

Estudio de factibilidad con enfoque en economía circular para el aprovechamiento de lodos generados en el proceso clarificación de agua de la U2900 de la Refinería de Barrancabermeja

Alexander Guerrero Pérez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Procesos de Refinación y Petroquímica

Director:

Ingeniero Guillermo Cardozo Correa

MSc. En Desarrollo Rural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniero de Procesos de Refinación y Petroquímica

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A la Refinería de Barrancabermeja que, en su primer centenario, dará a la ciudad donde opera un ambiente más sano, más amigable y con una generación de huella hídrica invaluable, adicionando componentes de economía circular en todos nuestros procesos.

Agradecimientos

A Dios que me permitió la vida y me dio fortaleza para alcanzar este punto, a mi esposa María Luisa y mis hijos Bryan y Sebastián, quienes me apoyan y me inspiran en este paso terrenal; Al Ing. Domingo Escalante Salazar y su equipo de trabajo quienes aportan a esta investigación y desarrollo de Ingeniería, a la Refinería de Barrancabermeja por creer en su recurso humano y apoyar su crecimiento personal y profesional.

A la ciencia, que por su virtud permite dejar huella social, permitiendo mejorar la calidad de vida de los seres humanos y darnos el impulso para conocer y responder en la necesidad de dar circularidad a nuestros mal llamados residuos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Planteamiento del Problema	18
2. Objetivos.....	21
2.1 Objetivo General.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Marco Teórico	22
3.1 Proceso de Economía Circular.....	22
3.1.1 El Modelo de Economía Circular del Grupo Ecopetrol.....	22
3.1.2 Camino Recorrido por el Grupo Ecopetrol.....	24
3.2 Proceso de Clarificación de Agua.....	24
3.2.1 Coagulación	25
3.2.2 Floculación.....	25
3.2.3 Sedimentación.....	25
3.3 Deshidratación de Lodos.....	26
3.3.1 Sistema Propuesto para reuso del lodo	26
3.4 Caracterización de Lodos.....	29
4. Metodología.....	36
5.1 Caracterización de Lodos.....	41

5.2 Factibilidad Técnica de Aprovechamiento de Lodos.....	46
5.2.1 Aprovechamiento en Uso de Materiales para la Construcción.....	46
5.2.2.5 Aprovechamiento como Enmienda Agrícola.....	52
5.3 Análisis Factibilidad Económica	54
5.4.1 Factibilidad Económica de Deshidratación de Lodos y Reuso del Agua recuperada.....	54
5.4.2 Análisis de factibilidad Económica de reuso de lodos.....	56
5.4.3 Beneficio económico por sector productivo donde se aplique el uso de los lodos de clarificación como materia prima sustituyente	56
Conclusiones	57
Referencias Bibliográficas	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Componentes sistema de manejo de lodos de U2900.	16
Figura 2 Esquemática de flujos en el clarificador.....	18
Figura 3 Extrapolación de NTU a SST.....	19
Figura 4 Modelo de Economía Circular GE.....	23
Figura 5 Partes del clarificador superpulsator.....	25
Figura 6 Plano levantamiento topográfico de las piscinas de decantación de lodos.....	26
Figura 7 Estrategia propuesta deshidratación de lodos.....	27
Figura 8 Sistema de deshidratación.....	28
Figura 9 Sedimentos después de la deshidratación con Geotube.....	29
Figura 10 Modelo de Economía Circular GE.....	36
Figura 11 Modelo de Economía Circular GE.....	36
Figura 12 Límites de Atterberg.....	43
Figura 13 Diagrama de Casagrande.....	44
Figura 14 Gráfica de la granulometría del lodo.....	45
Figura 15 Gráfica de la granulometría del lodo.....	46
Figura 16 Resultados de resistencia a la compresión.....	47
Figura 17 Tipos de falla.....	48
Figura 18 Caracterización de lodos U2900.....	50
Figura 19 Placa huella realizada al 6,05% (dos primeras) y 15.05% (dos últimas).....	51
Figura 20 Obras de alfarería realizadas con lodo de clarificación.....	52

Figura 21 Proceso de desarrollo de muestras vegetales (pimentón a 70 msnm) 53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Agua tratada en la U2900	19
Tabla 2 Generación de sedimentos	19
Tabla 3 Composición para ladrillos no estructurales	37
Tabla 4 Composición ladrillos estructurales.....	38
Tabla 5 Composición ladrillos estructurales.....	39
Tabla 6 Composición de mezcla para placa huella peatonal	41
Tabla 7 Mezcla Fertilizante comercial y lodo.....	41
Tabla 8 Caracterización de lodos U2900	42
Tabla 9 Caracterización de lodos U2900	45
Tabla 10 Caracterización de lodos U2900	47
Tabla 11 Caracterización de lodos U2900	50
Tabla 12 Caracterización de lodos U2900	51
Tabla 13 Formulación para uso en fabricación de obras de alfarería	52
Tabla 14 Resultados lodos de clarificación U2900 vs requerimiento nutricional de un suelo	54
Tabla 15 Inversión inicial alternativa uso de lodos.	55
Tabla 16 Factor de aprovechamiento del lodo de clarificación pucón potencial.....	56
Tabla 17 Beneficio Potencial	56

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Caracterización de Lodos de Clarificación U2900.....	62
Apéndice B. Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos.....	63
Apéndice C. Determinación Límites de Atterberg e Índice de Plasticidad de los Suelos.	64
Apéndice D. Análisis Absorción Mampostería Ladrillos con Arena y (40%) Lodo (L1).....	65
Apéndice E. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo con Arena y (40%) lodo (L1).....	66
Apéndice F. Análisis Resistencia Compresión Ladrillo Arena,20% Lodo y Tamo(L3 y L4).....	67
Apéndice G. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo Arena, 30% Lodo y Tamo (L3).	68
Apéndice H. Análisis Resistencia a la Compresión Placa Huella (15% Lodo).	69
Apéndice I. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo de Concreto con 20% de Lodo sin prensado.	70
Apéndice J. Análisis Resistencia a la Compresión Postes de Concreto con Lodo M3 y sin Lodo (Blanco) M1.	71

Glosario

Aguas residuales: Agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar. Las aguas de refrigeración no se consideran residuales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, s.f.).

Aprovechamiento de Residuos: Utilización de residuos mediante actividades como separación en la fuente, recuperación, transformación y reúso de estos permitiendo la reincorporación en el ciclo económico y productivo con el fin de generar un beneficio económico y social y de reducir los impactos ambientales y los riesgos a la salud humana asociados con la producción, manejo y disposición final de los residuos (Decreto 2676, 2000).

Biosólido: Producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso (Decreto 1287, 2014).

Captación: Describe las fuentes hídricas de donde se capta el agua cruda y la forma como se envía hacia la Unidad de Proceso.

Catalogación: Proceso de gestión interno de Ecopetrol S.A. para incorporar un producto, subproducto o material en su base de información.

Deshidratación de Lodos: Proceso de remoción del agua de lodos hasta formar una pasta sólida (Urbano, 2006).

Economía Circular: Una economía circular es un modo de producción y consumo que implica reutilizar, reparar, restaurar y reciclar materiales y productos existentes durante el mayor tiempo

posible, extendiendo así la vida útil de los materiales y productos existentes, que en la práctica significa menos desperdicio. En otras palabras, cuando un producto llega al final de su vida, sus materias primas se mantienen en la economía tanto como sea posible. De esta forma, se pueden utilizar con eficacia una y otra vez, creando más valor. La economía circular es diferente del modelo económico lineal tradicional, que se basa en tomar-hacer-consumir-tirar (Parlamento Europeo, 2015).

Encapsulamiento: Es el proceso mediante el cual se incorpora un residuo o sustancia dentro de un material que lo aísla del medio ambiente, sin que los componentes del residuo generen migraciones y contaminación.

Estudio de Factibilidad: Tiene como objetivo central determinar las necesidades de recursos financieros, las fuentes y condiciones de estas y las posibilidades de reales de acceso a las mismas. (Varela, 2001, p. 168). Parte de supuestos, pronósticos y estimaciones, por lo que el grado de preparación de la información y su confiabilidad depende de la profundidad con que se realicen tanto los estudios técnicos, como los económicos, financieros y de mercado, y otros que se requieran.

Huella hídrica: Es un indicador medioambiental que define el volumen total de agua dulce utilizado para producir los bienes y servicios que habitualmente consumimos. Es una variable necesaria que nos dice el agua que nos cuesta fabricar un producto. Según la metodología del Water Footprint Network⁴, define la Huella Hídrica de cualquier bien o servicio, como el volumen de agua utilizado-directa e indirectamente para su producción, sumados los consumos de todas las etapas de la cadena productiva.

Geotubos: Son unidades fabricados con tejidos especiales de alta resistencia y son una opción muy rentable en aplicaciones de drenaje, dragado entre otras. Las unidades de Geotube® están

disponibles en varios tamaños y pueden suministrarse lo suficientemente grandes como para contener más de 900 metros cúbicos de material cada una.

Lodos: Denominase lodo a la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares (Decreto 1594, 1984, artículo 12).

Lodos de clarificación: Es el lodo proveniente del proceso de clarificación (coagulación y posterior decantación) de agua cruda proveniente de la Ciénaga San Silvestre y el Rio Magdalena.

Materiales de construcción: Son aquellos materiales que se utilizan con un fin constructivo. Muchas sustancias minerales naturales, como la arcilla, las gravas y las rocas se utilizan como materias primas para fabricar productos de construcción en edificación y obra civil (Bustillo, 2008).

Proceso de Clarificación: Procedimiento que remueve la turbiedad y el color del agua eliminando las partículas finas presentes en el líquido. Generalmente los procesos de clarificación se aplican después de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales o procesos fisicoquímicos.

SosTECnibilidad: La contribución y generación de operaciones responsables, seguras y eficientes, armonizando el relacionamiento con el medio ambiente y los grupos de interés; bajo un marco de gobierno transparente y ético, haciendo uso de la tecnología para el desarrollo de soluciones innovadoras a los retos actuales y futuros.

STAB RDC: Es un producto fisicoquímico desarrollado por INGELABSP LTDA, para la estabilización de suelos arcillosos, limosos, arenosos y la combinación de estos, generando un encapsulamiento físico-químico (no permite la generación de polución) y mejorando las condiciones físicas del suelo.

Valorización: Cualquier operación con una finalidad útil en la que se pueda emplear los residuos como una sustitución de otros materiales. En este caso no se aprovechan los materiales que

componen los residuos, si no la energía contenida en ellos. Por ende, existe viabilidad de la valorización de residuos urbanos como fuente energética. (Mancebo, 2019).

Vertimiento: Cualquier descarga de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido a un cuerpo de agua, alcantarillado o al suelo (Decreto 1594, 1984, artículo 6). Según la Secretaría Distrital de Ambiente (2020), los vertimientos deben presentar una caracterización, pues algunos están prohibidos y otros requieren de permisos de descarga.

Resumen

Título: Estudio de factibilidad de uso de lodos proveniente del proceso de clarificación de agua en la U2900 de la refinería de Barrancabermeja usando un enfoque de economía circular*

Autor: Alexander Guerrero Pérez**

Palabras Claves: Lodos, clarificación, recirculación, subproducto, economía circular, valorización.

Descripción: Este proyecto de investigación evalúa las alternativas más favorables de uso y valorización de los lodos resultantes del proceso de clarificación de agua en la U2900, tomando como base su caracterización fisicoquímica y el potencial de transformación, de acuerdo con las necesidades del mercado local de Barrancabermeja y su área de influencia, generando desarrollo a través de procesos productivos para utilización del lodo como materia prima, dando origen a nuevas oportunidades de comercio en uso de fabricación de materiales de construcción como ladrillos, postes de concreto, placa huellas, entre otros, en biorremediación de suelos, o como abono orgánico, logrando un impacto ambiental positivo para la ciudad. Además, se incluyó en la canasta de subproductos de Ecopetrol S.A. abandonando la categoría de residuo industrial.

La metodología utilizada tiene fundamento cuantitativa y analítica, variando la formulación existente para la fabricación de cada caso de negocio analizado. Los resultados obtenidos nos permiten direccionar el uso de los lodos de clarificación hacia el campo de la construcción o mampostería estructural, como suplemento orgánico para abono, o como insumo para la biorremediación de terrenos, permitiendo una segunda opción de uso en la economía no lineal.

El proceso conlleva la necesidad de deshidratar el lodo, situación que permitiría abordar y concebir el proyecto desde su inicio dentro del marco de la economía circular, es decir con la recuperación y reintegro al tratamiento de la totalidad del agua retirada del lodo, se podría evidenciar un ahorro en la captación del caudal tomado, disminuyendo el volumen captado en 30% aproximadamente, lo que se representa un alto impacto en la huella hídrica de la Refinería para con la ciudad y sus ocupantes.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Guillermo Cardozo Correa. MSc en Desarrollo Rural.

Abstract

Title: Feasibility study of the use of sludge from the water clarification process in the U2900 of the Barrancabermeja refinery using a circular economic approach*

Author: Alexander Guerrero Pérez**

Keywords: Sludges, clarifications, recirculation, by-product, circular economic, recovery.

Description: This research project evaluates the most favorable alternatives for the use and valorization of the sludge resulting from the water clarification process at U2900, based on its physicochemical characterization and transformation potential, according to the needs of the local market of Barrancabermeja and its area of influence, generating development through productive processes for the use of sludge as raw material, giving rise to new trade opportunities in the manufacture of construction materials such as bricks, concrete posts, footprints, among others, in soil bioremediation, or as organic fertilizer, achieving a positive environmental impact for the city. In addition, it was included in Ecopetrol S.A.'s basket of by-products, leaving the industrial waste category.

