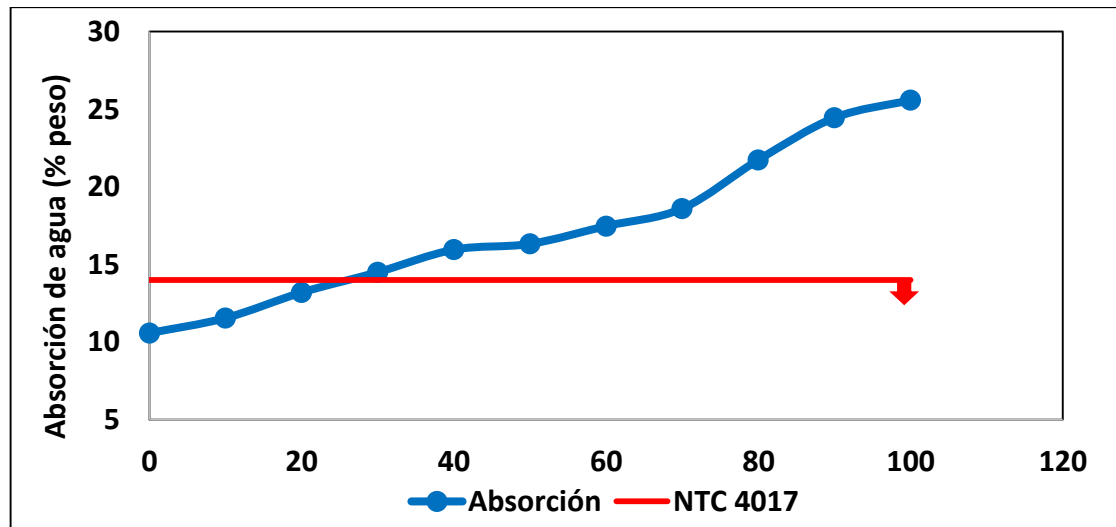


3.6.2 Absorción de agua: El porcentaje de absorción de agua aumentó a medida que se adicionó una mayor cantidad de lodo, sin embargo, para el 20% de lodo limitado por la resistencia a la compresión la absorción se mantuvo en 13,2%, lo cual permite que pueden ser usados tanto en interiores como en exteriores, ya que

la norma colombiana contempla valores del 20% para interiores y 14% para exteriores.

La literatura reporta valores mayores al 20% en la absorción de agua para ladrillos elaborados con 20% [15][27][28][11], esto indica que el ladrillo fabricado tiene una baja absorción teniendo en cuenta el 13,2% mencionado anteriormente.

Figura 8. Absorción de agua (%peso) vs lodo adicionado (% peso)



3.6.3 Pérdida de peso durante la cocción: El peso final de los ladrillos se redujo en mayor medida con el aumento en el porcentaje de lodo utilizado, esto se debe a los lodos tiene un mayor contenido de materia orgánica que se quema durante la cocción, en la Figura 11 se puede observar que para un 20% de lodo adicionado la pérdida de peso es del 17%, similar a lo reportado en la literatura para este mismo porcentaje [15], [29],[16]. Aunque para el 20% de lodo no se cumple con la norma del 15% en la pérdida de peso, esto puede tener efectos positivos sobre el transporte y el peso muerto que debe soportar la mampostería [29], [30].

La quema de materia orgánica presente en el lodo contribuye a aumentar la porosidad de los ladrillos, esto contribuye a aumentar la absorción de agua, produciendo además una estructura menos consolidada y por consiguiente una menor resistencia [31].

Figura 9. Pérdida de peso (%) vs lodo adicionado (%peso).

