

**FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA
BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES).**

MARIA ALEJANDRA URRUTIA MONTAÑA



**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015**

**FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA
BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES).**

MARIA ALEJANDRA URRUTIA MONTAÑA

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
CONSTRUCCIÓN Y NUEVOS MATERIALES**

**DIRECTOR: WILLIAM RICARDO MOZO MORENO
INGENIERO CIVIL, MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015**

Nota de aceptación:

Firma presidente del jurado

Firma jurado

Firma jurado

Tunja, abril del 2015

DEDICATORIA

Con el desarrollo de esta investigación, culmino una etapa importante de mi vida, y quizá uno de los logros más grandes para mi desarrollo profesional, fruto de mi esfuerzo y dedicación.

Esta tesis se la dedico a Dios primordialmente, quien me da la vida, la sabiduría y entendimiento, a la virgencita del milagro, por su ayuda divina para culminar 5 años en la Universidad con éxito, a pesar de las dificultades y obstáculos. Finalmente a quienes me dan el sustento, la alegría, el amor y las fuerzas para seguir siempre adelante, a mis padres Héctor Javier Urrutia, Ana Isabel Montaña, y mi hermana Juliana Urrutia, quienes son el apoyo incondicional para la realización de este sueño, quienes me enseñan la importancia de la unión familiar y la fortaleza para enfrentar cada impedimento y avanzar siempre con la ayuda de Dios.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar mi carrera, por ayudarme en cada paso que doy y sobre todo por regalarme la sabiduría necesaria para desarrollar con éxito esta investigación.

Le doy gracias a mis padres, Javier e Isabel, por el esfuerzo, la tenacidad y la dedicación que efectuaron, para que yo, pudiera recibir una educación académica excelente, gracias infinitas por apoyarme en cada decisión que tomó, por los valores que me inculcaron y el amor que día a día me regalan. A mi hermana, Juliana, por ser parte de mi vida, por llenarla de momentos de felicidad y de unidad familiar.

Agradecimiento especial, a mi director de tesis el ingeniero, M.Sc. William Ricardo Mozo Moreno, por su orientación, dedicación, entusiasmo, seguimiento y la supervisión ofrecida en cada etapa del proyecto, pero sobre todo por la motivación y amabilidad con que se desarrollaba la investigación. Al ingeniero, Wilson Alfredo Medina Sierra, tutor metodológico de esta investigación, por las sugerencias, consejos, y supervisión realizada.

Finalmente, gracias infinitas a mis compañeros de la facultad de ingeniería civil, pero principalmente a aquellos que durante estos cinco años, se convirtieron en amigos, por el apoyo, la comprensión y la amistad recibida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	16
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
1.2.1 Pregunta general.	17
1.2.2 Preguntas específicas.	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	19
1.4.1 Objetivo general.	19
1.4.2 Objetivos específicos.	19
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE	20
2.1 GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA.....	20
2.2 LOS BIOSÓLIDOS UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA.....	21
2.3 REUSE OF SEWAGE SLUDGE ASHES (SSA) IN CEMENT MIXTURES: THE EFFECT OF SSA ON THE WORKABILITY OF CEMENT MORTARS	21
2.4 MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTARS CONTAINING SEWAGE SLUDGE ASH (SSA) AND PORTLAND CEMENTS WITH DIFFERENT TRICALCIUM ALUMINATE CONTENT	22
2.5 TECHNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF SEWAGE SLUDGE ASH (SSA) IN CEMENT-BASED MATERIALS	22
2.6 HYDRATION CHARACTERISTICS OF WASTE SLUDGE ASH THAT IS REUSED IN ECO-CEMENT CLINKERS	23
2.7 APROVECHAMIENTO DE LODOS ALUMINOSOS GENERADOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN, MEDIANTE SU INCORPORACIÓN, COMO AGREGADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	24
2.8 USE OF DRY SLUDGE FROM WASTE WATER TREATMENT PLANTS AS AN ADDITIVE IN PREFABRICATED CONCRETE BRICKS	24
3. MARCO TEÓRICO	26
3.1 AGUAS RESIDUALES.....	26

3.1.1 Definición.	26
3.1.2 Clasificación.	26
3.2 TRATAMIENTO DE AGUAS.	27
3.2.1 Captación.	27
3.2.2 Pretratamiento.	28
3.2.3 Tratamiento Primario.	28
3.2.4 Tratamiento de lodos.	28
3.2.5 Almacenamiento de lodos digeridos.	28
3.2.6 Deshidratación de lodos.	28
3.2.7 Producción de biogás.	29
3.3 BIOSÓLIDO	29
3.3.1 Contaminantes de los biosólidos.	29
3.3.2 Clasificación de los biosólidos.	30
3.3.3 Aprovechamiento del biosólido PTAR “El Salitre”.	31
3.4 MATERIAS PRIMAS	31
3.4.1 Cemento	31
3.5 AGREGADOS.	34
3.5.1 Definición.	34
3.5.2 Características y aplicaciones.	35
3.5.3 Granulometría de los agregados.	36
3.6 AGUA.	36
3.6.1 Definición.	36
3.6.2 Clasificación del agua en el concreto.	36
3.7 ADOQUÍN DE CONCRETO	37
3.7.1 Definición.	37
3.7.2 Partes del Adoquín	37
3.7.3 Clasificación.	39
3.7.4 Dimensionamiento del adoquín.	41
3.8 PAVIMENTOS DE ADOQUÍN	42
3.8.1 Definición y características	42
4. METODOLOGÍA	43

4.1 DISEÑO METODOLÓGICO.....	43
4.1.1 Definición de hipótesis, variables e indicadores.....	43
4.2 RECOLECCIÓN MATERIA PRIMA	43
4.3 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS.....	46
4.3.1 Granulometría granito y arena.	47
4.3.2 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado grueso.....	48
4.3.3 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado fino.....	48
4.3.4 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval.....	49
4.3.6 Granulometría biosólido.	50
4.3.7 Caracterización química del biosólido.....	51
4.3.8 Contenido de humedad.....	52
4.4 ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN	52
4.5 ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN	53
4.5.1 DIMENSIONES.....	53
4.5.2 Número de especímenes.....	53
4.6 DISEÑO DE LA MEZCLA.	55
4.6.1 Propiedades del cemento	55
4.6.2 Calidad del agua.	55
4.6.3 Propiedades del agregado.	55
4.7 PROPORCIONES Y MEZCLA DE MATERIALES.	55
4.8 PROCESO DE ELABORACIÓN	56
4.8.1 Mezcla 1.....	56
4.8.2 Mezclas 2, 3 y 4	57
4.9 MARCADO DE ESPECÍMENES.....	58
4.10 PROCESO DE CURADO.....	59
4.11 ANÁLISIS DE APARIENCIA Y MEDICIONES	60
4.12 ANÁLISIS ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD	61
4.13 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEJO TRACCIÓN.....	62
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	64