The methodology used has a quantitative and analytical basis, varying the existing formulation for the manufacture of each business case analyzed. The results obtained allow us to direct the use of the clarification sludge towards the field of construction or structural masonry, as an organic supplement for fertilizer, or as an input for soil bioremediation, allowing a second use option in the non-linear economy.

The process entails the need to dehydrate the sludge, a situation that would allow us to approach and conceive the project from its inception within the framework of the circular economy, that is, with the recovery and return to treatment of all the water removed from the sludge, it could be demonstrate savings in the capture of the flow taken, reducing the volume captured by approximately 30%, which represents a high impact on the water footprint of the Refinery for the city and its occupants.

* Degree work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Guillermo Cardozo Correa. MSc en Desarrollo Rural.

Introducción

La U2900 fue construida entre los años de 1975 y 1980. Siendo inaugurada el 15 de diciembre de 1980 junto a la Unidad de Balance de la Refinería de Barrancabermeja. En sus inicios esta unidad operaba con 2 clarificadores en paralelo para suplir los requerimientos de agua industrial, potable, de servicios, agua suavizada y agua desmineralizada; el caudal tratado era de 4500 GPM aproximadamente. El agua de purga de estos clarificadores era enviada a la piscina BA2913 y de allí por rebose llegaba a las cajas de aguas lluvias de la planta, hasta alcanzar finalmente el separador de aguas lluvias de la Unidad de Balance (SE3090) sin tratamiento alguno. Esta operación generó en múltiples ocasiones taponamiento severo del canal colector de aguas lluvias general de la Unidad de Balance y colapso del mismo separador de agua lluvias SE3090, impactando la operación de este y elevando los costos de mantenimiento de manera importante.

Como medida de mejoramiento para esta condición, se desarrolló entre los años 1997 y 1998 la construcción de las piscinas de decantación para tratar el agua de purga de los clarificadores de la Unidad de Balance en el área ubicada frente al comando interno de la Policía. Estas piscinas entraron a funcionar antes de finalizar el año 1998, permitiendo decantar los lodos de la corriente de purga de los clarificadores.

Figura 1

Componentes sistema de manejo de lodos de U2900.



Los lodos son retirados de forma mecánica y llevados a una celda de deshidratación en la escombrera de la Refinería, por su parte, el agua efluente de las piscinas (clarificada) es direccionada, al vertimiento autorizado, caño Madre Vieja, que, a su vez, entrega estas aguas al Caño El Rosario. Al evitar llevar los lodos a este sitio, se elimina el vertimiento con la deshidratación de lodos.

Con la entrada en vigor de la Resolución 631 de 2015, en la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, la Refinería de Barrancabermeja, inicia estudio de alternativas de eliminación de este vertimiento y aprovechamiento de estos lodos generados. Para lo cual, en el año 2021, se analizaron 5 alternativas: 1. Mejoramiento de las piscinas existentes de recibo de Purgas de los Clarificadores de Balance (CL2911ABC). 2. Adecuación del área y sistema existente para implementar tecnología de geomembranas (Geotubos). 3. Mantener con el proceso y sistema de las piscinas existentes. 4. Uso de tecnología de filtros prensa. 5. Uso de tecnología de Centrifugación (Tricanter). Estas tecnologías, fueron evaluadas por medio de la matriz denominada selección de alternativas, teniendo en cuenta criterios: Financieros, de Seguridad y medio ambiente, de mantenimiento y soporte técnico, y tecnológicos. Y como resultado se seleccionó la segunda alternativa que corresponde a la tecnología de Geomembranas. Estas alternativas, fueron resultado de la necesidad de deshidratar los lodos y reutilizarlos (Guerrero, 2021).

1. Planteamiento del Problema

Actualmente la Refinería de Barrancabermeja capta agua cruda para su tratamiento de dos fuentes a saber, Rio Magdalena y Ciénega San Silvestre, en ambos casos con un caudal aproximado de 9000 GPM y 2500 GPM respectivamente.

La U2900, trata en promedio 2500 GPM, los cuales se componen de una relación de mezcla por las dos corrientes de captación. La clarificación del agua se da en los clarificadores SCL2911ABC, que pueden tratar 3416 GPM máximo cada uno. Los lodos se forman en la etapa de coagulación que se da en el proceso de clarificación del agua, y son retirados de allí por acción de las purgas mecánicas del clarificador con el fin de controlar su nivel al interior del equipo, manteniendo un filtro natural denominado manto de lodos, este flujo de agua de purga de lodos equivale a un 6% aproximadamente del caudal total cargado a la unidad; La turbidez promedio de la corriente de mezcla de carga es de 350 NTU, que mediante extrapolación a SST equivalen a captar alrededor de 356 gr/m³ de sedimentos secos. Con este caudal se generan aproximadamente 4 m³ de sedimentos al día en base seca. Este material equivale a 11 m³ de sedimentos día con una humedad remanente de aproximadamente 60%. Se estima su generación mensual en 339 m³ de sedimentos, estos sedimentos tienen un peso aproximado de 407 toneladas.

Figura 2

Esquemática de flujos en el clarificador

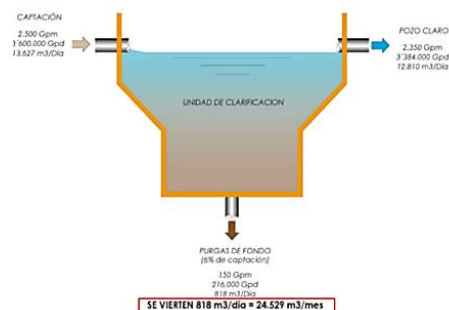


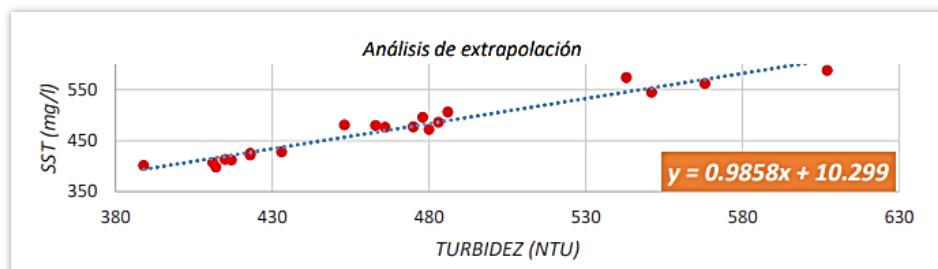
Tabla 1*Agua tratada en la U2900*

Parámetro	Cantidad (m³)
Volumen de agua captado por día	13628
Volumen de agua clarificada por día	12810
Volumen de agua de purga por día	818

Cada año se retira en promedio 5000 toneladas de lodos y son llevados a una celda ubicada en la escombrera de la Refinería para su disposición final, sin darle ningún tratamiento. Son requeridos cada año un valor de 1200 millones de pesos para mantenimiento de las piscinas, retiro y disposición de estos lodos.

Tabla 2*Generación de sedimentos*

Parámetro	Cantidad
Base seca al día	4 m ³
Humedad del 60% al día (Confinado)	11m ³
Humedad del 60% al mes (Confinado)	339 m ³
Peso del material confinado al día	14 Ton
Peso del material confinado al mes	407 Ton

Figura 3*Extrapolación de NTU a SST*

La capacidad instalada de la escombrera está en fase final, siendo necesario definir un uso ingenieril para estos lodos de clarificación, evitando su disposición final en este lugar. Por ello, se

plantea la siguiente pregunta: ¿Pueden ser utilizados los lodos de clarificación deshidratados en la fabricación de materiales de construcción, como abono orgánico o en la biorremediación de suelos?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad para el aprovechamiento de los lodos generados en el proceso de clarificación de agua en la U2900 de la refinería Barrancabermeja con enfoque en economía circular.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el sistema de producción de ladrillos artesanales estructurales y no estructurales, obras de alfarería, uso como enmienda agrícola, remediación y recuperación de suelos utilizando lodos de clarificación.
- Realizar pruebas de campo por sector productivo y analizar resultados.
- Determinar la viabilidad financiera, usando una aproximación de economía circular, del proceso de valorización de lodos priorizado.

3. Marco Teórico

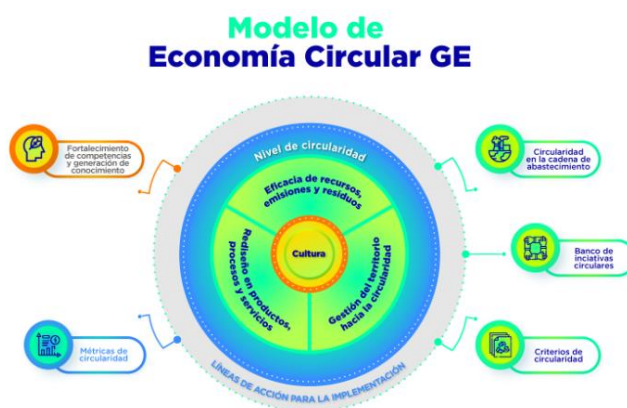
3.1 Proceso de Economía Circular

Busca la optimización y eficiencia de las entradas, los procesos y las salidas de un sistema productivo, cerrando ciclos del agua, materiales y energía, minimizando la contaminación del aire, suelo, agua y la generación de residuos, contribuyendo a la restauración de los ecosistemas y a la lucha contra el cambio climático (ECOPETROL, 2021).

3.1.1 El Modelo de Economía Circular del Grupo Ecopetrol

De acuerdo con las políticas de Ecopetrol S.A. con el modelo de economía circular: Buscamos impulsar una producción y consumo más sostenible y responsable, lo cual está directamente relacionado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 12), para lograr regenerar los sistemas naturales, mantener productos y materiales en uso o circulando y así minimizar el uso de recursos naturales (renovables y no renovables), la generación de residuos y emisiones de CO₂, y por consiguiente reducir los impactos negativos ambientales y sociales.

Interpretamos la economía circular como un habilitador de nuestras metas en transición energética, cero emisiones netas de carbono, disminución de la huella del agua, y el cierre de ciclos de materiales y residuos. Finalmente, aportar con oportunidades de crecimiento, innovación y generación de empleo. (Portal Ecopetrol, 2021)

Figura 4*Modelo de Economía Circular GE*

Nota. Tomado de Portal Ecopetrol, 2021.

De acuerdo con el modelo de economía circular de Ecopetrol (figura 4), comprende los siguientes componentes para la implementación y el desarrollo de iniciativas en la estrategia de sostenibilidad son:

Cultura: Gestión del cambio a través de una comunicación efectiva y asertiva entre todas las partes involucradas, así como mecanismos para fortalecer competencias técnicas para interiorizar y entender el concepto de economía circular.

Eficacia de recursos, emisiones y residuos: Aumentar la ecoefectividad en el uso de recursos naturales y materiales; reducir la generación o aumentar el aprovechamiento de residuos; fomentar simbiosis industrial en proyectos y operaciones al interior de la cadena de valor; y crear nuevos modelos de negocio.

Gestión del territorio hacia la circularidad: Aportar a la protección del capital natural y social de las zonas de influencia operativas, mediante el desarrollo de proyectos circulares con impactos positivos socioambientales en los territorios donde el Grupo Ecopetrol tiene presencia.

Rediseño en productos, procesos y servicios: Busca continuar con el mejoramiento de la calidad de los productos, con incorporación de materiales secundarios o residuos. Implementar mejores prácticas enfocadas en generación y disposición de residuos sólidos, ahorro de agua y energía en la prestación de servicios de mantenimiento, aseo y alimentación e incorporación de criterios circulares en la actualización de procedimientos operativos y financieros.

Nivel de circularidad: Busca realizar la medición del nivel de madurez de circularidad cualitativa y cuantitativa frente a estándares nacionales e internacionales.

3.1.2 Camino Recorrido por el Grupo Ecopetrol

En Ecopetrol S.A. el modelo de economía circular inicio su recorrido en el año 2018 con la firma del Pacto Nacional de la Economía Circular, una vez el gobierno lanza la estrategia Nacional de Economía Circular. En el año 2019, se define como eje estratégico de la Gestión Ambiental, realiza la primera jornada de Economía circular del sector hidrocarburos y elabora la agenda conjunta con el Ministerio del Medio Ambiente. Para el siguiente año (2020), crea el modelo de Economía Circular para el Grupo empresarial, elabora el primer plan con las filiales e identifica 333 iniciativas circulares en todo el grupo empresarial Ecopetrol S.A. En el año 2021, incorpora este elemento como destacado de la Estrategia de sostenibilidad. Define la hoja de ruta 2021-2050. Continúa el plan de trabajo con sus filiales, realiza la primera medición cualitativa de circularidad e identifica 413 iniciativas como Grupo Ecopetrol, de las cuales 297 son de Ecopetrol S.A. (ECOPETROL, 2021).

3.2 Proceso de Clarificación de Agua

El proceso de clarificación de agua en la U2900 se lleva a cabo en varias etapas una vez la mezcla de agua ingresa al clarificador:

3.2.1 Coagulación

Este tratamiento fisicoquímico está basado principalmente en la dosificación de químicos (coagulantes), seguida a la formación de flocs los cuales son separados del agua por sedimentación (Barrenechea, 2004). En la coagulación, también llamada mezcla rápida, se da la adición de los químicos, su hidrólisis y dispersión para causar una desestabilización de partículas presentes en el líquido (Vargas, 2004) que luego son aglomeradas en la floculación o también llamada mezcla lenta. Debido a esta aglomeración se forman partículas más grandes llamadas flocs que luego son sedimentados por gravedad formando un lodo.