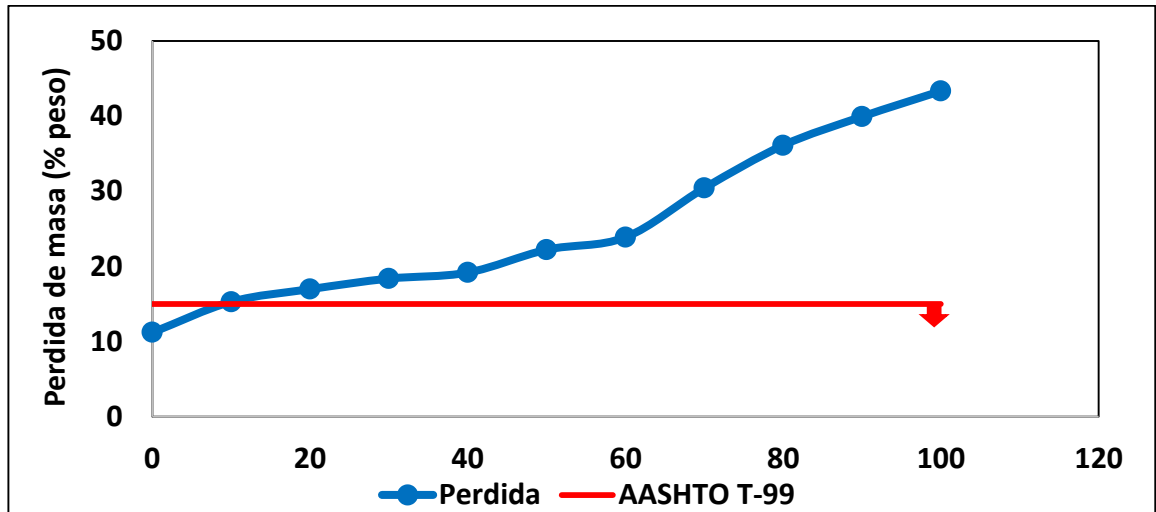


Tabla 8. Propiedades medidas para cada porcentaje de lodo adicionado.

Lodo adicionado [%peso]	Resistencia [kg/cm ²]	Disminución resistencia [%]	Absorción de agua (%peso)	Pérdida de masa [%peso]
0	110,9	-	10,6	11,2
10	104,7	5,6	11,6	15,3
20	101,2	8,8	13,2	17,0
30	94,3	15,0	14,5	18,4
40	91,1	17,9	16,0	19,2
50	89,5	19,3	16,3	22,2
60	85,6	22,8	17,5	23,9
70	80,2	27,7	18,6	30,4
80	72,7	34,4	21,7	36,1
90	68,9	37,9	24,5	39,9
100	64,2	42,1	25,6	43,3

3.7 Capacidad de la ladrillera

La ladrillera San Francisco cuenta con dos hornos que tienen una capacidad conjunta de 75.000 ladrillos al mes, los cuales tienen un peso promedio de 3,5 kg cuando están crudos y dado que el porcentaje máximo de lodo que se puede

reemplazar manteniendo la resistencia a la compresión dentro del límite recomendado es del 20% peso, se podrían procesar 52.500 kg de lodo deshidratado al mes, es decir el 44 % del total producido en la planta.

$$75.000 \frac{\text{unidades}}{\text{mes}} * 3,5 \frac{\text{kg mezcla cruda}}{\text{unidad}} * 0,20 \frac{\text{kg lodo}}{\text{kg mezcla cruda}} = 52.500 \frac{\text{kg lodo}}{\text{mes}}$$

Aunque la ladrillera San Francisco solo pueda procesar cerca de la mitad del total del lodo producido en la planta Floridablanca, se debe tener en cuenta que esta ladrillera es solo una de las muchas que se encuentran en la región, pues Santander produce cerca de 217.173 toneladas de ladrillos al mes [17], por lo cual esta alternativa se podría extender incluso a las demás PTAP del departamento, trayendo beneficios para la industria de los cerámicos ya que disminuirían los costos de las materia prima, así como beneficios para el medio ambiente dado que aumentaría la vida útil de las canteras y se dejaría de verter contaminantes en los cuerpos de agua.