5.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS.....	64
5.1.1 Granulometría granito.	64
5.1.2 Granulometría arena.....	65
5.1.3 Granulometría biosólido.....	66
5.1.4 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción de agua en agregados.....	67
5.1.5 Equivalente de arena.....	68
5.1.6 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval.....	68
5.1.7 Humedades.....	68
5.2.8 Caracterización química del biosólido.....	68
5.2 ANÁLISIS APARIENCIA Y MEDICIONES	71
5.2.1 Mediciones.....	71
5.2.2 Apariencia.....	72
5.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN O MODULO DE ROTURA.....	73
5.3.1 Primera falla.....	73
5.3.3 Tercera Falla.....	77
5.4 ABSORCIÓN DE AGUA	79
5.5 DENSIDAD	81
6. CONCLUSIONES	83
8. RECOMENDACIONES	85
GLOSARIO	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Partes de un adoquín	38
Figura 2 Partes de un adoquín (corte)	39
<i>Figura 3 Adoquín no biselado</i>	39
Figura 4 Adoquín biselado	39
Figura 5 Adoquín parcialmente biselado.....	40
Figura 6 Clases de Adoquín Tipo I.....	40
Figura 7 Clases de Adoquín Tipo 2.....	41
Figura 8 Clases de Adoquín Tipo 3.....	41
Figura 9 Ubicación PTAR Bogotá	44
Figura 10 Revisión lugar para muestreo biosólido	44
Figura 11 Almacenamiento de biosólido	45
Figura 12 Secado del biosólido.....	46
Figura 13 Tamices agregados	47
Figura 14 Agregados (Granito y arena)	47
Figura 15 Prueba absorción de agua granito	48
Figura 16 Prueba absorción y densidad de arena	49
Figura 17 Prueba Micro-Deval	49
Figura 18 Prueba equivalente de arena.....	50
Figura 19 Muestra biosólido.....	51
Figura 20 Tamizado biosólido	51
Figura 21 Prueba de Humedad muestras	52
Figura 22 Ubicación fábrica prefabricados del Sol LTDA.....	53
Figura 23 Cantidad de materias primas, elaboración adoquines	57
Figura 24 Proceso elaboración adoquines individualmente	57
Figura 25 Marcado especímenes.....	59
Figura 26 Proceso curado Especímenes	60
Figura 27 Análisis mediciones adoquines.....	60
Figura 28 Análisis absorción de agua y densidad	61
Figura 29 Enfriamiento adoquines	61
Figura 30 Adoquines sumergidos totalmente en agua.....	62
Figura 31 Preparación adoquines antes de su falla	63
Figura 32 Máquina módulo de rotura (López Hermanos y USTA Tunja)	63
Figura 33 Apariencia adoquines (0%, 5% 10% y 15%).....	73

LISTA GRAFICAS

Gráfica 1 Granulometría granito.....	64
Gráfica 2 Granulometría arena	65
Gráfica 3 Granulometría biosólido	66
Gráfica 4 Concentración promedio de metales en el biosólido para el 2012	69
Gráfica 5 Concentración promedio de metales en el biosólido para el 2014	70
Gráfica 6 Resistencia a la flexotracción adoquines 14 días curado	74
Gráfica 7 Resistencia a la flexotracción adoquines 28 días curado	75
Gráfica 8 Resistencia vs tiempo Adoquines 14 y 28 días (Estadísticamente)	76
Gráfica 9 Resistencia vs tiempo Adoquines 14 y 28 días (Dispersión)	76
Gráfica 10 Resistencia a la flexotracción adoquines 42 días curado	77
Gráfica 11 Resistencia vs tiempo Adoquines 14, 28 días y 42 días (Estadísticamente)	78
Gráfica 12 Resistencia vs tiempo Adoquines 14, 28 días y 42 días (Dispersión) ..	78
Gráfica 23 Absorción de agua (0% y 5% biosólido)	79
Gráfica 24 Absorción de agua (10% y 15% biosólido)	80
Gráfica 15 % Absorción de agua vs % Biosólido	80
Gráfica 16 Densidad vs % Biosólido	81

LISTA TABLAS

Tabla 1 Tipos de cemento Portland en Colombia	34
Tabla 2 Criterio color aceptación agregado fino	35
Tabla 3 Granulometría típica agregados para concreto	36
Tabla 4 Ensayos a realizar materias primas	46
Tabla 5 Numero de adoquines por porcentaje de biosólido	54
Tabla 6 Ensayos a realizar adoquines según fecha de curado.....	54
Tabla 7 Proporciones de mezcla por incorporación de biosólido	56
Tabla 8 Proporciones mezcla por adoquín	56
Tabla 9 Porcentaje de material presente en el Granito.....	65
Tabla 10 Porcentaje de material presente en la arena	66
Tabla 11 Porcentaje de material presente en el biosólido	67
Tabla 12 Tabla resumen, características materias primas.....	68
Tabla 13 Caracterización química del biosólido para el año 2012.....	69
Tabla 14 Caracterización química del biosólido para el año 2014.....	70
Tabla 15 Tabla medidas promedio adoquines según cantidad de biosólido.....	71
Tabla 16 Error porcentual prueba medidas adoquines (5%, 10% y 15%).....	72

RESUMEN

Las PTAR, producen gran cantidad de material residual, que después de un proceso de tratamiento, es convertido en biosólido, compuesto que contribuye en actividades relacionadas con la agricultura, recuperación de suelos, cobertura de rellenos sanitarios y como materia prima para la elaboración de elementos de construcción. Sin embargo en Colombia, existe poca información acerca de su manejo y solo se cuenta con el Título C del Reglamento Técnico Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS.

El desarrollo de esta investigación evalúa la posibilidad desde el punto de vista técnico de incluir los biosólidos de la PTAR el Salitre, de la ciudad de Bogotá, como materia prima para la elaboración de adoquines de concreto, efectuando como primera etapa una revisión bibliográfica, donde se determina la cantidad en porcentaje de biosólidos (0%, 5%, 10% y 15%) a reemplazar por el agregado (arena).