3.2.2 Floculación

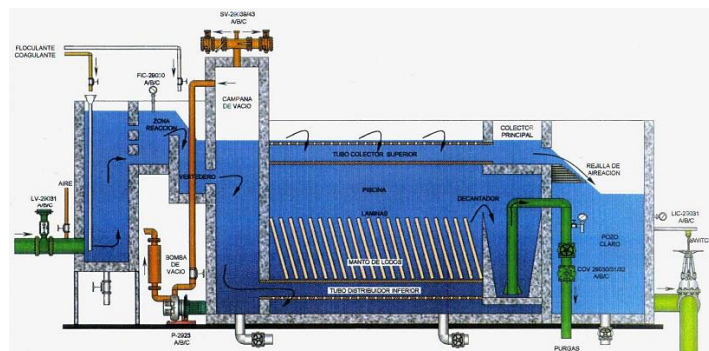
Es el proceso de aglomeración de partículas descargadas eléctricamente, al colocarse en contacto unas con otras creando flóculos por medio de la adición química del ayudante de floculación y cuyo objetivo es el de aumentar el volumen, peso y la cohesión de los flóculos formados anteriormente (Lorenzo, 2006).

3.2.3 Sedimentación

Es el proceso de separación de sólidos suspendidos con el agua o partículas suspendidas floculadas en el proceso de clarificación por acción de la gravedad.

Figura 5

Partes del clarificador superpulsator



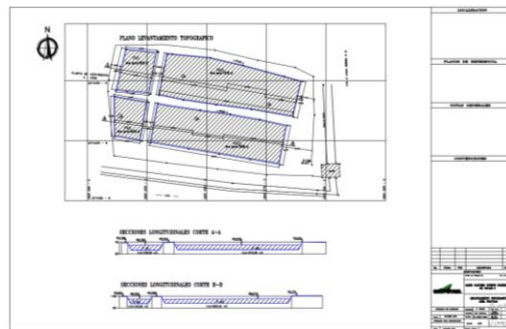
Nota. Tomado de Manual de Operación de U2900, ECOPEPETROL, 2020.

3.3 Deshidratación de Lodos

En la U2900 de la Refinería de Barrancabermeja, el lodo es deshidratado en cuatro piscinas de decantación de forma natural, estas piscinas conforman dos trenes de secado, operando uno a la vez, mientras se adelanta el mantenimiento del tren alterno. Allí los sólidos suspendidos son separados en su mayoría por acción de la fuerza de gravedad y el tiempo de residencia en cada tren de tratamiento. Una vez el tren de piscinas alcanza su nivel máximo de acumulación, el sedimento es retirado de forma mecánica a una celda de deshidratación en la escombrera de la Refinería. Finalmente, el agua resultante es vertida al caño Madre Vieja, bajo autorización y monitoreo de la autoridad ambiental gubernamental.

Figura 6

Plano levantamiento topográfico de las piscinas de decantación de lodos



Nota. Adaptado de Centro de información técnico de la GRB, ECOPETROL.

Como parte del proceso de esta ingeniería se analizó y definió otra metodología para el secado de los lodos de clarificación de la U2900, y apoyados en una matriz de decisión, se definió implementar la siguiente alternativa.

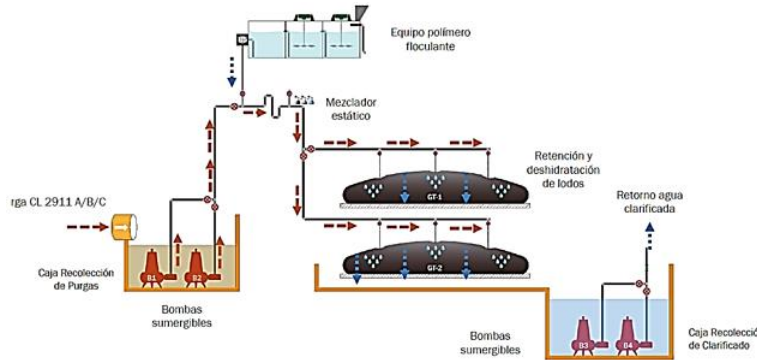
3.3.1 Sistema Propuesto para reuso del lodo

La estrategia contempla un sistema integral para el manejo, confinamiento y deshidratación de lodos. Dicho sistema, se planea ubicarlo en la U2900 tal como se muestra en la Figura 9, inicia con la captación de las purgas provenientes de los clarificadores SCL2911ABC, en donde se

maneja un caudal de 24.529 m³ mensuales. El alcance de este sistema fue definido en la Ingeniería Conceptual de deshidratación de lodos de clarificación de la U2900 de la Refinería de Barrancabermeja desarrollada en 2022.

Figura 7

Estrategia propuesta deshidratación de lodos



Las purgas (agua/lodo) son movilizadas hacia la zona de inyección química en donde se adiciona un polímero flocculante para favorecer el aglutinamiento de las partículas sólidas en suspensión y su precipitación. Esta corriente pasa a través de un mezclador estático que asegura la reacción homogénea, posteriormente el flujo ingresa al Geotube® un contenedor confeccionado con fibras sintéticas de polipropileno de alto módulo que retiene en su interior el material sólido, y permite que el agua clarificada drene a través de su superficie, el agua clarificada es recolectada en una celda de deshidratación y bombeada hacia el sitio de aprovechamiento, lo cual permite realizar un circuito cerrado del agua. El sólido al interior del tubo pierde humedad lo que permite darle manejo como material seco. A continuación, se detalla cada una de las etapas que conforman el sistema propuesto:

Proceso Hidráulico. Se calcula y se diseña con base en los requerimientos de instalación, inicialmente se cuenta con una caja que acopia las purgas provenientes de los clarificadores, en

esta se encuentran bombas sumergibles que de manera controlada envían las purgas hacia el sistema de deshidratación.

Proceso Químico. Cuenta con un equipo de preparación de polímero floculante y unidades de bombeo que inyectan este polímero a la línea proveniente del sistema de conducción; esta adición permite la conformación de los flocs necesarios para el proceso de retención y deshidratación.

Proceso de Deshidratación. Está compuesto por la unidad de Geotube dispuesta sobre una celda de deshidratación, tal como se muestra en la Figura 8. Para establecer la cuantía de sólidos, se realizó una extrapolación teniendo en cuenta los datos de turbidez promedio del último año y se estima el llenado de un Geotube de 300m³ de capacidad con 60% de humedad remanente en 26,5 días.

Figura 8

Sistema de deshidratación



En la tabla 2, se presenta la cantidad de sedimentos generados con una humedad del 60%. A partir de esta información se define que para la unidad de servicios industriales balance se requiere 1.13 Geotube.

Retorno de Agua: El agua clarificada proveniente del Geotube es acumulada en una caja de acopio que dispone de sistemas de bombeo para trasegarla bien sea al pozo claro de la unidad de clarificación o a cualquier otra parte para su aprovechamiento.

Manejo de Sedimentos: La cantidad de sedimento disponible en la unidad de servicios balance es de $4\text{m}^3/\text{día}$ en base seca y $11\text{m}^3/\text{día}$ con el 60% de humedad. Tal como se muestra en la Figura 9, estos sedimentos confinados y deshidratados dentro del Geotube, pueden ser retirados mediante métodos mecánicos convencionales y manejados como material seco. De acuerdo con la cantidad disponible se ha calculado que el retiro del lodo seco del geotube se puede realizar en dos días, requiriendo 24 viajes de volquetas de 14 m^3 cada uno.

Figura 9

Sedimentos después de la deshidratación con Geotube



3.4 Caracterización de Lodos

Las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), están direccionadas hacia el control microbiológico químico y físico del agua, con fines de consumo humano. Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) tanto industrial (PTARI) como domestica (PTARD), permiten la recuperación del recurso devolviéndolo de forma segura al medio ambiente. Sin embargo, estos tratamientos generan altos volúmenes de corrientes secundarias denominadas lodos y su disposición final constituye un desafío. Los lodos se definen como una corriente semisólida

y su composición depende del agua de alimentación y el tipo de unidad de operación desde la cual se descarga. Comúnmente estas corrientes pueden clasificarse como primarios y secundarios.

El lodo primario se genera a partir de procesos como sedimentación, precipitación química entre otros y se caracteriza por su alto contenido de agua (entre 93 y 97 %). El lodo secundario, se genera en procesos de tratamiento biológico en donde parte de la materia orgánica es absorbida y convertida en biomasa microbiana, conocida como biosólido.

Para el tratamiento de estas corrientes se han identificado diferentes actividades destacándose, el espesamiento, deshidratación, estabilización y secado. El espesamiento y deshidratación se direccionan a la reducción de contenido de agua; a nivel industrial se utilizan equipos como centrifugadoras, filtros prensa, prensa rotatoria, geomembranas entre otros.

La estabilización comprende tratamientos destinados para controlar la degradación biológica, atracción de vectores y la patogenicidad. Se puede llevar a cabo de forma química, térmica y/o biológica. Sin embargo, en la actualidad la estabilización aeróbica y anaeróbica son las más utilizadas. En la estabilización aeróbica, lodos son aireados durante largos periodo de tiempo y los microorganismos están en fase respiratoria permitiendo que los materiales contenidos en las células sean oxidados logrando una reducción de materia orgánica degradada biológicamente.

En la estabilización anaeróbica los microorganismos se encuentran en ausencia de oxígeno, estos procesos trabajan en un rango de bacterias termofílicas. La descomposición biológica de la materia orgánica es transformada en metano, bióxido de carbono y el biosólido.

De acuerdo con el decreto 1287, de 2014 en Colombia el biosólido se define como el producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.

No son biosólidos las escorias y cenizas producto de la oxidación o reducción térmica de lodos, así como los residuos que se retiran de los equipos e instalaciones de la fase preliminar del tratamiento de aguas residuales, ni los provenientes de dragados o de limpieza de sumideros.

Actualmente, se ha identificado que los lodos pueden ser utilizado como materia prima y combustible en diferentes procesos industriales, fines agrícolas; destacándose áreas como: producción de biogás, pirolisis, gasificación, rellenos sanitarios, fertilizantes orgánicos, enmiendas del suelo, materiales de infraestructura y paisajismo entre otros. A continuación, se presentan algunas aplicaciones descritas en la literatura, en donde se indican recomendaciones para su uso.

INDUSTRIA DEL CEMENTO: El lodo de depuradora ha sido utilizado como combustible en la producción del Clinker, debido a su valor calorífico (10-20 MJ/kg), el cual depende del contenido de materia orgánica y humedad. En el horno el contenido orgánico de los lodos se destruye y los minerales se unirán al Clinker después del proceso de combustión. Esta estrategia, es considerada de alto impacto debido a que actualmente la industria del cemento representa cerca del 5% de las emisiones antropogénicas de CO₂ en todo el mundo y el uso de lodo combustible contribuye al ahorro de emisiones de combustibles fósiles (1)

INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION: En esta industria se ha evaluado la posibilidad utilizar mezcla de lodos para la fabricación de ladrillos, adoquines entre otros. Chih-Huang et al 2003, evaluaron las condiciones para fabricar ladrillos con lodos provenientes de planta de tratamiento de aguas residuales industriales, determinando que la proporción de lodo y la temperatura de cocción son dos factores determinantes en la calidad del ladrillo; en este estudio se estableció que el aumento del contenido de lodo da como resultado una disminución de la contracción del ladrillo, la absorción de agua y la fuerza compresiva, por otro lado, la pérdida de peso del ladrillo se atribuyó al contenido de materia en el lodo que se quema durante la cocción

por ultimo determinaron que hasta con un 20% de lodo añadido a los ladrillos y una temperatura de cocción de 900 a 1000°C se cumplía con los requisitos de las normas nacionales chinas.

Araujo et al 2018 presentan un estado del arte sobre la estrategia de integración de lodos como materia prima para la fabricación de ladrillos de arcilla; destacando que al sustituir la arena por lodos aluminosos en porcentajes superiores al 50% se afecta la resistencia de los ladrillos debido a la absorción de humedad.

Mohajerani et al 2019, presentan un estudio sobre la utilización de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de agua industrial en la fabricación de ladrillos de arcilla cocida. Se utilizaron mezclas que incluyen 10% -15%, 20% y 25% de biosólido. La prueba de resistencia a la compresión oscilo entre 12,04 y 35,5 MPa, el análisis de lixiviado mostro que entre el 43 y 99% se inmovilizaron dentro de los ladrillos cocidos, también se encontró que los lixiviados eran insignificantes

Molina et al 2021, evaluaron las condiciones óptimas para incluir el lodo aluminoso en la fabricación de materiales de construcción no estructurales como sustituto parcial de cemento; prepararon mezclas de lodo y concreto, utilizando proporciones de 5, 10, 15 y 20% de lodo, registrando variaciones significativas a la compresión; de esta forma se determinó que al utilizar entre el 15 y 20% de lodo se cumplían los límites establecidos para materiales de construcción no estructurales de acuerdo con la norma ASTM-C129.

USO AGRICOLA:

La enmienda agrícola es definida como un producto que es adicionado a suelo para la mejora de su condición física, química o biológica, para que adquiera nuevas condiciones para una nueva siembra (Girón, 2018).

El concepto de fertilidad es definido como la capacidad de este de suministrar los insumos necesarios para el desarrollo de los cultivos. Para mantener la fertilidad del suelo es necesario que se repongan nutrientes de la tierra para garantizar niveles de producción deseados (Girón, 2018).

La reposición de nutrientes se hace a partir de fertilizantes, y puede hacerse en forma natural, a partir de descomposición de materia orgánica; o de forma artificial, a partir de la inclusión de fertilizantes industriales. Estos fertilizantes están constituidos por mezcla química, natural o sintética utilizada para llenar de nutrientes el suelo y apoyar el crecimiento vegetal favoreciendo niveles productivos deseados en los cultivos (Piedrahíta, 2009).