4 CONCLUSIONES

- Haciendo uso de los lechos de secado con un tiempo de residencia de 8 días se logró obtener un porcentaje de humedad del 7,11%, un 15,2% menor al 22,31% obtenida utilizando el filtro prensa.
- El volumen máximo de lodo generado al mes en la planta es de 527 m³, este valor es la suma de los volúmenes de vaciado y lavado con manguera, de los cuales se estima se obtendrían 119.594 kg de lodo deshidratado.
- Ladrillos elaborados con hasta 20% peso de lodo deshidratado proveniente de la planta Floridablanca cumplen con los requisitos de resistencia a la compresión y absorción de agua establecidos por la norma técnica colombiana NTC 4205 para uso no estructural tanto en interiores como en exteriores.
- La reducción en la resistencia mecánica a la compresión de los ladrillos fabricados no se afectó tan drásticamente con el porcentaje de lodos adicionado, siendo la mayor limitante la baja calidad de la materia prima.
- La utilización en la industria ladrillera es prometedora, lo cual puede traer beneficios como la disposición adecuada de residuos, reducción de la contaminación hídrica y menor utilización de recursos naturales.

5 RECOMENDACIONES

- Extender el presente estudio para los lodos procedentes de diferentes plantas de tratamiento de agua potable.
- Estudiar el efecto de la adición de lodo en la fabricación de ladrillos cerámicos de diferentes formas y tamaños, así como en la elaboración de tejas.
- Analizar el comportamiento de las propiedades de los ladrillos cuando son cocidos en hornos industriales a diferentes temperaturas.
- Realizar un estudio de costo para la implementación de la alternativa de reutilización planteada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Ramírez Quirós, “Lodos producidos en el tratamiento del agua potable,” *Técnica Ind.*, vol. 275, pp. 46–52, 2008.
- [2] J. A. Gutiérrez Rosero, Á. I. Ramírez Fajardo, R. Rivas, B. Linares, and D. Paredes, “Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua,” *Ing. Univ. Medellín*, vol. 13, no. 25, pp. 13–27, 2014.
- [3] I. C. González Granados, “Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR,” Universidad De Córdoba, 2015.
- [4] Comisión Nacional del Agua Subdirección General Técnica, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Guía*. 2007.
- [5] M. H. Al-malack, N. S. Abuzaid, A. a Bukhari, and M. H. Essa, “Characterization , Utilization , and Disposal of Municipal Sludge : the State of-the-Art,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–27, 2002.
- [6] M. Martí Blasco, “Estudio y optimización del proceso de sedimentación de precipitados procedentes del tratamiento de los efluentes de una industria de recubrimientos de superficies metálicas,” Universidad Politécnica De València, 2012.
- [7] E. A. Dayton and N. T. Basta, “Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute,” *Water Environ. Res.*, vol. 73, no. 1, pp. 52–57, 2001.
- [8] E. J. Feria-Díaz, J. J., Polo-Corrales, L., & Hernández-Ramos, “Evaluation of coagulation sludge from raw water treated with moringa oleifera for agricultural use,” *Ing. e Investig.*, vol. 36, no. 2, pp. 14–20, 2016.
- [9] A. M. Evuti and M. Lawal, “Recovery of coagulants from water works sludge : A review,” *Adv. Appl. Sci. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 410–417, 2011.

- [10] L. Bai, C. Wang, C. Huang, L. He, and Y. Pei, "Reuse of drinking water treatment residuals as a substrate in constructed wetlands for sewage tertiary treatment," *Ecol. Eng.*, vol. 70, pp. 295–303, 2014.
- [11] O. Kizinievič, R. Žurauskiene, V. Kizinievič, and R. Žurauskas, "Utilization of sludge waste from water treatment for ceramic products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 464–473, 2013.
- [12] N. Husillos Rodríguez *et al.*, "Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 267–275, 2011.
- [13] N. Husillos Rodríguez *et al.*, "Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 5, pp. 778–786, 2010.
- [14] C. H. Huang and S. Y. Wang, "Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 174–183, 2013.
- [15] A. Benlalla, M. Elmoussaouiti, M. Dahhou, and M. Assafi, "Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks," *Appl. Clay Sci.*, vol. 118, pp. 171–177, 2015.
- [16] E. Wolff, W. K. Schwabe, and S. V. Conceição, "Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks," *J. Clean. Prod.*, vol. 96, pp. 282–289, 2015.
- [17] Cámara de comercio de Bogota, "Estudio sobre la situación actual de la industria," 2015. [Online]. Available: <https://www.ccb.org.co/>.
- [18] A. M. Bermeo Barreto and E. P. Idrovo Heredia, "Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción," Universidad de

Cuenca, 2014.