Para cumplir con las expectativas de la propuesta se busca desarrollar varios aspectos, entre los que se tiene, la caracterización física y mecánica de las materias primas (arena, granito y biosólido), el proceso de mezclado, encofrado, compactación, curado de adoquines y la evaluación técnica que incluye pruebas como absorción de agua, densidad, apariencia y resistencia a la flexo tracción descritas en la (NTC 2017).

ABSTRACT

The PTAR produces big quantities of residual materials that after of a process of treatment it is becoming in biosolid. The biosolid is a compound that contributes in agriculture related activities, soil remediation, landfills coverage, also it is useful as material for elaborating of construction elements. However in Colombia there is a little information about biosolid management, in this country there is just technical management of drinking water and basic sanitation.

The development of this research access the possibility of including biosolids of PTAR of “El Salitre” in Bogotá as raw material for elaborating concrete pavers, performing in the first stage a bibliographic review in order to determine the percentage amount of biosolid (0%,5%,10% y 15%) to replace the added one (sand).

In order to comply with the expectations of the proposal it is necessary to develop several aspects such a physical and mechanical characterization of raw materials (sand, gravel, biosolids) the mix elaboration, formwork, compaction, healing concrete pavers and technical evaluation; this evaluation includes tests such as water absorption, density, appearance and flexo traction described in the (NTC 2017).

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales tiene como propósito primordial, remover y estabilizar los diferentes contaminantes, con el fin de evitar problemas en la salud de las personas y del medio ambiente, en este proceso se genera una serie de subproductos entre los que se encuentran los lodos y biosólidos. Estos últimos, son definidos como restos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos que resultan del tratamiento del proceso de deshidratación de lodos en las PTAR, el tratamiento es esencial para minimizar la carga contaminante producto de residuos domésticos, industriales, comerciales y de agricultura en cantidades y aumentos importantes. Con el paso del tiempo se observa que su generación aumenta notablemente ya que el crecimiento poblacional en los países cada día es mayor y por ende su producción también.

La constante preocupación por parte de entidades ambientales, ha llevado a la restricción de la descarga final de biosólido directa a las fuentes hídricas, ya que estos productos por lo general, contienen gran cantidad de metales pesados, patógenos, sustancias orgánicas, etc.; compuestos que no son eliminados totalmente bajo el proceso de tratamiento de agua, y pueden generar complicaciones en la salud humana y de cualquier especie que haga uso del líquido. Por otra parte la construcción y puesta en marcha de nuevas estaciones o plantas de tratamiento de agua residuales, están consiguiendo la disminución de lodo y biosólido; esto gracias a las múltiples actividades y programas dispuestos para dar utilidad a dichos productos, lo que beneficia, no solo a las empresas de acueducto y alcantarillado, si no a la población en general; ya que se tendrá menos contacto con malos olores, enfermedades y virus.

Dentro de los programas ambientales de las Plantas de tratamiento de aguas residuales, se da gran importancia, a la utilidad del biosólido en diferentes actividades; relacionadas con usos de tipo agrícola, recuperación de suelos, actividades forestales, cobertura de rellenos sanitarios y como materia prima para la elaboración de nuevos materiales. Esta última toma gran importancia teniendo en cuenta el alto grado de producción y demanda que se maneja en el sector de la construcción, convirtiéndolo en una opción ventajosa y tentadora, ya que el biosólido tendría una utilidad adicional, generando ideas, y contribuyendo al medio ambiente, ya que se disminuiría la contaminación directa a las fuentes hídricas, que ya bastante perjudicadas están. Finalmente, no solo se estaría incentivando al uso de biosólido en nuevos elementos de la construcción, sino que también se estaría dando opciones valiosas al cuidado del medio ambiente y principalmente de las fuentes hídricas.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Las Aguas Residuales (AR), son la amenaza más grande de las fuentes hídricas, ya que son portadoras de diferentes elementos o compuestos como: metales pesados, materia orgánica, patógenos; los cuales pueden ser tóxicos y peligrosos para la vida acuática y de los seres humanos. El adecuado manejo ambiental de los subproductos del tratamiento a las AR, (ya sean lodos o biosólidos) es un tema que día a día toma más fuerza y que nos convoca a su estudio.

Existe un incremento notable de estaciones que tratan las aguas residuales producto de actividades domésticas o industriales. A nivel regional se está llevando a cabo la construcción de tres PTAR en ciudades como: DUITAMA, SOGAMOSO Y TUNJA. La puesta en marcha de estas plantas traerá consigo beneficios como: la disminución de la contaminación en fuentes de agua superficiales y subterráneas, disminución de los riesgos a la salud pública, disminución en la afectación a la calidad de vida de las poblaciones aledañas a la descarga de las aguas residuales, cumplimiento de la normativa ambiental vigente y mejoramiento de la calidad de vida, entre otros. De lo mencionado se puede inferir que es muy positivo el avance en este campo; pero no se puede dejar de lado lo que esta actividad generará, es este aspecto el punto de partida para plantear el problema de investigación.

El tratamiento de las aguas residuales traerá consigo la generación de materiales que deben ser manejados de forma adecuada, dentro de esos materiales se encuentra el objeto de nuestra investigación el biosólido. Las características de este residuo lo convierten en un material con un potencial contaminante considerable; el contenido de patógenos y metales pesados hacen necesario el adecuado manejo y disposición. El lugar de donde se van a tomar los biosólidos es la PTAR EL SALITRE de la ciudad de BOGOTÁ.

Hoy por hoy las plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia, generan 274 toneladas de biosólidos al día; 4 plantas son las responsables de la mayor cantidad: El salitre en Bogotá, Cañaveralejo (Cali), San Fernando (Medellín) y Rio Frio (Bucaramanga), las cifras presentadas hacen necesario el estudio de alternativas que permitan un manejo adecuado de estos residuos y que eviten que resulten en las fuentes hídricas como material contaminante.

El factor más desfavorable es la falta de información o normas relacionadas con la utilización de biosólidos en Colombia, a pesar de que las técnicas de aprovechamiento son nuevas en el país, ofrece opciones comerciales a partir de su transformación en nuevos productos, de acuerdo con esto, hay que tener cierta precaución, sobre todo en su tratamiento y en su utilización, ya que todos poseen diferentes porcentajes en cantidades de compuestos, como zinc, cobre, cadmio,

plomo, etc., a su vez nutrientes, plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, contaminantes, protozoos y nematodos, que pueden causar biodegradación, y transmitir virus y enfermedades, con lo anterior es necesario tener en cuenta normas o leyes de otros países, que por su experiencia en manejo de biosólidos pueden aportar gran ayuda a Colombia.