Bajo este marco, las enmiendas son prácticas y técnicas agronómicas que son empleadas para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, con el fin de obtener mayores rendimientos en los cultivos y evitar inconvenientes en los sistemas productivos agrícolas. La importancia de los fertilizantes y de las enmiendas radica en el gran aporte que estos brindan en la producción rural en diversos sectores, sin su contribución, sería muy difícil garantizar una adecuada disponibilidad de nutrientes y se generaría una continua degeneración de los suelos que el empleo de cultivos mixtos no podría solucionar (FAO, 2002). De tal forma, las enmiendas agrícolas son materiales capaces de provocar cambios en componentes del suelo en las siguientes formas:

Mejoradores de Condiciones Físicas y Biológicas. Este tipo de productos usados en la proporción adecuada pueden mejorar las condiciones de estructura del suelo, porosidad y almacenamiento de agua, entre otros. Generalmente, los productos más empleados son aquellos orgánicos (residuos vegetales, estiércoles, compost, etc.), si son utilizados en grandes cantidades,

Correctores de Acidez. También, apoyan la generación de condiciones corrigiendo la acidez al reaccionar con el agua del suelo, lo que libera aniones básicos OH, provocando un

aumento en el aumento del pH (reducción de la acidez). Como consecuencia de ello, aumenta la actividad biológica y tiende a mejorar la estructura del suelo, así como a mejorar la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes; entre los materiales utilizados para corregir las condiciones de bajo pH en el suelo se tiene (Girón, 2018):

-Cal Agrícola: Piedra caliza molida que es usada para mejorar el pH del suelo. Esta cal puede estar contaminada con tierra. De tal forma, el contenido de carbonato (CaCO_3) no debería ser menor del 75%.

-Cal Dolomítica. Roca molida, con alto contenido en carbonato de calcio y magnesio. Su distribución varía notoriamente dependiendo de la fuente (mina y tipo de roca). Su reacción en el suelo es relativamente lenta (>60 días), pero su efecto generalmente es prolongado (3-5 años).

-Cal Hidratada. Es la piedra caliza quemada, a la cual se le ha agregado agua para que se desintegre en partículas finas. Es usada para subir el pH del suelo.

Requerimientos Nutricionales del Suelo. De acuerdo con la FAO (2002), las plantas necesitan ciertos requerimientos para sobrevivir. Dentro de estos requerimientos existen dieciséis elementos esenciales para el crecimiento de casi todas las plantas y éstos provienen del aire y/o del suelo. La necesidad de los nutrientes en mayor o menor medida permite clasificarlos en macronutrientes y micronutrientes.

Macronutrientes. Estos se dividen en nutrientes primarios y secundarios. Debido a que se necesitan en grandes cantidades deben ser aplicados si el suelo es deficiente en alguno de ellos. Ya que, los suelos pueden ser naturalmente deficientes en nutrientes o por su trajinar a través de los años y cultivos. Dentro de los principales macronutrientes para el crecimiento de las plantas, se encuentran los nutrientes primarios como el nitrógeno, fósforo y potasio. Por otro lado, los nutrientes secundarios son el magnesio, azufre y calcio (FAO, 2002).

Micronutrientes. A diferencia de los macronutrientes estos son requeridos por las plantas solo en pequeñas cantidades. Algunos de los micronutrientes o microelementos son el hierro, manganeso, zinc, el cobre, el molibdeno, el cloro y el boro (FAO, 2002).

Generalmente los lodos son ricos en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y otros macros y microelementos, lo que los convierte en una materia prima útil para la agricultura.

Las características físicas, químicas y biológicas del lodo, juegan un papel importante cuando éstos se aplican al suelo. Las características físicas importantes son el contenido de sólidos y el contenido de materia orgánica. Lodos con bajo contenido de sólidos generalmente se inyectan en el suelo para prevenir vectores y brindar mejor estética, y los lodos con alto contenido de sólidos se esparcen en la superficie y posteriormente se introducen en el suelo. La materia orgánica es un componente importante de los biosólidos; en suelos arenosos la materia orgánica aumenta la capacidad de retención de agua, reduce la densidad aparente del suelo y aumenta la capacidad de intercambio catiónico.

Las características químicas importantes son: pH, macro y micronutrientes. El PH debe estar entre 7-8, y debe aportar macronutrientes como nitrógeno, fosforo y potasio. Los micronutrientes como el boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, níquel y zinc. En cuanto a la parte biológica, es necesario evitar o restringir la aplicación al suelo de lodos con presencia de patógenos los cuales sobreviven a los diferentes procesos de tratamiento de agua.

Paisajismo: El lodo eventualmente se secará y se convertirá en parte de la tierra. Esto lo hace excelente para el paisajismo en lugar de obtener tierra de otros lugares.

En este documento, se presentan los resultados obtenidos al evaluar alternativas para la valorización de la corriente efluente denominada lodos provenientes del proceso de clarificación

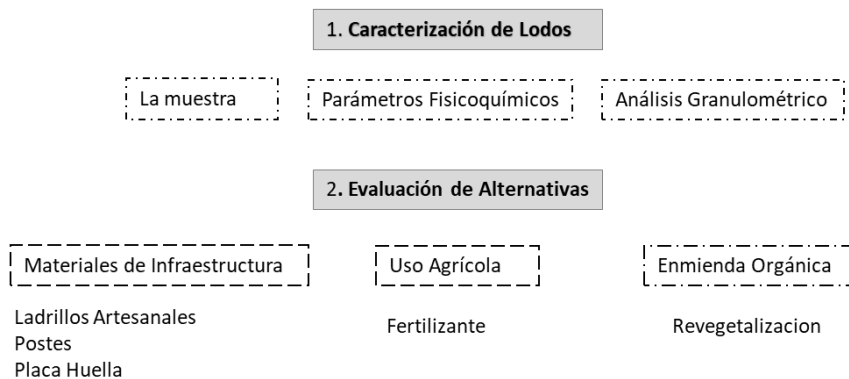
en la Unidad 2900, del departamento de Servicios Industriales Balance, de la Refinería de Ecopetrol-Barrancabermeja

4. Metodología

Las etapas metodológicas que se siguieron se presentan en la figura 10.

Figura 10

Diseño metodológico

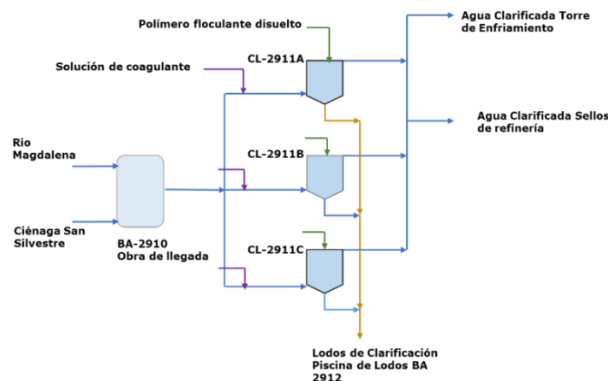


4.1 Caracterización de Lodos

4.1.1 La muestra: El lodo, proviene del proceso de clarificación que se lleva a cabo en la Unidad de Servicios Industriales Balance, en la Refinería de Ecopetrol- Colombia, en donde se busca obtener agua para fines industriales.

Figura 11

Proceso de clarificación U2900



4.1.2 Parámetros Físicoquímicos evaluados: La caracterización se llevó a cabo teniendo en cuenta parámetros físicoquímicos como conductividad, ph, humedad, densidad etc, concentración de nutrientes como nitrógeno, fosforo y potasio y contenido de metales como manganeso, zinc y cobre, entre otros.

4.1.3 Análisis Granulométrico: El análisis se llevó a cabo con una muestra de lodo de 660g, se pasó la muestra por las siguientes mallas: 3/8", 4", 8", 16", 30", #50, #100, #200, determinando la cantidad retenida en cada malla para sacar el porcentaje que pasa por cada una y compararla con los límites máximos y mínimos que establece la normal NTC 174.

4.2. Evaluación de Alternativas

4.2.1 Materiales para Infraestructura: Como materiales para infraestructura se fabricaron ladrillos artesanales y estructurales, postes de concreto y placa huella; a continuación, se describe el proceso para cada uno.

4.2.1.1. Fabricación de Ladrillos: Se elaboraron cuatro muestras de ladrillos artesanales: y una muestra de bloque de cemento, con dimensiones de 30X14X7cm y 21X7X7cm respectivamente. La proporción de mezcla y tiempo de cocción se presenta en la tabla 3 y 4.

Tabla 3

Composición para ladrillos no estructurales

Arena (%m/m)	Tamo (%m/m)	Lodo (%m/m)	Días de Cocción
L1 40	20	40	1
L2 50	20	30	3
L3 60	20	20	1
L4 80	00	20	3

Tabla 4*Composición ladrillos estructurales*

Arena (%m/m)	Cemento (%m/m)	Lodo (%m/m)	Días de Secado*
60	20	20	7 días

*Secado natural

El proceso para la elaboración de los ladrillos se llevó a cabo, en 3 actividades secuenciales:

Preparación de la mezcla: En esta etapa primero se realizó el tamizado individual de arena, tamo y cemento. Seguidamente, se llevó a cabo la mezcla en las proporciones definidas en las tablas 3 y 4. Es importante resaltar que esta mezcla no requirió adición de agua debido a la humedad del lodo.

Moldeado: La mezcla, se llevó a un molde de madera el cual tiene las dimensiones específicas del tamaño requerido, después se compactó con el propósito de retirar el aire y así evitar deformaciones y puntos hueco.

Secado y Cocción: Para el ladrillo no estructural, la mezcla moldeada se deja por ocho (8) días al aire libre y luego se llevan al horno a una temperatura de 1000°C, para garantizar consistencia y resistencia. Una vez horneados, se dejan en enfriamiento 2 días. El ladrillo estructural se dejó por ocho días al aire libre sin cocción.

Ensayo de resistencia a la Compresión: Una vez los ladrillos cumplieron su ciclo de fabricación, se midió el módulo de falla (ruptura), la resistencia a la compresión y la absorción del agua de acuerdo con lo descrito en la norma colombiana NTC 4017 y los resultados fueron evaluados de acuerdo con la norma NTC 4205.

4.2.1.2 Elaboración de Postes: Para la fabricación de la columna denominada poste se propuso tres tipos de mezcla tal como se muestra en la tabla 3, utilizando cemento, cascajillo, triturado y agua.

Tabla 5*Composición de mezcla para postes*

Muestra	Lodo (%)	Cemento (%)	Cascajillo (%)	Triturado (%)	Agua (%)
M1	0	12,36	31,26	51,55	4,83
M2	16,55	12,03	16,55	50,18	4,7
M3	31,26	12,36	0	51,55	4,83

Las etapas para la elaboración se enuncian a continuación:

Fabricación de canasta o estructura: La fabricación de la estructura depende del tipo de poste y varía según la longitud y la resistencia. Para postes de cerca se utiliza varilla corruga, se forman aros o triángulos en la maquina especial para doblado de varilla y luego estos aros o triángulos se unen a tres varillas largas utilizando alambre de quemado, de esta forma se obtiene la estructura metálica que va a ir al interior del poste con el fin de aumentar su resistencia y durabilidad.

Preparación de la Mezcla: Para realizar el proceso de mezclado se utiliza un trompo eléctrico al cual se le agrega todas las materias primas solidas (triturado, cascajillo, lodo y cemento) y se realiza homogenización de estas, a continuación, se agrega poco a poco el agua hasta conseguir la consistencia deseada y se traslada utilizando baldes a la siguiente etapa del proceso.

Moldeado y Secado: Para el moldeado de los postes se necesita usar formaletas metálicas, las cuales deben estar limpias y secas, adicionalmente se aplica aceite para formar una película que favorezca el desmolde de los postes a la hora de retirarlos. Luego se adiciona la mezcla y con golpes por la parte externa se asegura de que quede uniforme, se introduce la estructura metálica y se termina de llenar la formaleta con la mezcla. El proceso de secado se realiza dejando las formaletas al aire libre por 5 días y luego se desmolda para continuar el secado por 10 días antes de realizar alguna venta.

4.1.1.3 Placa huella Peatonal: Para la fabricación de placa huellas peatonales de concreto se definen tres etapas en su proceso de fabricación:

Fabricación de canasta o estructura: Para la fabricación de la estructura metálica se utiliza varilla corruga, se posicionan en una superficie plana dando forma de malla y se realizan amarres en cada unión utilizando alambre para quemado, de esta forma se obtiene la estructura metálica que va a ir al interior de las placas huellas peatonales con el fin de aumentar su resistencia y durabilidad.

Preparación de la Mezcla: el proceso de mezclado se realiza de forma manual en dos etapas, la primera etapa se mezclan las materias primas solidas (triturado, cascajillo y cemento) y se realiza homogenización de estas, la segunda etapa se mezcla el lodo con el agua y a continuación se agrega a la mezcla sólida, con ayuda de pala se realiza la integración de todas las materias primas hasta conseguir la contextura adecuada.

Moldeado y Secado: Para el moldeado de la placa huella se ubica un costal o bolsa plástica en una superficie plana, se debe asegurar que se encuentre limpio y seco, se aplica una película de aceite para ayudar a desmoldar la placa huella, a continuación se coloca una formaleta de madera con las medidas requeridas y se vierte parte de la mezcla al interior de la formalete, con ayuda de palustre se asegura que no quede porosidad, se ubica la estructura o malla metálica y se vierte el resto de mezcla en el molde o formaleta, el desmoldado se puede realizar inmediatamente, la placa huella se deja secar a temperatura ambiente por 3 días antes de moverla o transportarla.

Tabla 6*Composición de mezcla para placa huella peatonal*

Muestra	Lodo (%)	Cemento (%)	Cascajillo (%)	Triturado (%)	Agua (%)
M1	15	8	45	30	2
M2	6	7	42	24	21

4.2.2. Uso Agrícola

En este contexto, el lodo fue utilizado como enmienda orgánica, en la germinación de pimentón, las proporciones utilizadas se presentan en la tabla 7, la valoración se realizó de forma cualitativa. La fecha de germinación fue de 04 de marzo de 2022.