- [19] K. Zambrano Medina and E. M. Galvis Velásquez, “Identificación de las alternativas de uso ambiental de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas la Llana – Campo 23, superintendencia la Cira Infantas, Ecopetrol,” Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [20] A. N. Victoria, “Characterisation and Performance Evaluation of Water Works Sludge As Bricks Material,” *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 69–79, 2013.
- [21] Centro de estudios e investigaciones ambientales (CEIAM), “Caracterización de los vertimientos de las plantas la Flora y Floridablanca y el levantamiento topográfico de las unidades de tratamiento y sus desagües.”
- [22] M. A. Raigosa Restrepo, “Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de risaralda mediante el análisis costo-beneficio,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2012.
- [23] G. A. Ramírez Fernández, “Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta II del municipio de Cartago, Valle,” Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [24] C. Cacua Tirado and D. O. Saravia Sampayo, “Diseño conceptual del proceso de tratamiento de lodos para la planta Bosconia del A.M.B S.A E.S P,” Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [25] S. Builes Blandon, “Tratamiento Y Adecuada Disposición De Lodos Domesticos E Industriales,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [26] C. Elangovan and K. Subramanian, “Reuse of alum sludge in clay brick manufacturing,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 11, no. 3, pp. 333–341, 2011.

- [27] R. A. M. Bojorge and L. P. Aguilera, "Diseño tecnológico de un sistema separador-secador para su utilización en la recuperación de cerveza residual y posterior secado de la levadura sobrante," *Fac. Ing. Química*, vol. Ingeniero, p. 128, 2002.
- [28] P. Torres, D. Hernández, and D. Paredes, "Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 27, no. 3, pp. 145–154, 2012.
- [29] Y. Zhao, B. Ren, A. O'Brien, and S. O'Toole, "Using alum sludge for clay brick: an Irish investigation," *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 73, no. 5, pp. 719–730, 2016.
- [30] Y. Chen, Y. Zhang, T. Chen, Y. Zhao, and S. Bao, "Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2107–2111, 2011.
- [31] E. M. Da Silva, D. M. Morita, A. C. M. Lima, and L. G. Teixeira, "Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant," *Water Sci. Technol.*, vol. 71, no. 11, pp. 1638–1645, 2015.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Benlalla, M. Elmoussaouiti, M. Dahhou, and M. Assafi, "Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks," *Appl. Clay Sci.*, vol. 118, pp. 171–177, 2015.
- A. N. Victoria, "Characterisation and Performance Evaluation of Water Works Sludge As Bricks Material," *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 69–79, 2013.
- C. Elangovan and K. Subramanian, "Reuse of alum sludge in clay brick manufacturing," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 11, no. 3, pp. 333–341, 2011.
- C. H. Huang and S. Y. Wang, "Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 174–183, 2013.
- E. J. Feria-Díaz, J. J., Polo-Corrales, L., & Hernández-Ramos, "Evaluation of coagulation sludge from raw water treated with moringa oleifera for agricultural use," *Ing. e Investig.*, vol. 36, no. 2, pp. 14–20, 2016.
- E. M. Da Silva, D. M. Morita, A. C. M. Lima, and L. G. Teixeira, "Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant," *Water Sci. Technol.*, vol. 71, no. 11, pp. 1638–1645, 2015.
- E. Wolff, W. K. Schwabe, and S. V. Conceição, "Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks," *J. Clean. Prod.*, vol. 96, pp. 282–289, 2015.
- J. A. Gutiérrez Rosero, Á. I. Ramírez Fajardo, R. Rivas, B. Linares, and D. Paredes, "Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua," *Ing. Univ. Medellín*, vol. 13, no. 25, pp. 13–27, 2014.
- L. Bai, C. Wang, C. Huang, L. He, and Y. Pei, "Reuse of drinking water treatment

residuals as a substrate in constructed wetlands for sewage tertiary treatment,” *Ecol. Eng.*, vol. 70, pp. 295–303, 2014.