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 Pregunta general. ¿Qué efecto tiene la inclusión de diferentes porcentajes de biosólido seco (0%, 5%, 10% y 15%), como materia prima para la elaboración de adoquines de concreto en cuanto a sus propiedades mecánicas (ensayos de flexotracción, absorción de agua y densidad)?

1.2.2 Preguntas específicas.

- ¿Es bueno usar este subproducto como materia prima, para la elaboración de adoquines desde el punto de vista técnico?
- ¿El porcentaje de biosólido contribuye a generar adoquines más resistentes y con mejor apariencia?
- ¿El biosólido ha aportado resultados beneficiosos en otros elementos de construcción?

Dichos interrogantes, hacen parte de la formulación del problema de investigación; que para este proyecto tiene como componentes fundamentales: PTAR EL SALITRE, cantidad de biosólido generado, y aprovechamiento del subproducto como materia prima para la elaboración de materiales de construcción.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El tratamiento o aprovechamiento de los biosólidos nace de la necesidad de evitar el daño ambiental que se está generando de forma especial, en los recursos hídricos y el suelo; se están agotando las fuentes de agua y los métodos de potabilización ya no están siendo tan efectivos, principalmente porque los vertimientos de aguas residuales, llevan gran cantidad de metales pesados, materia orgánica y compuestos tóxicos, a los ríos o afluentes y estos ya no tienen ningún tipo de respuesta a tanta contaminación.

Los biosólidos se pueden utilizar en múltiples actividades desde el compostaje, abono para uso agrícola, como estabilizante para taludes, como recubrimiento en

rellenos, sin embargo este último podría afectar de alguna manera a la producción de lixiviados tóxicos, si no se realiza la gestión y tratamiento adecuados, podría combinarse con los residuos sólidos y generar filtraciones fatales, sin embargo la alternativa innovadora, es la utilización de los biosólidos en materiales de construcción, como una nueva opción que permite implementar en el mercado nuevos materiales que cumplan con los diseños y parámetros de resistencia, y sobre todo que ayude o contribuya al cuidado del medio ambiente.

Este estudio de investigación se realiza para dar una opción de aprovechamiento particular a los biosólidos producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales, “El Salitre”, de la ciudad de Bogotá y con ello convertirlo en materia prima para la elaboración de adoquines, el cual se usa para diferentes estructuras tales como andenes de vías, pisos de parques, centros comerciales, etc., como propósito de la investigación se encuentran: el adecuado aprovechamiento del residuo, el impedimento a una contaminación futura y el aumento desequilibrado de material residual en los vertederos, pero sobretodo la inclusión de una posible alternativa de aprovechamiento de biosólidos que puede beneficiar a la PTAR, a las fuentes hídricas y a la población en general.

El estudio y aprovechamiento de los residuos se han investigado por más de 30 años, y hace más de una década que los países desarrollados poseen normativas que regulan la utilización de los biosólidos en distintas actividades, una de ellas la norma EPA 40 CFR-503 (REGISTER., 2002) de Estados Unidos, en la que establecen límites y parámetros en las concentraciones de metales pesados, además de los indicadores de contaminación fecal como coliformes y E-coli.

En Colombia no se dispone aún de ningún tipo de ley, reglamento o norma sobre la gestión de biosólidos, sin embargo el ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial estudia un borrador de una norma presentada en marzo de 2003, esta se basa en las 3 plantas más grandes del país, (El salitre, Cañaveralejo y San Fernando), pero aún no está aceptada, por otro lado, en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico 2000, ya se define el término “biosólido”, a diferencia de la anterior versión pero no reglamenta la gestión de los mismos.

Con la propuesta, se estarían generando beneficios como: la disminución de una contaminación general en las fuentes hídricas ya sean superficiales o subterráneas, y en el suelo, también se estaría disminuyendo la reproducción de vectores como insectos, roedores y aves que pueden generar problemas de salud y de estética en los lugares que podrían ser aprovechados como lugares turísticos o de entretenimiento.

No obstante, además de lo mencionado anteriormente permitirá contribuir notablemente en el desarrollo sostenible de las nuevas políticas, ya que la investigación está enfocada a contribuir a la disminución de contaminación ambiental y a la generación de productos constructivos que pueden enfocarse a una producción a gran escala.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general. Evaluar desde el punto de vista técnico, la alternativa de incluir biosólidos de la PTAR el Salitre de Bogotá, como materia prima para la fabricación de adoquín de concreto.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Realizar un diagnóstico de la producción y destino de los biosólidos generados en la PTAR el salitre de la ciudad de Bogotá.
- Realizar un diagnóstico del proceso de elaboración del adoquín de concreto, de la planta PREFABRICADOS DEL SOL LTDA de la ciudad de Sogamoso; contemplando variables de proceso y la calidad de los elementos.
- Determinar propiedades físicas de las materias primas: granito (granulometría, densidad, absorción de agua, humedad), arena (granulometría, densidad, absorción de agua, humedad, equivalente de arena y determinación de la resistencia a la abrasión) y biosólido (granulometría, humedad y análisis químico).
- Determinar las propiedades mecánicas del adoquín, con base en la Norma Técnica Colombiana NTC 2017. (Adoquines de concreto para pavimentos).
- Establecer el porcentaje óptimo de biosólido a incluir como materia prima para la elaboración del adoquín. (5%, 10% o 15%), teniendo en cuenta el diseño de mezcla que ofrece la planta PREFABRICADOS DEL SOL LTDA, es decir adoquines con 0% de biosólido.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, generan lodos, que tras un proceso de tratamiento se convierten en subproductos llamados biosólidos, estos materiales deben ser caracterizados tanto biológica como física y químicamente, para su aprovechamiento. La incorporación, es utilizada hoy en día en múltiples actividades relacionadas con la agricultura, recuperación de suelos, acciones forestales y cobertura de rellenos sanitarios.

La utilidad de los biosólidos, como materia prima para la fabricación de materiales constructivos, concierne a la elaboración de elementos cerámicos como los ladrillos y la inclusión como aditivo para mezclas de morteros o concretos, estas han demostrado ser una buena alternativa desde el punto de vista ambiental, técnico y económico. Diferentes investigaciones, en países como Argentina, Estados Unidos y la Unión Europea, han corroborado la idea de implementar y postular la utilización de biosólidos como una opción viable, para dar soluciones a problemáticas ambientales, relacionadas con la disposición final desfavorable y la contaminación en fuentes hídricas, que son los vertederos de las plantas de tratamiento.