Tabla 7*Mezcla Fertilizante comercial y lodo*

Muestra	Lodo (%)	Fertilizante Comercial (%)
Blanco	0	100
M1	100	0
M2	50	50
M3	40	60
M4	30	70

5. Resultados**5.1 Caracterización de Lodos**

Se realizó la caracterización del material con el fin de conocer su composición química y mineralógica, estados de consistencia (sólido, semisólido, plástico y líquido), entre otras características, para direccionar su aplicabilidad dentro del marco de la circularidad.

5.1.1 Identificación de parámetros fisicoquímicos y metales: En la tabla 8, se presenta la caracterización realizada a los lodos en donde se analizaron parámetros fisicoquímicos y contenido de metales.

Tabla 8

Caracterización de lodos U2900

Características	Unidades	Resultados
Humedad	%	54
pH	Unidad	6,1
Conductividad	Ms/cm	0,284
Humedad a 105 GR C	%	7,73
Corrosividad	NA	Negativo
Relación de adsorción de Sodio (RAS)	NA	0,57
Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g	15,3
CATIONES INTERCAMBIABLES		
Calcio	meq/100g	6,62
Magnesio	meq/100g	0,174
Potasio	meq/100g	0,284
Sodio	meq/100g	0,193
Porcentaje de sodio intercambiable	%	1,26
ANÁLISIS DE METALES		
Hierro	mg/kg	37525
Sodio	mg/kg	172
Calcio	mg/kg	2879
Potasio	mg/kg	1454
Cobre	mg/kg	25.8
Cadmio	mg/kg	1,74
Selenio	mg/kg	<1,0
Arsénico	mg/kg	13,2
Zinc	mg/kg	190
Cromo	mg/kg	29,5
Aluminio	mg/kg	26770
Sodio	mg/kg	172
Plomo	mg/kg	10,9
Berilio	mg/kg	<1.0
Molibdeno	mg/kg	7,37
Plata	mg/Kg	1,99
Cobalto	mg/kg	8,18
Magnesio	mg/kg	2521
Níquel	mg/kg	25,8
Silicio	mg/kg	746
Manganeso	mg/kg	34

Nota. Adaptado de Laboratorio de análisis de ICP en Bucaramanga.

El *pH*, del lodo es neutro y se encuentra en el rango óptimo para aplicación en suelos agrícolas ya que favorece la absorción de los nutrientes del suelo por las plantas (ref); con respecto a la

conductividad el valor reportado se puede considerar como alto y favorece la absorción de nutrientes, por parte de las plantas.

En la misma tabla 8, se presenta los resultados obtenidos para la identificación y cuantificación de metales, y se comparan con los valores máximos permisibles que rigen en Colombia mediante el decreto 1287 DE 2014, el cual de acuerdo con la concentración de estos metales y análisis microbiológicos clasifica los biosólidos en Tipo A y B.

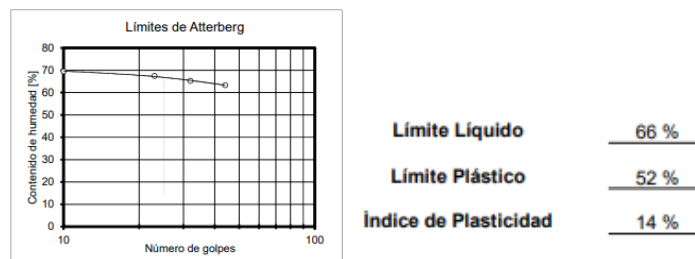
De acuerdo con el decreto, los biosólidos tipo A pueden utilizarse en zonas verdes, plantas ornamentales y arborización; agricultura entre otros. Mientras que el biosólido tipo B, se puede aplicar en agricultura directamente al suelo, plantaciones forestales, recuperación de suelos degradados, como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos, para remediación de suelos contaminados, como insumos de materiales de construcción; estabilización de taludes, rellenos sanitarios, revegetalización y paisajismo de escombreras y procesos de valorización energética.

5.1.2 Límites de Atterberg.

Mediante el ensayo de laboratorio de límites Atterberg se determinó las propiedades plásticas del lodo, importantes a la hora del moldeo de la pieza. En la Figura 12, se presenta el análisis de laboratorio, en donde se puede determinar el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad.

Figura 12

Límites de Atterberg

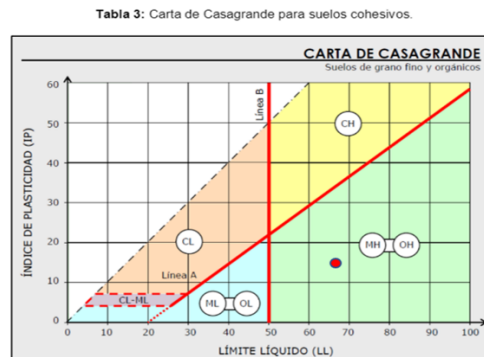


En los suelos finos o arcillosos el factor de humedad es esencial para el comportamiento de los elementos estructurales. El suelo puede encontrarse en cuatro (4) estados distintos de composición: sólido, semisólido, plástico, líquido (FAO, s.f.). La distinción de estos estados del material es a partir de la cantidad de agua que permite la absorción del particulado fino del material en tanto su cohesión y consistencia propia del suelo ante los esfuerzos exteriores.

Comprendiendo el concepto de límite como “línea” de funcionalidad cualitativa y cuantitativa simultánea, pues a cierta cantidad de agua el elemento puede entonces comprenderse como un estado cualitativo de la materia o como otro estado cualitativo de la materia.

Figura 13

Diagrama de Casagrande



Fuente: Manual De carreteras. Volumen II. Bañón L. Beviá J (2000).

Nota. Tomado de: American Society for Testing and Materials, ASTM D4318-17 Standard Test for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 2018.

El ensayo de límites de consistencia es eminentemente práctico en laboratorio mediante la copa de Casagrande en donde se obtienen los tres puntos para los límites del elemento, de acuerdo con estos tres puntos se pudo concluir que se tiene un tipo de suelo limoso de alta plasticidad.

5.1.3 Análisis Granulométrico: Se determinó la granulometría con muestra de lodo de 660 gramos tal como se muestra en la tabla 8, se pasó la muestra por las siguientes mallas: 3/8”, 4”, 8”, 16”, 30”, #50, #100, #200.

Tabla 9

Análisis granulométrico

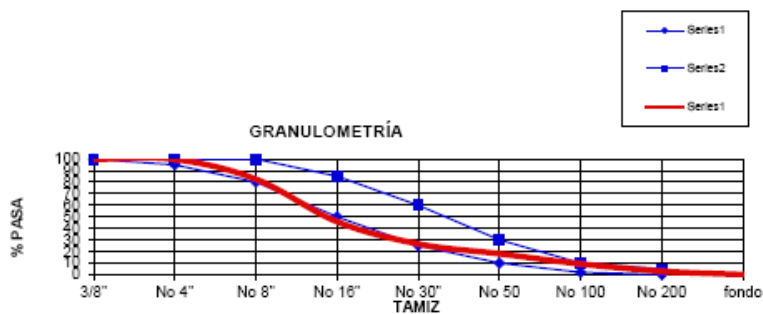
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RET (g)	% RETENIDO	% RET TOTAL ACUM	% PASA TOTAL
3/8"	9,510	0	0,00%	0,00%	100,00%
No 4"	4,760	2	0,30%	0,30%	99,70%
No 8"	2,380	113	17,12%	17,42%	82,58%
No 16"	1,190	243	36,82%	54,24%	45,76%
No 30"	0,600	127	19,24%	73,48%	26,52%
No 50	0,300	56	8,48%	81,97%	18,03%
No 100	0,150	58	8,79%	90,76%	9,24%
No 200	0,075	42	6,36%	97,12%	2,88%
FONDO		18	2,73%		
TOTAL			99,85%		

M. F. Perdida	3,18%	100,00%	NORMA NTC 174 ESPECIFICACIONES PARA LOS AGREGADOS PARA LOS CONCRETOS
---------------	-------	---------	--

Los resultados de la granulometría demostraron que el lodo cumple con los estándares en la norma NTC 174, la cual determina los límites máximos y mínimos del porcentaje que pasa, y con los que se debe cumplir el agregado fino.

Figura 14

Gráfica de la granulometría del lodo



Nota. Adaptado de Análisis de laboratorio ICP, Bucaramanga.

5.2 Factibilidad Técnica de Aprovechamiento de Lodos

Conforme a la caracterización y análisis de límites de Atterberg realizado a los lodos de clarificación de la U2900, estos pueden ser aprovechados en uso de materiales para construcción (ladrillos, postes de concreto, placa huellas, núcleos de cemento, resane de paredes, etc.), agregado de abono, alfarería, remediación y reacondicionador de suelos, agregado para fabricación de cemento, entre otros. En este estudio, se analizó el uso en la fabricación de ladrillos, como enmienda agrícola en la germinación de semillas, obras de alfarería y en el proceso de remediación y reacondicionamiento de suelos específicamente.

5.2.1 Aprovechamiento en Uso de Materiales para la Construcción.

5.2.2.1 Elaboración de ladrillos: En la figura 16, se muestra los ladrillos artesanales y de concreto elaborados con las diferentes mezclas de lodos, los cuales tienen una estructura homogénea con un color uniforme, sin identificación de grietas.

Figura 15

Muestras de ladrillos con diferentes proporciones de lodo



En la tabla 10, se presenta los resultados obtenidos para la medición de resistencia a la compresión en las muestras de ladrillo artesanal y un blanco el cual es un ladrillo fabricado con tamo, arena y agua.

Tabla 10*Resistencia para las muestras de ladrillos con tamo*

Muestra	Área cm ²	Velocidad de carga (MPa/s)	Resistencia		Absorción de agua %
			Kgf/cm ²	MPa	
Blanco	120	20-40	51	5	13,92
Mezcla Lodo (L1)	120	20-40	7	0,67	32,4
Mezcla Lodo (L2)	120	20-40	13	1.25	-
Mezcla Lodo (L3)	120	20-40	13	1.25	-
Mezcla Lodo (L4)	120	20-40	14	1,4	-

Según la norma técnica colombiana NTC 4017, el valor mínimo de resistencia a la compresión para este tipo de materiales es de 30 kg/cm² o 3 MPa. El elemento L1 está alrededor de los 7 kg/cm² y el elemento L2 está alrededor de los 13 kg/cm² lo que indica que debe haber una mejoría en los porcentajes de composición de los elementos que permitan alcanzar una mayor densidad y aumentar así la resistencia del material.

Figura 16*Resultados de resistencia a la compresión y modo de falla de muestras L3 y L4.*

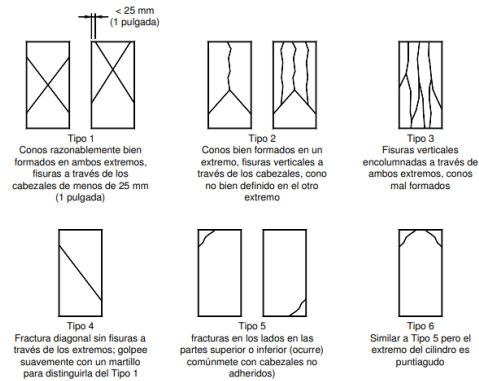
FECHA		CONTRATISTA		PROYECTO											NORMA	
22jun2022		DOMINGO ESCALANTE		ECONOMIA CIRCULAR											NTC 4017	
															FORMATO	F-AL-031
Nº CILINDRO	LOCALIZACION	ELEMENTO FUNDIDO	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DÍAS DE CURADO	RESISTENCIA (kN)	RESISTENCIA (Kgf)	ESFUERZO (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA (P.S.I)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (P.S.I)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE MEZCLADO	MARCA CEMENTO
L1	N/A	LADRILLO CON ARENA Y LODO	N/A	N/A	22-jun-22	N/A	11,7	1189,0	10	141	N.A	N.A	141	2	N/A	N/A
L2	N/A	LADRILLO CON ARENA, LODO Y TAMO	N/A	N/A	22-jun-22	N/A	15,7	1598,9	13	189	N.A	N.A	189	5	N/A	N/A

El tipo de falla o fractura se debe entender como importancia en la funcionalidad en sitio del elemento ya que la falla es por donde los esfuerzos se van a disipar haciendo que el elemento se siga sobre deformando y fallando por el lugar o sitio en donde fue deformado o fallado. En

este caso está en una funcionalidad vertical a la compresión como trabaja un elemento estructural de columna. La falla es la expresión negativa de la resistencia del material. Nos hace reconocer por donde y en qué sentido están trasportándose la energía vectorial a través del elemento como son las fuerzas transmisivas de una situación o condición material de esfuerzos.

Figura 17

Tipos de falla



Nota. Tomado de Esquema de los modelos de fractura típicos, NTC 673, ICONTEC, 2010.

La falla L3 es de tipo 2: notamos que la mitad inferior del elemento de mampostería se encuentra en buenas condiciones mientras la mitad superior falla. La fractura es interior, en líneas de verticales lo que indica que la composición del elemento es falta de cohesión entre sus partículas haciendo demostrar las líneas de esfuerzos de compresión a lo largo del material. La falla L4 es de tipo 5 que demuestra un núcleo compacto y cohesivo que trasmite los esfuerzos a lo largo de sí sin fallar. Aunque la falla más recomendable para un esfuerzo vertical compresivo sea el tipo 6, el tipo 5 sigue siendo la segunda más recomendable por un elemento y el resultado cuantitativo también es expresión de la efectividad de la trasmisión de fuerzas. Es sustancial que la falla tipo 5 se observe una falla inferior que no es preferible a la falla superior vertical de compresión ya que tener una falla inferior en un elemento que trabaje vertical indica una expresión de falta de resistencia en la

base o desde donde el elemento se está sosteniendo como tal. Ver análisis de laboratorio en apéndice D,E,F, G.