O. Kizinievič, R. Žurauskiene, V. Kizinievič, and R. Žurauskas, “Utilization of sludge waste from water treatment for ceramic products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 464–473, 2013.

Y. Chen, Y. Zhang, T. Chen, Y. Zhao, and S. Bao, “Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2107–2111, 2011.

Y. Zhao, B. Ren, A. O’Brien, and S. O’Toole, “Using alum sludge for clay brick: an Irish investigation,” *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 73, no. 5, pp. 719–730, 2016.

ANEXOS

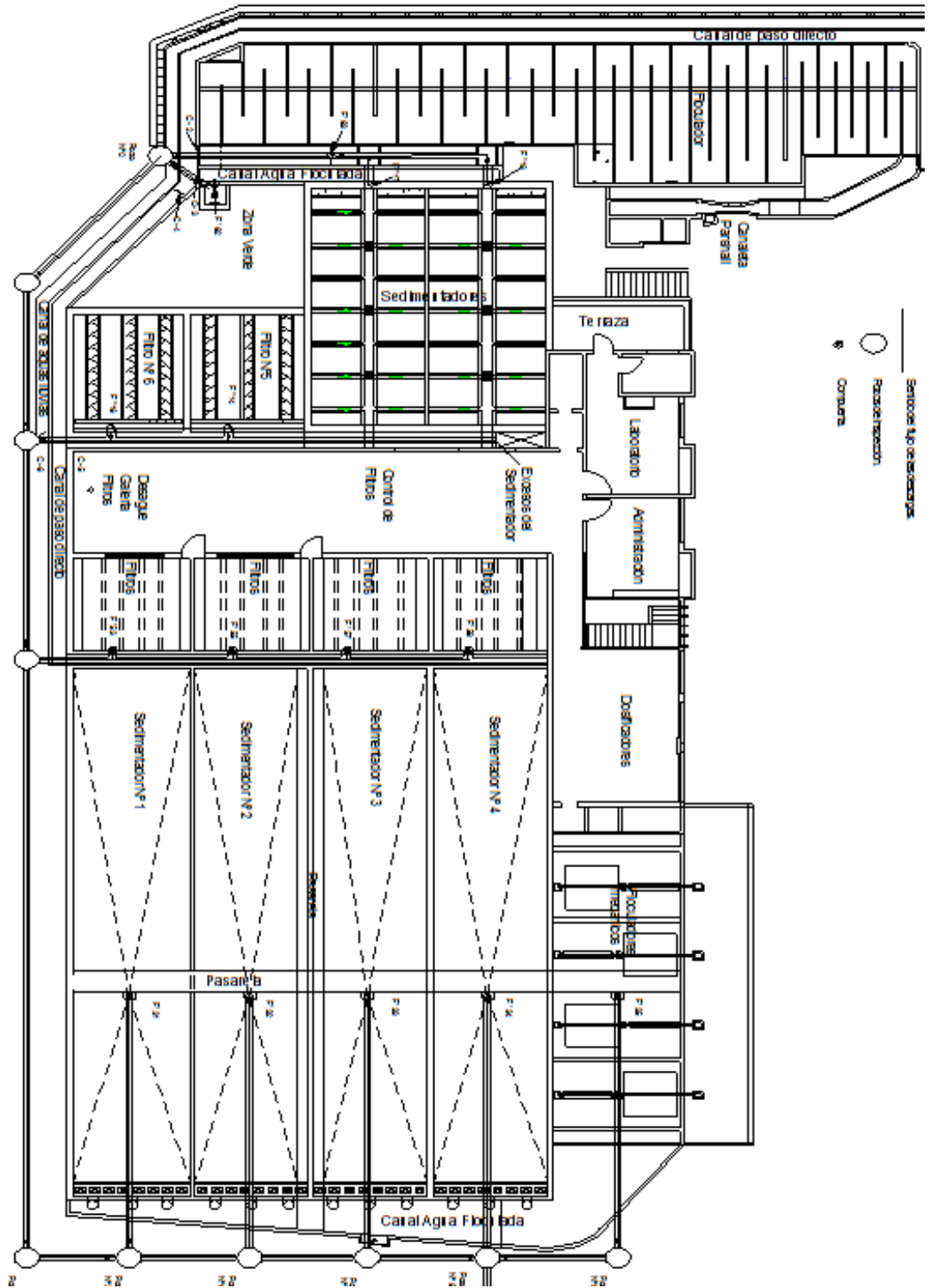
ANEXO A. Ventajas y desventajas de las alternativas de deshidratación.