Los antecedentes en cuanto a la utilización de biosólidos, varían desde estudios teóricos, hasta investigaciones de tipo práctico, en las que se identifica la factibilidad de utilidad de este material y sus desventajas en cuanto a la contaminación que pueden generar si no son utilizados correctamente.

2.1 GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA.

El autor, llevo a cabo una investigación relacionada con la producción de biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en Colombia. En esta se identifica que las plantas El Salitre (Bogotá), Cañaveralejo (Cali), San Fernando (Medellín) y Rio Frio (Bucaramanga), generan 274 toneladas de biosólidos al día, que son aprovechadas en diferentes actividades, entre las que se encuentran la cobertura final del relleno sanitario Doña Juana, en Bogotá, y Basuro de Navarro en Cali, por otra parte, en Medellín utilizan los biosólidos para la recuperación de suelos y en Bucaramanga como aprovechamiento forestal.¹

Las regulaciones técnicas y reglamentarias, en el país, se ven afectadas por la mala disposición de normas y decretos, que rigen el correcto manejo de los biosólidos, si bien, solo en el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 1998), Define el término “lodo biológico”, no existe desarrollo sobre el tema; y aunque en el RAS 2000, ya se precisa el término “biosólido” no reglamenta su

¹Dáguer, G. P. (2013). GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. *Sociedad, ambiente y Futuro ACODAL*, 1-7.

gestión. Según el autor, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estudia un borrador de la norma presentada en marzo de 2003, que tiene en cuenta las tres plantas de tratamiento más grandes de Colombia, El salitre, Cañaveralejo, y San Fernando, la propuesta ha sido elaborada cuidadosamente, teniendo en cuenta las referencias obligadas de las reglamentaciones de Estados Unidos (normas EPA) y de la Unión Europea.

2.2 LOS BIOSÓLIDOS UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA²

Esta investigación, explica que la generación de biosólidos depende de distintos procesos, como el espesamiento, digestión y deshidratación de los lodos orgánicos que se producen en plantas de tratamiento de aguas residuales. El uso de estos, abarca actividades de diferente índole, sin embargo su utilización está cuestionada, debido a su composición y a la cantidad de metales, nutrientes, materia orgánica, y agentes patógenos que pueden contener, por esta razón, es necesario realizar una caracterización adecuada, y prevenir que su uso cause riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

El uso de biosólidos en la elaboración de elementos de construcción lleva ya varios años, sin embargo, existe poca información en cuanto su inclusión en adoquines y por esta razón es necesario tener en cuenta investigaciones relacionadas con su uso en mezclas de mortero- concreto y ladrillos cerámicos elaborados con estos, ya que dichas investigaciones ayudan al desarrollo de este proyecto.

2.3 REUSE OF SEWAGE SLUDGE ASHES (SSA) IN CEMENT MIXTURES: THE EFFECT OF SSA ON THE WORKABILITY OF CEMENT MORTARS³

El autor estudió la inclusión de cenizas de lodos de depuradora, en varias mezclas de concreto, utilizando cementos tipo I y II, que se encuentran fácilmente, en el comercio común, en la investigación reemplazan de un 10 a 30% del agregado, por cenizas, analizando su manejabilidad, resistencia mecánica y contracción. Se realizan varios especímenes, desmoldados después de 24 h y que se curaron bajo el agua hasta que se realizó el ensayo mecánico. Las muestras se fallaron después de 2, 7, 28, y 120 días de curado.

Los resultados encontrados arrojaron que la inclusión de cenizas de lodos de depuradora, aumenta la actividad puzolánica en los morteros, y su compactación mejora debido a la forma de las partículas de las cenizas, cabe resaltar que los cementos combinados preparados por 10% de sustitución de cemento, cumple los

² Zuluaga, J. A. (2009). Los biosólidos: ¿Una solución o un problema? *P+L*.

³ J. Monzo, J. P. (2003). Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. *Science Direct*, 373-381.

requisitos de la norma europea EN 197-1 en términos de facilidad de trabajo, tanto en las mezclas de concreto como de mortero, y su resistencia a la compresión resulta mayor en comparación a especímenes hechos normalmente.

2.4 MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTARS CONTAINING SEWAGE SLUDGE ASH (SSA) AND PORTLAND CEMENTS WITH DIFFERENT TRICALCIUM ALUMINATE CONTENT ⁴

El autor anterior, planteó en otras de sus investigaciones la inclusión de cenizas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de reducir significativamente el volumen del material, teniendo en cuenta la composición química de los desechos, sobre todo cuando son ricas en azufre.

Para las mezclas de estudios, se sustituyó de 15 a 30% de cemento Portland, por cenizas volantes, luego fueron puestas en un molde y se almacenaron en una sala de humedad durante 24 horas. Las muestras se desmoldaron y se curaron por inmersión en un baño de agua para acelerar el proceso de hidratación a los 3, 7, 14, y 28 días de acuerdo con las pruebas ASTM.

El análisis encontrado, demostró que los especímenes sustituidos de 15 a 30% de cenizas de lodos de depuradora, resisten al ensayo de compresión de una manera adecuada y la alteración de azufre no altera radicalmente la resistencia de las mezclas, sin embargo, en tiempos de curado mayor a 28 días, retarda el fraguado y donde se utilizan los agregados finos de sulfatos, ocurre, la reducción de la resistencia de los morteros, es necesario saber que algunas muestras contenían cierto grado de contaminación por el grado de azufre.

2.5 TECHNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF SEWAGE SLUDGE ASH (SSA) IN CEMENT-BASED MATERIALS⁵,

En este artículo, se llevó a cabo una investigación relacionada con el comportamiento ambiental de las cenizas de lodos de depuradoras, en materiales a base de cemento, mediante una caracterización física, química y mineralógica, y un estudio, adicional de pruebas de lixiviación, teniendo en cuenta que los biosólidos, por su origen, pueden contener elementos contaminantes y pueden asumir impactos negativos debido a su uso.