Vaca & Garcia 2013, analizaron las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y absorción de humedad de ladrillos fabricados con arcilla y lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se concluyó que en el rango entre 5 y 10% de lodo el producto cumple con los estándares de calidad exigidos en Colombia para la resistencia y con respecto a la absorción de humedad se identificó que existe un incremento proporcional con la cantidad de lodo añadida.

Peralta, 2018 realizó una investigación con respecto al reemplazo parcial de la arcilla por lodos aluminosos provenientes de una planta de potabilización de agua en el Ecuador, obteniendo que existe la viabilidad al incluir un porcentaje del 5% de lodos, sin embargo, recomienda establecer una estrategia para reducir el contenido de humedad de estos.

Camargo & Yambai, 2020, elaboraron ladrillos artesanales con diferentes porcentajes de lodo húmedo y lodo seco proveniente de una planta de tratamiento de agua residual en Quito; de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y absorción de agua solo la muestra con 5% de lodo residual seco cumple con lo requerido por la norma con un valor mínimo, las demás composiciones no alcanzaron el valor adecuado de resistencia.

En la tabla 11, se presentan los resultados para bloques de concreto. De acuerdo con la norma NTC 4205, la resistencia mínima debe ser de 20 MPa, lo que significa que el ladrillo obtenido con la formulación planteada puede ser empleado en la construcción y también puede ser usado como revestimiento de fachadas ya que la resistencia mínima para esto es de 14MPa. Este proceso resulta más económico y amigable con el medio ambiente por no requerir quema para la cohesión interna de los materiales. Ver análisis de laboratorio en apéndice I.

Tabla 11

Medición de resistencia para la muestra de bloques de concreto

MUESTRA	AREA cm ²	VELOCIDAD DE CARGA (MPa/s)	RESISTENCIA		Tipo de Fractura
			Kg/cm ²	MPa	
C1	120	20-40	238	23.33	2

5.2.2.2 Elaboración de Postes: Para la elaboración de postes el lodo sustituyó parcialmente el cascajillo; en la figura 17, se presenta las muestras M1 y M2, elaboradas con 0 y 15% de lodo respectivamente, las cuales tienen dimensiones de longitud, ancho y profundidad de 180, 15 y 15 cm. La muestra con la adición de lodo presenta un color homogéneo, sin grietas. Es importante resaltar que la muestra M3 no pudo ser retirada del molde debido a su consistencia, esto se atribuye a que no se adicione cascajillo el cual aporta resistencia al material.

Figura 18

M1 con 0 de lodo; M2 con 15% de lodo



Los resultados a las pruebas de resistencia a la compresión se presentan en la tabla 12, se puede observar que cumple con los estándares de resistencia propuestos para este tipo de mezclas en la norma técnica colombiana.

Tabla 12

Pruebas de resistencia a la compresión para postes concreto

Muestra	Área	Velocidad de Carga (Mpa/s)	Resistencia		Tipo de Fractura
			Kg/cm ²	MPa	
Blanco			149	14,61	2
Mezcla lodo	182.41	20-40	101	10	6

El tiempo de secado fue de una semana siendo necesario hidratar cada mañana para disminuir probabilidad de fractura mecánica al momento de perforar su cuerpo para su uso. Ver análisis de laboratorio en apéndice anexo. Ver análisis de laboratorio en apéndice J.

5.2.2.3 Placa huella Peatonal: En la figura 18, se presenta la placa huella peatonal elaborada incluyendo lodo. Este material tiene medidas de 150*45*7cm, largo, ancho y profundo respectivamente. Su dosificación se realizó teniendo en cuenta la proporción de mezcla sugerida para 1500 PSI.

Figura 19

Placa huella realizada al 6,05% (dos primeras) y 15.05% (dos últimas)



El tiempo de secado fue de una semana siendo necesario hidratar cada mañana para disminuir probabilidad de fractura mecánica. Ver análisis de laboratorio en apéndice H.

5.2.2.4 Uso en la fabricación de materiales tipo alfarería. Se realizó prueba del material de lodos de clarificación en la fabricación de materas de concreto, figuras de hongos y flamencos, usando las siguientes formulaciones en unidad de porcentaje:

Tabla 13

Formulación para uso en fabricación de obras de alfarería

Muestra	Lodo	Cemento	Cascajillo	Agua
Hongos y flamenco	14,29	28,57	42,18	14,29
Materas (cónica y cajón)	11,76	17,65	47,06	23,53

Figura 20

Obras de alfarería realizadas con lodo de clarificación



No existe normativa que regule resistencia mecánica mínima a la compresión en Colombia, por tratarse de elementos netamente decorativos con alta fragilidad. El tiempo de secado fue de una semana siendo necesario hidratar cada mañana para disminuir probabilidad de fractura mecánica

5.2.2.5 Aprovechamiento como Enmienda Agrícola. En la figura 7, se presenta el registro del comportamiento de las plantas con las diferentes proporciones de lodos. Se puede distinguir que en los límites de intervalo se presenta menor (0 y 100%) el menor crecimiento debido a que si bien la aplicación de lodo mejora las fitopropiedades del suelo es necesario complementar con fertilizantes que equilibren las concentraciones de elementos como el potasio (K), el cual tiene concentraciones bajas dentro del lodo.

Figura 21

Proceso de desarrollo de muestras vegetales (pimentón a 70 msnm)



Por otro lado, al aplicar estos lodos se está minimizando, en un porcentaje elevado, el empleo de fertilizantes de origen químico, esto supone una reducción paralela en el aporte de nitrógeno mineral más fácilmente disponible y lixiviable, disminuyendo el riesgo de contaminación por nitratos en el perfil del suelo. Esto es posible debido a que el aporte de nitrógeno que se realiza aplicando lodo de depuradora es de origen orgánico, el cual se irá liberando de manera progresiva a medida que se vaya mineralizando.

Resultados fisicoquímicos de muestra de lodos de clarificación de U2900 vs el requerimiento nutricional de un suelo. A continuación, se muestran los resultados al comparar una muestra de lodos de clarificación de U2900 con el requerimiento nutricional de un suelo:

Tabla 14*Resultados lodos de clarificación U2900 vs requerimiento nutricional de un suelo*

Parámetro	Resultado	Interpretación	Rango ideal
pH	6,56	Ideal	6,0 a 7,5
Conductividad (uS/cm)	2,54	Alto	0,01-0,45
Nitrógeno total (%N)	0,396	Alto	0,1724-0,258
Fósforo (%P ₂ O ₅)	1,023	Alto	0,5-1,0
Potasio (K ₂ O)	0,078	Bajo	0,3-3,0
Carbono orgánico total (%C)	2,78	Alto	1,16-1,7
Sodio (%Na)	0,021	Medio	0,01-0,40
Humedad (%)	40,68	Ideal	45,0-60,0
Manganeso (mg Mn/kg)	124,402	Muy alto	15,0-30,0
Cobre (mg Cu/kg)	11,531	Muy alto	1,5-3,0
Zinc (mg Zn/kg)	28,125	Muy alto	3,0-6,0
Hierro (mg Fe/kg)	437,03	Muy alto	2,5-5,0
Azufre (%S)	0,498	Medio	0,02-2,0
Densidad (g/cm ₃)	1,102	Ideal	1,0
Boro (mg B/kg)	2,02	Ideal	0,5-2,0
Silicio (mg SiO ₂ /kg)	64,4	Alto	20
Cenizas (%)	58,14	Ideal	60

El biosólido es muy rico en micronutrientes y macronutrientes, con un déficit en Potasio, el cual se podrá complementar con la adición de un fertilizante rico en este componente para alcanzar un estado ideal como enmienda agrícola.

5.3 Análisis Factibilidad Económica

5.3.1 Factibilidad Económica de Deshidratación de Lodos y Reuso del Agua recuperada.

El análisis económico comprende la inversión inicial y el costo del tratamiento para el proceso de deshidratación propuesto para la U2900, requerimiento previo para uso del biosólido. En segundo lugar, comprende el beneficio potencial que se obtendrá al contar con el proceso de deshidratación en productivo y la comercialización del lodo de clarificación para Ecopetrol S.A.

Tabla 15*Inversión inicial, operación y beneficios de sistema de deshidratación de lodos.*

INVERSION INICIAL ALTERNATIVA DE USO DE LODOS					
Item	Descripción	Costo Unitario	Unidad	Cantidad	Costo Anual
1	Puesta en marcha del sistema del sistema de geomebranas	\$ -		1	\$ 446.000.000,00
2	Costos de caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodos de clarificación - con ICP o algún otro laboratorio externo.	\$ -		1	\$ 10.000.000,00
3	Costos de pruebas de viabilidad técnica	\$ -		1	\$ 20.000.000,00
4	Abandono seguro del área de las piscinas de deshidratación	\$ 96.636.040,00		12	\$ 1.159.632.480,00
TOTAL DE COSTOS					\$ 1.635.632.480,00

COSTO ANUAL ALTERNATIVAS USO DE LODOS					
Item	Descripción	Costo Unitario	Unidad	Cantidad	Costo Anual
1	Operación y mantenimiento del sistema de geomebranas	\$ 167.862.280,00	mes	12	\$ 2.014.347.360,00
TOTAL DE COSTOS					\$ 2.014.347.360,00

BENEFICIOS POTENCIALES					
Item	Descripción	Costo Unitario	Unidad	Cantidad	Costo Anual
1	Incumplimiento de la resolución 631 de 2015 (potencial)	\$ 5.000,00	smlv	1	\$ 5.000.000.000,00
2	Lodo de clarificación	\$ 20.000,00	m3	4000	\$ 80.000.000,00
2	Mantenimiento de piscinas	\$ 100.000.000,00	mes	12	\$ 1.200.000.000,00
3	Reduccion de huella hidrica menor captacion (150 gpm)	\$ 1.600,00	kgal	78840	\$ 126.144.000,00
6	Aumento de huella de carbono por emisión de CO2 (1 ton/17000)	\$ 200.000,00	Tn	12	\$ 2.400.000,00
7	Impacto de la huella hidrica (captación, escasez y degradación)	\$ 1.944.000,00	m3	12	\$ 23.328.000,00
8	Costo por mantenimiento (Bombas 2912A/B)	\$ 60.000.000,00	año	2	\$ 120.000.000,00
BENEFICIOS POTENCIALES					\$ 6.551.872.000,00

5.3.2 Análisis de factibilidad Económica de reuso de lodos

Tabla 16

Uso de lodo de clarificación en producción potencial

Uso de lodo de clarificación en producción potencial		
Producto	Ton/año	Cantidad
Ladrillos	178,19	328500,00
Postes de cercas	387,89	36500,00
Placa huellas	336,71	36500,00
Bioremediación de terrenos	4428	257
Total a utilizar	5330,79	

5.3.3 Beneficio económico por sector productivo donde se aplique el uso de los lodos de clarificación como materia prima sustituyente

La tabla N. 17 muestra los beneficios esperados para los terceros o empresas que incursionen en el reuso de los lodos según el objeto de construcción que defina utilizar, siendo la fabricación de placa huellas quien arroja un mejor diferencial, seguido de la fabricación de postes para cercas, y por último lugar, la fabricación de ladrillos, para el caso de los materiales de construcción analizados.

Tabla 17

Beneficio Potencial

Producto	Formulación base	Formulación con lodo	Diferencia costo producción	Producción anual potencial	Valor producción anual fórmula base	Valor producción anual fórmula con lodo	Potencial de ahorro
Valor fabricación de un poste	\$ 42.952,50	\$ 42.352,50	\$ 600,00	36500	\$ 1.567.766.250,00	\$ 1.545.866.250,00	\$ 21.900.000,00
Valor fabricación de un ladrillo	\$ 750,00	\$ 700,00	\$ 50,00	328500	\$ 246.375.000,00	\$ 229.950.000,00	\$ 16.425.000,00
Valor fabricación de una placa huella	\$ 23.721,25	\$ 22.645,00	\$ 1.076,25	36500	\$ 865.825.625,00	\$ 826.542.500,00	\$ 39.283.125,00
Valor de enmienda para bioremediación de terrenos	\$ 1.000.000,00	\$ 280.000,00	\$ 720.000,00	257	\$ 257.000.000,00	\$ 71.960.000,00	\$ 185.040.000,00
BENEFICIO POTENCIAL					\$ 2.936.966.875,00	\$ 2.674.318.750,00	\$ 262.648.125,00

Conclusiones

- Los lodos de clarificación de la U2900 pueden ser utilizados en la fabricación de materiales de construcción, tales como ladrillos estructurales (en desarrollo de formulación) y no estructurales tipo artesanal, de concreto, placa huellas y postes de concreto para cercas.
- De acuerdo con la caracterización fisicoquímica del material denominado lodos de clarificación proveniente de la Unidad de Balance de la Refinería de Barrancabermeja se tiene que es un subproducto apto para usar como enmienda agrícola.
- Se propone darle uso en la fase de revegetalización y reconstitución paisajística de las zonas tratadas mediante las técnicas de fitorremediación estimulada y biorremediación mejorada por ECOPETROL S.A. siendo la opción más viable desde el punto de vista económico y de gestión ambiental.
- Los lodos de clarificación de la U2900 pueden ser utilizados en la fabricación de obras de alfarería tales como materas, gansos y hongos utilizables en servicios de jardinería y adorno.
- Se logra con esta alternativa dar un uso basado en economía circular ya que se utiliza un residuo de un proceso industrial en otro proceso en el que aporta valor y permite reducir costos al reemplazar a otros productos para fertilización mejorando integralmente la calidad del suelo y permitiendo su proceso de recuperación.
- Dado su alto contenido de micronutrientes y macronutrientes es ideal para la germinación y desarrollo de semillas en relación de mezcla entre 30 y 40% con el material de abono.