	Ventajas	Desventajas
Lecho de secado	<ul style="list-style-type: none"> • Baja inversión inicial. • Baja humedad de la torta. • Bajo costo de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere grandes terrenos. • Altos tiempos de residencia. • Dependencia del clima.
Centrifugación	<ul style="list-style-type: none"> • Operación continua. • Requiere poca mano de obra. • Requiere poco espacio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de ruido. • Alto costos de operación. • Baja calidad del centrifugado.
Filtro prensa	<ul style="list-style-type: none"> • Baja humedad de la torta. • Buena calidad del filtrado. • Bajo consumo de energía. • Bajo consumo de aditivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión. • Mantenimiento de la tela • Funcionamiento por ciclos.
Filtro de bandas	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento continuo. • Moderado costo de inversión. • Bajo consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta humedad en la torta. • Mala calidad del filtrado. • Alto consumo de aditivos. • Sensible a las características del lodo.
Filtro al vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento continuo • Baja mano de obra 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto humedad en la torta. • Complejidad y costo inicial. • Alto consumo de energía. • Alto costo de mantenimiento.

ANEXO B. Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L	0,20
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	0,10
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	5,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,0
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1,00
Metales y Metaloides		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Antimonio (Sb)	mg/L	0,30
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	1,00
Berilio (Be)	mg/L	Análisis y Reporte
Boro (Bo)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,01
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,10
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Estaño (Sn)	mg/L	2,00
Hierro (Fe)	mg/L	1,00
Litio (Li)	mg/L	Análisis y Reporte
Manganeso (Mn)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002
Moibdeno (Mo)	mg/L	Análisis y Reporte
Níquel (Ni)	mg/L	0,10
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	0,10
Selenio (Se)	mg/L	0,20
Tiario (Ti)	mg/L	Análisis y Reporte
Vanado (V)	mg/L	1,00
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte

ANEXO C. Esquema general de la planta.



ANEXO D. Método SM-2540 B Sólidos totales secados a 103-105°C

Elija un volumen de muestra que produzca un residuo entre 2,5 y 200 mg. Pipetear el volumen medido de la muestra bien mezclada en la cápsula previamente pesada. Evaporar en un horno de secado, si es necesario, añada sucesivas porciones de muestra al mismo recipiente después de la evaporación. Baje la temperatura a aproximadamente 2 °C por debajo de la ebullición para evitar salpicaduras.

Secar la muestra evaporada durante al menos 1 h en un horno a 103-105 ° C, enfriar la fuente en el desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Repita el ciclo de secado, enfriamiento, desecación y pesaje hasta que se obtenga un peso constante, o hasta que el cambio de peso sea inferior al 4% del peso anterior o 0,5 mg, lo que sea menor. Al pesar la muestra seca, esté alerta al cambio de peso debido a la exposición al aire y / o a la degradación de la muestra. Analizar al menos el 10% de todas las muestras en duplicado. Las determinaciones duplicadas deben coincidir en un 5% de su peso promedio.

$$\frac{\text{mg sólidos totales}}{\text{litro}} = \frac{(B - A) \times 1000}{\text{volumen de muestra en mL}}$$