Se efectuaron diferentes muestras en las que se sustituyó porcentajes de 10 a 30% de biosólidos por cemento o arena, y en el transcurso, se vio que las cenizas

⁴J. Monzó, J. P.-M. (1999). Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content. *Science Direct*, 87-94

⁵ Martin Cyr, M. C. (2007). Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. *Science Direct*, 1278-1289.

reducen el trabajo ejercido por los morteros, y tienden a aumentar el tiempo de fraguado, por otro lado, en la caracterización se encontraron contenidos de metales pesados como zinc, cromo y cobre, con concentraciones superiores a 2g por Kg de residuos. Adicional, realizó varios ensayos, de prueba de resistencia a la compresión en las muestras obtenidas, y aunque la mayoría de los estudios informan de una disminución de resistencia en morteros y hormigones cuando las cenizas de lodos de depuradora se utilizan como un sustituto de cemento o arena, solo afecto en las muestras de curado temprano, las demás son aceptables y pueden ser usadas de forma normal ya que la cantidad de metales o elementos contaminantes no afectan el medio ambiente ni la salud humana.

2.6 HYDRATION CHARACTERISTICS OF WASTE SLUDGE ASH THAT IS REUSED IN ECO-CEMENT CLINKERS⁶

El autor Informa, mediante su investigación, las características de hidratación de los lodos residuales que se reutilizan en el Clinker de cemento ecológico, como inclusión exitosa en la construcción. Las mezclas sometidas a ensayo fueron compuestas de diferentes tipos de lodos de desechos, incluidas las cenizas de lodos de aguas residuales, cenizas de lodos de purificación de agua, piedra caliza y ferrato, que se prepararon usando el método óptimo de dosificación. Las mezclas fueron quemadas en 1400 °C durante 6 h.

El autor, afirmó que la combustión de los biosólidos, traían consigo compuestos tóxicos que pueden incluir C_3S , C_2S y C_3A . Elementos, que comúnmente están presentes en el cemento Portland ordinario y pueden funcionar como aglutinantes y poseer características de endurecimiento. Así, pues un nuevo tipo de cemento Portland se desarrollaría no sólo para resolver el problema de los vertederos, sino también para conservar el medio ambiente mediante la circulación de recursos. Se realizaron tres tipos de Clinker de cemento, eco-preparadas con cenizas de lodos, agua, cemento y piedra caliza o ferrato. Los especímenes, se analizaron mediante las pruebas de tiempo de fraguado y resistencia a la compresión, de 3 a 28 días.

Posteriormente, los resultados resaltaron que la pasta de Eco-cemento B tenía un retraso observado en el tiempo de fraguado que podía ser atribuido a la mayor cantidad de C_2S , que contenía esta mezcla, lo que llevó a una menor resistencia a la compresión. Sin embargo, La resistencia a la compresión de las pastas A y C está dentro de los tiempos de curado y son aceptables para usarlas en el comercio y beneficiar al medio ambiente con su uso.

⁶ K.L. Lin, T. K. (2004). Hydration characteristics of waste sludge ash that is reused in eco-cement clinkers. *Science Direct*, 1074-1081.

2.7 APROVECHAMIENTO DE LODOS ALUMINOSOS GENERADOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN, MEDIANTE SU INCORPORACIÓN, COMO AGREGADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN⁷

Se realizó una investigación acerca del aprovechamiento de lodos aluminosos, generados en plantas de tratamiento de agua potable, mediante su incorporación en materiales de construcción, como agregado o como aditivo.

Al comienzo se efectuaron análisis mineralógicos del lodo y de los materiales a ser reemplazados por éste, el tamaño de partícula y los límites de Atterberg, posteriormente se elaboraron los ladrillos de cerámica, reemplazando la arcilla negra y arena por un porcentaje de lodo de la PTAP, mediante el siguiente proceso, las probetas fueron moldeadas y secadas a temperatura ambiente durante 6 días y posteriormente fueron sometidas a quemado, en este último las probetas fueron horneadas en laboratorio en una mufla. El incremento de la temperatura se dio a una tasa de 100°C cada hora hasta alcanzar 700°C, para ascender directamente a 900°C; en esta temperatura se dejaron durante un tiempo de 6 horas y posteriormente se inició el enfriamiento.

En las pruebas de ensayo, se midió la resistencia a la compresión (Kgf/cm²) y la absorción de humedad (%) en unidades experimentales. Según los resultados obtenidos, el autor, concluye que no es posible utilizar el lodo aluminoso como agregado en ladrillos cerámicos, tanto por su composición mineralógica, como por el tamaño de partícula y la plasticidad, además la resistencia a la compresión no es adecuada, y se pretende que la sustitución de lodos por la arena afecte en forma negativa mayor, comparado con el de arcilla negra.

2.8 USE OF DRY SLUDGE FROM WASTE WATER TREATMENT PLANTS AS AN ADDITIVE IN PREFABRICATED CONCRETE BRICKS⁸

Planteó mediante una investigación, la utilización de lodos secos de origen biológico de una planta de tratamiento ubicada en Sabadell, en España como adición para la elaboración de adoquines de hormigón prefabricado, metodológicamente programó como primera etapa realizar una caracterización a los lodos, para así definir las condiciones de adición de este material. Se prepararon muestras de referencia sin adición, y muestras con el 2% de lodo seco sobre peso de cemento, se determinó como variaban en el tiempo y como respondían a las diferentes pruebas de laboratorio, entre las que se encuentran la densidad, pruebas de porosidad, absorción y resistencia mecánica a la compresión de los adoquines.

⁷ Darwin Hernández, J. D. (2006). APROVECHAMIENTO DE LODOS ALUMINOSOS GENERADOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN, MEDIANTE SU INCORPORACIÓN COMO AGREGADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 119-132.

⁸ A. YAGÜE, S. V. (2002). Use of dry sludge from waste water treatment plants as an additive in prefabricated concrete bricks. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>, 31-41.

Los resultados encontrados, son eficientes, teniendo en cuenta que los adoquines con inclusión de biosólidos, cumplieron con todas las pruebas realizadas e incluso, en la mayoría de casos se obtuvo mayor resistencia con respecto a los adoquines de tipo normal, el autor, propone implementar del 4 al 5% de biosólidos para una próxima prueba ya que resultaron ambientalmente factibles y la incorporación del 2% no generó algún tipo de contaminación.