Referencias Bibliográficas

American Society for Testing and Materials ASTM. (2018). ASTM D4318-17 Standard Test for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L. (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: revisión bibliográfica. *Revista Agunkuyâa*, 8(1), 21–28.

<https://doi.org/10.33132/27114260.1231>

Barrenechea, A. (2004). Coagulación. En Lidia de Vargas (Ed.). *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual I: Teoría Tomo I*. Lima. (pp.153-224).

Bustillo, M. (2008). Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Los recursos minerales y los materiales de construcción, 16(3), 248-255. Obtenido de

<https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/164747/216752>

Centro de información técnico de la GRB.

CONSTRUMÁTICA (s.f.). Ladrillo. Disponible en:

https://www.construmatica.com/construpedia/index.php?title=Ladrillo&mobileaction=toggle_view_desktop

Decreto 1287 de 2014 [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia]. Por el cual se establecen los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamientos de aguas residuales municipales. 10 de julio de 2014.

Decreto 1594 de 1984 [Ministerio de Salud]. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el

Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. 26 de junio de 1984.

Decreto 2676 de 2000 [Ministerio del Medio Ambiente y Salud]. Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos hospitalarios y similares. 22 de diciembre de 2000.

ECOPETROL. (2020). Manual de Operación de U2900.

ECOPETROL. (2021). Norma para la Estrategia Ambiental. Numeral 5.5, pág. 13. Recuperado de <https://files.ecopetrol.com.co/web/esp/cargas/web/SosTECnibilidad/Ambiental/HSE-N-005%20Estrategia%20Ambiental.pdf>

FAO (s.f.) Aguas residuales. Disponible en:

Food and Agriculture Organization of the United Nations, [AQUASTAT Web Site](#)

FAO (s.f.) Consistencia del suelo. Disponible en:

https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). Los fertilizantes y su uso. Recuperado de <https://www.fao.org/documents/card/es/c/b0f8bfc5-4c95-54b0-80cd-96b810006037/>

Fuentes-Molina, Natalia, Cujia-Urrutia, Darlys N., & Robles-Julio, Carlos A.. (2021). Análisis de las relaciones lodo cemento como material de construcción no estructural. Información tecnológica, 32(6), 143-150. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000600143>

Girón J. (2018). Enmiendas de suelo en el cultivo de café. Investigación Fertilización. Centro de Investigaciones en Café de Anacafé –Cedicafé–Abril, 2018. Disponible en: <https://docplayer.es/75260812-Enmiendas-de-suelo-en-el-cultivo-de-cafe.html>

Guerrero, A. (2021). Ingeniería conceptual de deshidratación de lodos. Notas de Aula.

Lorenzo, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación.

ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XL (2),10-17. [fecha de Consulta 25 de Julio de 2022]. ISSN: 0138-6204. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

Mancebo, P. (2019). Valorización energética de RSU. 1-184. Obtenido de

<https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/34846/TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Martínez Sepúlveda, José Alejandro Contaminación y remediación de suelos en Colombia:

aplicación a la minería de oro/ José Alejandro Martínez Sepúlveda, Miguel Reinaldo

Casallas. Descripción: 1a edición / Bogotá: Universidad EAN, 2018.

Mohajerani, A., Ukwatta, A., Jeffrey-Bailey, T., Swaney, M., Ahmed, M., Rodwell, G., Bartolo,

S., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2019). A proposal for recycling the world's unused

stockpiles of treated wastewater sludge (biosolids) in fired-clay bricks. *Buildings*, 9(1).

<https://doi.org/10.3390/buildings9010014>

Piedrahíta, O. (2009). Acides del suelo. Magnesios Heliconia SA. Disponible en:

<https://docplayer.es/71053424-Acidez-del-suelo-oscar-piedrahita-junio-2009.html>

Portal Ecopetrol. (2021). Modelo de Economía Circular. Recuperado de

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/economia-circular/modelo-economia-circular>

Portal Ecopetrol. (2022). Nuestra experiencia. Recuperado de


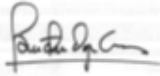
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/economia-circular>

Santos Santos, T. (2008). Contribuciones a la Economía. Estudio de factibilidad de un proyecto


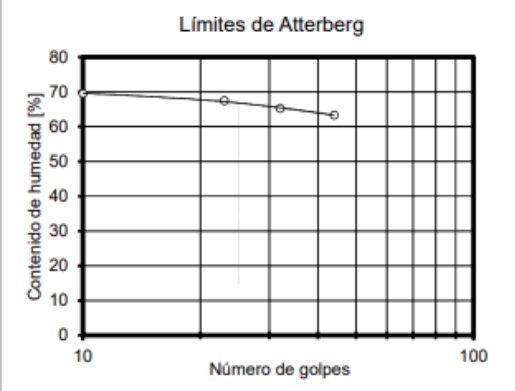
de inversión. Obtenido de <https://www.eumed.net/ce/2008b/tss.htm>

- Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). Descubre qué es un vertimiento y cuáles son sus caracterizaciones» Observatorio Ambiental de Bogotá. Observatorio Ambiental de Bogotá. <https://oab.ambientebogota.gov.co/descubre-que-es-un-vertimiento-y-cuales-son-sus-caracterizaciones/>
- Urbano, R. (2006). Rutinas de mantenimiento técnico de los equipos asociados a los sistemas de dosificación de polímero y cloruro férrico de la ptar-c. 1-56. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6294/T04305.pdf?sequence=1>
- Varela, R. (2001). Innovación empresarial, arte y ciencia en la creación de empresas, segunda edición. Prentice Hall. Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia. Recuperado de: https://books.google.com.co/books?id=RQ_4NcwhagQC&pg=RA3-PA66&dq=analisis+legal+de+la+empresa&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwicv8PNmYroAhWUhhIEHQ0DA4gQ6AEIWTAG#v=onepage&q&f=false
- Vargas, L. (2004). Mezcla rápida. En Lidia de Vargas (Ed.). Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual I: Teoría Tomo I. Lima. (pp.227-262). Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>
- Weng, C.-H., Lin, D.-F., & Chiang, P.-C. (2003, May). Utilization of sludge as brick material. ResearchGate; Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/222678379_Utilization_of_sludge_as_brick_material


Apéndice A. Caracterización de Lodos de Clarificación U2900

	IDENTIFIC. MUESTRA	Lodos Piscina U-2900	LOUISIANA ADMINISTRATIVE CODE, 2013. TITLE 43. NATURAL RESOURCES. Part XIX. SUBPART 1. STATEWIDE ORDER 29B. Chapter 3	Decreto 4741 de 2005 Art. 5 (Anexo III). MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL c. Por el cual se reglamenta la prevención y manejo de residuos o desechos peligrosos.
Muestra enviada por: GRB	FECHA MUESTREO	19-mar-13	<i>313: Pit Closure Techniques and Onsite Disposal of E and P Waste</i>	
ANÁLISIS DE LABORATORIO UNIDADES				
PH / T (GR C) EN SUELOS RELACION 1:5	Unidades de pH	6.10/22.8	6-9	NR
CONDUCTIVIDAD RELACION 1:5 / T	mS/cm	0.284/25.0	<4.0	NR
HUMEDAD A 105 GR C	%	7.73	NR	NR
GRASAS Y ACEITES	%	0.11	<1.0	NR
HIDROCARBUROS	%	0.026	NR	NR
RELACION DE ADSORCIÓN DE SODIO	NA	0.57	<12	NR
CALCIO	mcq/L	144	NR	NR
MAGNESIO	mcq/L	202	NR	NR
SODIO	mcq/L	7.48	NR	NR
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	mcq/100 g	15.3	NR	NR
CATIONES INTERCAMBIABLES			NR	NR
CALCIO	mcq/100 g	6.62	NR	NR
MAGNESIO	mcq/100 g	0.174	NR	NR
POTASIO	mcq/100 g	0.284	NR	NR
SODIO	mcq/100 g	0.193	NR	NR
PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE	%	1.26	<15	NR
COBROSIVIDAD	NA	NEGATIVO	NR	NR
ANÁLISIS DE METALES				
CALCIO	mg/Kg	2873	NR	NR
MAGNESIO	mg/Kg	2521	NR	NR
SODIO	mg/Kg	172	NR	NR
POTASIO	mg/Kg	1454	NR	NR
ALUMINIO	mg/Kg	26770	NR	NR
HIERRO	mg/Kg	37525	NR	NR
PLATA	mg/Kg	1.39	200	NR
BARIO	mg/Kg	101	20000	NR
CADMIO	mg/Kg	1.74	10	NR
SELENIO	mg/Kg	<1.00	10	NR
ARSENICO	mg/Kg	13.2	10	NR
CROMO	mg/Kg	23.5	500	NR
PLOMO	mg/Kg	10.3	500	NR
BERILIO	mg/Kg	<1.00	NR	NR
MOLIBDENO	mg/Kg	1.37	NR	NR
YANADIO	mg/Kg	73.7	NR	NR
ZINC	mg/Kg	190	500	NR
COBALTO	mg/Kg	8.18	NR	NR
COBRE	mg/Kg	25.8	NR	NR
MANGANESO	mg/Kg	248	NR	NR
NIQUEL	mg/Kg	34.0	NR	NR
SILICIO	mg/Kg	746	NR	NR
ANÁLISIS DE METALES EN EL LIXIVIADO				
ARSENICO	mg/L	<0.010	NR	5.00
BARIO	mg/L	2.53	NR	100.0
CADMIO	mg/L	0.039	NR	1.00
CROMO	mg/L	0.031	NR	5.00
PLOMO	mg/L	1.50	NR	5.00
PLATA	mg/L	<0.010	NR	5.00
SELENIO	mg/L	<0.010	NR	1.00
NR: No Reporta NA: No Aplica				
Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y no pueden ser reproducidos en forma parcial. En caso de queja o reclamo favor dirigirse en comunicación escrita a quien firma el informe con copia a Calidad-HSEQ				
Informe aprobado por:				
	Laura Cristina Aguilar Mat: PQ. 0398			

Apéndice C. Determinación Límites de Atterberg e Índice de Plasticidad de los Suelos.

	DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS		CÓDIGO: LIC-F-011												
	INV E -125 Y 126		F.A: 21/02/2020												
	LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL		VERSIÓN: 01												
Cliente:	Universidad Industrial de Santander														
Proyecto:	Ecopetrol S.A.														
Fecha:	20 de agosto de 2021	Hora inicio:													
Identificación:	Lodos de Balace	Hora fin:													
LÍMITES DE CONSISTENCIA															
LÍMITE LIQUIDO															
Determinación No.	1	2	3	4											
No. golpes	44	32	23	10											
Recipiente No.	13	20	30	27											
W recipiente + SH	44,1	44,9	44,3	44,7											
W recipiente. + SS	29,8	29,9	29,4	29											
W recipiente	7,2	6,9	7,3	6,4											
W agua	14,30	15,00	14,90	15,70											
W suelo seco	22,60	23,00	22,10	22,60											
% Humedad	63,27	65,22	67,42	69,47											
LÍMITE PLÁSTICO															
Recipiente No.	32	22													
W recipiente + SH	19,40	19,70													
W recipiente. + SS	15,30	15,20													
W recipiente	7,20	6,90													
W agua	4,10	4,50													
W suelo seco	8,10	8,30													
% Humedad	50,62	54,22													
															
Límite Líquido <u>66 %</u> Límite Plástico <u>52 %</u> Índice de Plasticidad <u>14 %</u>															
OBSERVACIONES:															
<table border="1"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Elaboró</td> <td style="text-align: center;">Revisó</td> <td style="text-align: center;">Aprobó</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Nombre</td> <td>Germán Hernández</td> <td>Hebenly Cells</td> <td>Wilfredo Del Toro</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cargo</td> <td>Laboratorista</td> <td>Directora de laboratorio</td> <td>Director de escuela</td> </tr> </table>					Elaboró	Revisó	Aprobó	Nombre	Germán Hernández	Hebenly Cells	Wilfredo Del Toro	Cargo	Laboratorista	Directora de laboratorio	Director de escuela
	Elaboró	Revisó	Aprobó												
Nombre	Germán Hernández	Hebenly Cells	Wilfredo Del Toro												
Cargo	Laboratorista	Directora de laboratorio	Director de escuela												

Apéndice D. Análisis Absorción Mampostería Ladrillos con Arena y (40%) Lodo (L1).**REPORTE DE ENSAYO**

 Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA Km 7 vía Piedecuesta	OBRA: PTAP - REFINERIA		FECHA DE INFORME: martes, 30 de noviembre de 2021
	SOLICITADO POR: GEOSOLUCIONES DE INGENIERIA SAS		FECHA DE RECEPCIÓN: martes, 23 de noviembre de 2021
ABSORCIÓN DE MAMPOSTERÍA NTC 4017.	SONDEO: NO APLICA	N° DE ENSAYOS: 10	FECHA DE PRUEBA: miércoles, 24 de noviembre de 2021
	MUESTRAS: LAS INDICADAS	PROFUNDIDAD: NO APLICA	CALCULÓ: Tnlgo. Edwin A. Rangel Ardila
	DESCRIPCIÓN: LADRILLOS CON LODO DESHIDRATADOS DE		OPERADOR: Sergio Alvarez Naranjo
Codigo de informe: MAT-21-132	INFORME N° 56		PÁGINAS: 1

N°	MUESTRA	TIPO DE LADRILLO	PESO, g		ABSORCIÓN, %
			Ms	Mh	
1	LADRILLO	COMUN	1617	2020	25,0
2	LADRILLO	COMUN	1595	1873	17,5
3	LADRILLO	COMUN	1507	1775	17,8
4	LADRILLO	COMUN	1781	2218	24,6
5	LADRILLO	COMUN	1719	2040	18,7
6	LADRILLO	COMUN	1491	1784	19,6
7	LADRILLO	COMUN	1655	2088	26,1
8	LADRILLO	COMUN	1585	1978	24,8
9	LADRILLO	COMUN	1511	1819	20,4
10	LADRILLO	COMUN	3066	3724	21,4

OBSERVACIONES:


Ms.:masa seca del especimen antes de inmersión (g)

Mh.:masa sumergida en agua del especimen saturado luego de inmersión en agua (g)

**LOS RESULTADOS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LAS MUESTRAS ENSAYADAS
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME**

FIN DEL REPORTE

Apéndice E. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo con Arena y (40%) lodo (L1).**INFORME DE ENSAYO**

 Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA Km 7 vía Piedecuesta	OBRA: PTAP - REFINERIA		FECHA DE INFORME: martes, 30 de noviembre de 2021	
	SOLICITADO POR: GEOSOLUCIONES DE INGENIERIA SAS		FECHA DE RECEPCIÓN: martes, 23 de noviembre de 2021	
	SONDEO: NO APLICA	N° DE ENSAYOS: 10	FECHA DE PRUEBA: viernes, 26 de noviembre de 2021	
	MUESTRAS: 10	PROFUNDIDAD: NO APLICA	CALCULÓ: Tnlgo. Edwin A. Rangel Ardila	
	DESCRIPCIÓN: LADRILLOS DE LODOS DESIHDRATADOS DE GEOTUBE		OPERADOR: Sergio Alvarez Naranjo	
Codigo Informe: RES-21-132	INFORME N° 56		PÁGINAS: 1	

N°	MUESTRA	TIPO DE LADRILLO	MEDIDAS, mm						CARGA, kN	RESISTENCIA			
			a	b	c	d	e	f		BRUTA		NETA	
										MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	LADRILLO	COMUN	100	217	0	0	0	0	6,5	0,3	3,1	0,3	3,1
2	LADRILLO	COMUN	100	213	0	0	0	0	3,1	0,1	1,5	0,1	1,5
3	LADRILLO	COMUN	100	213	0	0	0	0	28,8	1,3	13,8	1,3	13,8
4	LADRILLO	COMUN	105	224	0	0	0	0	30,6	1,3	13,3	1,3	13,3
5	LADRILLO	COMUN	100	220	0	0	0	0	30,6	1,4	14,2	1,4	14,2
6	LADRILLO	COMUN	95	208	0	0	0	0	33,4	1,7	17,2	1,7	17,2
7	LADRILLO	COMUN	105	220	0	0	0	0	17,9	0,8	7,9	0,8	7,9
8	LADRILLO	COMUN	104	217	0	0	0	0	17,0	0,8	7,7	0,8	7,7
9	LADRILLO	COMUN	99	212	0	0	0	0	24,8	1,2	12,0	1,2	12,0
10	LADRILLO	COMUN	132	278	0	0	0	0	61,3	1,7	17,0	1,7	17,0

OBSERVACIONES: Las muestras 1 y 2 presentaban fisuras .

**LOS RESULTADOS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LAS MUESTRAS ENSAYADAS
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME**

FIN DEL REPORTE



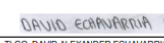
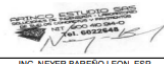
Apéndice F. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo Arena, 20% Lodo y Tamo (L3 y L4).

FECHA		CONTRATISTA		PROYECTO										NORMA		
22jun2022		DOMINGO ESCALANTE		ECONOMIA CIRCULAR										NTC 4017		
Nº CILINDRO	LOCALIZACION	ELEMENTO FUNDIDO	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DIAS DE CURADO	RESISTENCIA (kN)	RESISTENCIA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm²)	RESISTENCIA (P.S.I)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (Kg/cm²)	PROMEDIO (P.S.I)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE	F-AL-231
															MEZCLADO	MARCA CEMENTO
L1	N/A	LADRILLO CON ARENA Y LODO	N/A	N/A	22jun-22	N/A	11.7	1189.0	10	141	N/A	N/A	141	2	N/A	N/A
L2	N/A	LADRILLO CON ARENA, LODO Y TAMO	N/A	N/A	22jun-22	N/A	15.7	1598.9	13	189	N/A	N/A	189	5	N/A	N/A
<p>FORMA DE LADRILLO RECTANGULAR: LONGITUD 200, ANCHO 60, AREA 12000 cm²</p> <p>VELOCIDAD DE CARGA 20-40 MPa/s</p> <p>EQUIPO: PRESA HIDRAULICA DIGITAL - INSTRON</p>																
<p>ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS</p> <p> Tipo 1: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce a lo largo de la línea de la resistencia a la tracción. El ángulo de la fractura es de 45°. Tipo 2: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce en un ángulo de 45°. La resistencia a la tracción es menor que la resistencia a la compresión. Tipo 3: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce en un ángulo de 45°. La resistencia a la tracción es mayor que la resistencia a la compresión. Tipo 4: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce en un ángulo de 45°. La resistencia a la tracción es menor que la resistencia a la compresión. Tipo 5: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce en un ángulo de 45°. La resistencia a la tracción es mayor que la resistencia a la compresión. Tipo 6: Como se muestra en los esquemas, la fractura se produce en un ángulo de 45°. La resistencia a la tracción es menor que la resistencia a la compresión. </p>																
OBSERVACIONES																
										 T.ºGO. MIGUEL ÁNGEL P.ºLENCIA BARRETO LABORATORISTA			 ING. NEIVER BARETO LEÓN, ESP REVISOR			








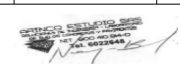
Apéndice G. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo Arena, 30% Lodo y Tamo (L3).

FECHA		CONTRATISTA		PROYECTO										NORMA		
15/mar/2022		DOMINGO ESCALANTE		ECONOMIA CIRCULAR										NTC 4017		
NO CILINDRO	LOCALIZACION	ELEMENTO FUNDIDO	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DIAS DE CURADO	RESISTENCIA (MN)	RESISTENCIA (Kg/ft)	ESFUERZO (Kg/ftcm ²)	RESISTENCIA (P.S.)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (Kg/ftcm ²)	PROMEDIO (P.S.)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE MEZCLADO	MARCA CEMENTO
L1	NIA	LADRILLO DE LODO	NIA	NIA	15-mar-22	NIA	15,1	1539,8	13	182	N.A	N.A	182	2	NIA	NIA
FORMA DE LADRILLO RECTANGULAR: LARGUEZ 20,00 ANCHA 100,00 ANCHO 6,00 VELOCIDAD DE CARGA: 30-40 MPAS EQUIPO: PRESA HIDRAULICA DIGITAL - INGENIER				ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS 												
OBSERVACIONES				LADRILLO DE ARCILLA Y LODO ING. MIGUEL ANGEL PUENCIA BARRETO LABORATORISTA ING. NEYER BARENGO LEÓN, ESP REVISÓ												


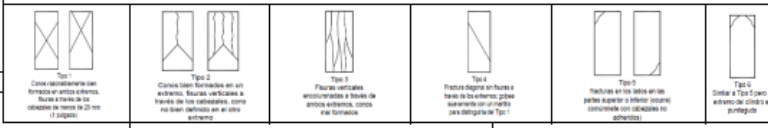


Apéndice H. Análisis Resistencia a la Compresión Placa Huella (15% Lodo).

		<p style="text-align: center;">ARINCO ESTUDIO S.A.S LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETOS Carrera 28 N°. 48-50 Barrio Palmira Tel:6121943 E-mail:arinco.estudio.sas@gmail.com Barrancabermeja - Santander</p>														
<p>ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MUESTRAS DE CONCRETO NORMA NTC 673</p>																
FECHA		CONTRATISTA		PROYECTO										NORMA		
30/jun/2022		DOMINGO ESCALANTE		ECONOMIA CIRCULAR										ICONTEC 550 - 673		
														FORMATO: F-AL-031		
Nº PROBETA	ESTRUCTURA	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DIAS DE CURADO	RESISTENCIA (KN)	RESISTENCIA (Kgf)	ESFUERZO (Kgf/cm²)	RESISTENCIA (P.S.I)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (Kgf/cm²)	PROMEDIO (P.S.I)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE MEZCLADO	MARCA CEMENTO	
1	CONCRETO CON LODO	N/A	N/A	30-jun-22	N/A	934,8	95323,4	238	3384	113,0	211,0	3384	2	N/A	N/A	
FORMA DE PROBETA: RECTANGULAR				LONGITUD	20,00	AREA	400,00	cm²	ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS							
				ANCHO	20,00											
VELOCIDAD DE CARGA: 20 - 40 MPa/s																
EQUIPO: PRENSA HIDRAULICA DIGITAL - INGESTEST																
OBSERVACIONES																
PROBETA DE CONCRETO CON LODO RECTANGULAR DE MEDIDAS 20*20 CM																
				 TLGO. DAVID ALEXANDER ECHAVARRIA GUIZA LABORATORISTA						 ING. NEVER BARENO LEON, ESP REVISO						

Apéndice I. Análisis Resistencia a la Compresión Ladrillo de Concreto con 20% de Lodo sin prensado.

		<p style="text-align: center;">ARINCO ESTUDIO S.A.S LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETOS Carrera 28 N° 48-50 Barrío Pabellón - Tel: 6121443 E-mail: arinco.estudio@sas@gmail.com Barancabemeja - Santander</p>													
ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MUESTRAS DE CONCRETO NORMA NTC 673															
FECHA		CONTRATISTA		PROYECTO								NORMA			
30/jun/2022		DOMINGO ESCALANTE		ECONOMIA CIRCULAR								ICONTEC 550 - 673			
												FORMATO: F-AL-031			
Nº PROBETA	ESTRUCTURA	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DÍAS DE CURADO	RESISTENCIA (kN)	RESISTENCIA (Kgf)	ESFUERZO (Kgf/cm²)	RESISTENCIA (P.S.I)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (Kgf/cm²)	PROMEDIO (P.S.I)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE MEZCLADO	MARCA CEMENTO
1	CONCRETO CON LODO	N/A	N/A	30-jun-22	N/A	141.2	14394.4	98	1390	46.4	211.0	1390	5	N/A	N/A
FORMA DE PROBETA: RECTANGULAR LONGITUD 21.00 ANCHO 7.00 AREA 147.00 cm² VELOCIDAD DE CARGA: 20 - 40 MPa/S EQUIPO: PRENSA HIDRAULICA DIGITAL - INGEST				ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS											
OBSERVACIONES				 <p>Tip 1 Como se muestra en la imagen, la fractura se produce a través del eje de compresión en un ángulo de 45°.</p>  <p>Tip 2 Como se muestra en la imagen, la fractura se produce a través del eje de compresión, pero no tiene dirección en el otro extremo.</p>  <p>Tip 3 Fractura vertical, acompañada de líneas de acción en forma de arcos.</p>  <p>Tip 4 Fractura diagonal en forma de triángulo, acompañada de líneas de acción en forma de arcos.</p>  <p>Tip 5 Fractura en los lados en las partes superior e inferior, acompañada de líneas de acción.</p>  <p>Tip 6 Fractura en los lados en las partes superior e inferior, acompañada de líneas de acción.</p>											
PROBETA DE CONCRETO CON LODO RECTANGULAR DE MEDIDAS 21*7 CM				DAVID ECHARRIA G TLGO. DAVID ALEXANDER ECHARRIA GUIZA LABORATORISTA								 ING. NEVER BARENO LEON, ESP REVISOR			

Apéndice J. Análisis Resistencia a la Compresión Postes de Concreto con Lodo M3 y sin Lodo (Blanco) M1.

		<p>ARINCO ESTUDIO S.A.S LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETOS Carrera 28 N° 48-50 Barrio Palmira Tel:0121943 E-mail:arinco.estudio.sas@gmail.com Barancabameje - Santander</p>													
<p>ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MUESTRAS DE CONCRETO NORMA NTC 673</p>															
FECHA		CONTRATISTA			PROYECTO								NORMA		
08/may/2022		DOMINGO ESCALANTE			ECONOMIA CIRCULAR								ICONTEC 550 - 673		
													FORMATO F-AL-031		
No CILINDRO	ESTRUCTURA	ASENTAMIENTO (PULGADAS)	FECHA FUNDIDA	FECHA ENSAYO	DIAS DE CURADO	RESISTENCIA (kN)	RESISTENCIA (KgF)	ESFUERZO (KgF/cm²)	RESISTENCIA (P.S.I)	EVOLUCION (%)	RESISTENCIA PROYECTADA (KgF/cm²)	PROMEDIO (P.S.I)	TIPO DE FRACTURA	FORMA DE MEZCLADO	MARCA CEMENTO
1	BLANCO	6"	10-abr-22	8-may-22	28	118,6	12093,9	149	2118	70,7	211,0	1779	2	EN OBRA	ARGOS
2	LODO	6"	10-abr-22	8-may-22	28	80,6	8218,9	101	1440	48,1	211,0		6	EN OBRA	ARGOS
FORMA DE PROBETA: CILINDRICA NORMAL 4"		10,16	AREA	81,07	cm²	ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS									
FORMA DE PROBETA: CILINDRICA NORMAL 6"		15,24	AREA	182,415	cm²										
VELOCIDAD DE CARGA: 20 - 40 MPa/s															
EQUIPO: PRESA HIDRAULICA DIGITAL - INGESTET															
OBSERVACIONES															
LOS CILINDROS "BLANCO Y LODO" SE MEZCLARON EN OBRA PARA UNA RESISTENCIA DE 3000PSI															
 TlGO. MIGUEL ANGEL PALENCIA BARRETO LABORATORISTA												 ING. NEYER BAREND LEON, ESP REVISOR			