La anterior revisión bibliográfica, demuestra que la utilización de biosólidos, está siendo considerada como una alternativa óptima para la elaboración de materiales de construcción de todo tipo. Fomentando así, la posibilidad de aprovechar estos subproductos, de residuos de plantas de tratamiento, aportando así cuidado al medio ambiente y beneficiando a la comunidad en general.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 AGUAS RESIDUALES

3.1.1 Definición. Desecho líquido proveniente de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.⁹

El agua residual es aquella que procede del empleo de un agua natural, o de la red, en un uso determinada, aparecen sucias y contaminadas: llevan grasas, detergentes, materia orgánica, residuos de la industria y de los ganados, herbicidas, plaguicidas y en ocasiones algunas sustancias muy tóxicas. Estas aguas residuales, antes de volver a la naturaleza, deben ser depuradas. Para ello se conducen a las plantas o estaciones depuradoras, donde se realiza el tratamiento más adecuado para devolver el agua a la naturaleza en las mejores condiciones posibles.¹⁰

3.1.2 Clasificación.

3.1.2.1 Aguas residuales domésticas, (ARD). Corresponden a las cargas de residuos de origen doméstico y público (lavado de ropa, baño, desperdicios de cocina, limpieza y preparación de alimentos y lavado de loza, etcétera); las zonas residenciales y los centros comerciales constituyen las principales fuentes de generación de ARD, aunque también debe tenerse en cuenta la importante contribución que representan los edificios institucionales y los espacios recreacionales.¹¹

3.1.2.2 Aguas residuales industriales, (ARI). Son las descargas originadas por el desarrollo de actividades correspondientes a la extracción y transformación de recursos naturales de bienes de consumo y satisfactores para la población.

Los contaminantes más comunes de las descargas industriales en general proceden de las siguientes fuentes: Agentes químicos de acondicionamiento de agua para enfriamiento, purga de lodos acumulados en torres de enfriamiento,

⁹ REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO (RAS), T. D. (2000). *SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS Y PLUVIALES*. Bogotá, D.C.: MinDesarrollo.

¹⁰ Ambientum. (2002). Clasificación de aguas residuales industriales. *Revista Ambientum*, 35-37.

¹¹ Raudel Ramos Olmos, Rubén Sepúlveda Marqués, & Francisco Villalobos Moreto. (2002). *El agua en el medio ambiente, Muestreo y análisis*. Mexicali, Baja Californi: UABC: Plaza y Valdes.

lavado de materias primas, procesos de transporte con residuos de producto terminado, desechos ácidos y alcalinos generados en prácticas auxiliares del proceso industrial, como la regeneración de intercambiadores iónicos, lavado de filtros, y limpieza de equipo, metales pesados que se generan en algunos procesos de transformación, etcétera.³

3.2 TRATAMIENTO DE AGUAS

El tratamiento a las aguas residuales consiste en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos para degradar desechos orgánicos y nitrogenados y destruir o inactivar un gran número de agentes patógenos. Por lo general, el cloro (Cl₂) o compuestos clorados, ozono (O₃), o la luz ultra violeta (UV) se utilizan para desinfectar el efluente tratado antes de su vertido a las aguas receptoras.

El grado en que se realice el tratamiento depende fundamentalmente de los límites permitidos por las normas; dependiendo de los niveles de carga contaminante aprobada se deben realizar tratamientos primarios, secundarios y terciarios. En el tratamiento primario se realiza la eliminación de materiales flotantes y sólidos en suspensión; generalmente es un proceso preliminar al tratamiento secundario, proceso en el cual el agua tratada proveniente del tratamiento primario es sometida a una serie de tratamientos biológicos. Dependiendo de la exigencia de las normas se debe realizar un tratamiento terciario cuyo objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.¹²

En la Planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, El Salitre, se contempla el siguiente tratamiento¹³:

3.2.1 Captación. El agua residual llega a través del sistema de alcantarillado sanitario a la Planta. Este sistema de alcantarillado, está diseñado buscando la separación de las aguas residuales y las aguas lluvias. Al separarlas se procura evitar que el agua lluvia se eche a perder tanto como el agua residual.

Las aguas lluvias se conducen a través de un sistema de canales abiertos hasta los humedales y los ríos directamente. La separación también facilita el tratamiento,

¹² Ramalho, R. (1983). *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Reverté, S.A.

¹³ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

pues entre menos diluida llegue el agua residual a la planta, es más fácil remover los residuos contaminantes.

Cuando el agua residual se combina con grandes cantidades de agua lluvia, los residuos se diluyen complicando así su proceso de limpieza. Para ingresar el agua a la planta se utilizan cinco unidades de bombeo llamadas tornillos de Arquímedes o bombas de tornillo. Continuamente estos toman 4m³ por segundo de agua y la ingresan para su tratamiento.

3.2.2 Pretratamiento. El agua es filtrada para despojarla de las basuras, de acuerdo a su tamaño. El agua pasa por unos canales donde se extraen las arenas y las grasas. Aquí mismo se agregan dos productos químicos (Cloruro férrico y polímero) para lograr aglomerar las partículas de contaminación que por su densidad y tamaño quedan suspendidas en el agua. Al agregar los químicos las partículas se adhieren unas a otras y forman grumos llamados flocs. Estos flocs son más pesados que las partículas de las que se formaron, lo que facilita su separación del agua.

3.2.3 Tratamiento Primario. El agua floculada es conducida a tanques Sedimentadores, donde permanece 3 horas con el propósito de asentarla o sedimentarla, separando la materia orgánica (formada por los flocs) que se depositan en el fondo formando una mezcla oscura denominada “lodo” primario. El agua ya tratada es entregada de nuevo al río Bogotá.

3.2.4 Tratamiento de lodos. El lodo primario resultante pasa a los tanques espesadores, donde se le retira el agua de exceso, produciendo lodo espesado. El lodo espesado pasa a los tanques digestores en los cuales a 35 °C, se acelera el proceso de descomposición del mismo por medio de bacterias anaerobias que degradan la materia orgánica. Aquí se produce lodo digerido. El lodo digerido es secado y de esta manera convertido en abono orgánico que es usado en la recuperación de suelos degradados. El nombre técnico de este material es biosólido.

3.2.5 Almacenamiento de lodos digeridos. Los lodos digeridos son almacenados en un tanque equipado con agitadores sumergibles desde donde son extraídos hacia el proceso de deshidratación. El subproducto es almacenado en una estructura abierta con una capacidad de 2700 m³.

3.2.6 Deshidratación de lodos. Por medio de filtros de banda los lodos digeridos son procesados a fin de reducir su volumen y facilitar su transporte y disposición.

En cinco unidades, en las que tiene lugar filtración y presión entre telas, se realiza la separación sólido líquido del lodo hasta lograr un material de consistencia semisólida (torta de lodos) con una concentración de sólidos de aproximadamente 30%. Diariamente se producen 165 toneladas de biosólido con una humedad promedio de 70%. La dosificación media de polímero catiónico empleada en esta operación ha sido de 4,78 kg de polímero por tonelada de material seco.

3.2.7 Producción de biogás. Durante el proceso de digestión se produce biogás que es rico en metano. Alrededor del 30% es usado para calentar los lodos en el proceso de digestión. El biogás restante es quemado en una chimenea llamada tea.

3.3 BIOSÓLIDO

Según la norma Colombiana (RAS 2000), reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, se tienen dos definiciones relacionadas con los subproductos generados en las plantas de tratamiento.

- **Lodo:** líquido con contenido de sólidos en suspensión sin ningún tipo de tratamiento.
- **Biosólido:** sólido proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales, estabilizado biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes (mayores y menores), bajo contenido de microorganismos patógenos y presencia permisible de metales pesados, que puede ser usado como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos; usos que dependen de su composición físico-química y la vocación de uso del suelo.

3.3.1 Contaminantes de los biosólidos.¹⁴ La calidad de los biosólidos depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales:

- **Metales.** Principalmente zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación suscitan preocupaciones. Los metales están siempre presentes, en concentraciones bajas, en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones preocupantes son sobre todo las que se encuentran en las aguas residuales industriales.

¹⁴ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). Los Biosólidos: ¿Una solución o un problema? *P+L*, 57-71.

- **Nutrientes y materia orgánica.** Su peligrosidad radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la materia orgánica.
- **Contaminantes orgánicos.** Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensos activos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos.
- **Agentes patógenos.** Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los tremátodos, los céstodos y los nemátodos. Los residuos de animales sacrificados o muertos accidentalmente, los desechos hospitalarios y funerarios, entre otros, pueden elevar la carga y la diversidad de patógenos en el influente.

3.3.2 Clasificación de los biosólidos.¹⁵

- **Biosólido Clase A.** Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de *Salmonella* sp. Es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales.

La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales. Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas.

- **Biosólido Clase B.** Con una densidad de coliformes fecales inferior a 2×10^6 NMP por gramo de sólidos totales o 2×10^6 UFC por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola. Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios.

¹⁵ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). Los Biosólidos: ¿Una solución o un problema? *P+L*, 57-71.

Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio.

3.3.3 Aprovechamiento del biosólido PTAR “El Salitre”. La deshidratación de los lodos digeridos permite una producción media mensual de biosólido en la PTAR Salitre de 4500 toneladas al mes. Contiene un alto porcentaje de nitratos y fosfatos. Al provenir de la cuenca del río Salitre (principalmente doméstica) no excede el nivel de peligrosidad de concentración de metales pesados según la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por lo que es potencialmente apto como fertilizante orgánico para agricultura y como enmienda de suelos luego de un tratamiento básico que lo transforme en biosólido “tipo A”.¹⁶

En la actualidad el biosólido obtenido en la PTAR Salitre es clasificado como “tipo B”, que lo hace apto directamente para usos de reforestación, pero no para agricultura de consumo. El motivo por el se debe tener en cuenta la normatividad norteamericana para caracterizar nuestro biosólido es que actualmente en Colombia no existe legislación al respecto.

Desde el inicio de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre” usó el biosólido generado, como abono en la cobertura de las celdas clausuradas del Relleno Sanitario Doña Juana, mejorando el crecimiento, desarrollo y resistencia del pasto cultivado. En este momento se utiliza en la conformación de la cobertura vegetal del Predio El Corzo, en donde se requiere iniciar las actividades de cierre y clausura. También tiene otros usos relacionados con investigaciones académicas como las desarrolladas actualmente en la Universidad Santo Tomas y otras.

3.4 MATERIAS PRIMAS

3.4.1 Cemento

3.4.1.1 Definición. El nombre “Cemento” es de origen romano. Los romanos llamaron “opus caementitium” (obra cementicia) a ciertos elementos constructivos del tipo del hormigón, los cuales obtenían a partir de piedra machacada y materiales similares, conglomerados con cal calcinada. Más tarde se designaron como “cementum” aquellos materiales de adición que, añadidos a la cal calcinada,

¹⁶ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

impartían a ésta, propiedades hidráulicas, es decir, capacidad de combinarse con el agua, fraguando y endureciendo en húmedo e incluso bajo agua.¹⁷

La materia prima ideal para la fabricación de cemento es una roca que, en su estado natural posee la composición química necesaria para obtener de ella el Clinker de cemento. En lo posible debería, además, ser abundante, homogénea y fácil de explotar. Las calizas y las arcillas, geológicamente consideradas, son sedimentos consolidados como rocas llamadas por ello sedimentarias. Teniendo en cuenta lo anterior, los componentes principales disponibles para la fabricación de cemento, son, generalmente, las calizas (aportadoras de CaO) y las arcillas (aportadoras de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃). Ambas deben mezclarse según sus propias composiciones químicas y la composición requerida para la mezcla. Sin embargo, no solamente es decisiva la composición global de esta última, sino también la finura y la homogeneidad de las materias primas y de las mezclas de las mismas.

El cemento se obtiene mediante un proceso de cocción a altas temperaturas de las materias primas (calizas y arcillas), en unos enormes hornos giratorios. El producto que sale del horno giratorio se denomina Clinker, cuando a este se añade agua, se hidrata y dosifica progresivamente, en este proceso se desprende calor. Este proceso, básicamente consiste en la descomposición de las materias primas en óxidos, que posteriormente se combinan entre sí, formando lo que se conoce como cemento.¹⁸

3.4.1.2 Clasificación.

- **Cemento natural.** El cemento Natural es una mezcla homogénea natural o artificial de caliza y arcilla, esta con una proporción del 22 al 26 %, es calcinada a una temperatura comprendida entre los 1280 °C y 1350 °C a cuya temperatura se obtiene una fase líquida en mayor o menor grado. En presencia de este líquido se consigue mayor cantidad de silicatos y aluminatos y desciende considerablemente el contenido de CaO libre.

Se obtiene así un producto aglomerado, al que llamamos Clinker de cemento natural, porque incluye una fase líquida cristalizada por enfriamiento. El producto así obtenido es molturado a la finura adecuada para su empleo.¹⁹

¹⁷Virella Bloda Alberto, & Calleja Carrete, J. (1985). *PRONTUARIO DEL CEMENTO* (Vol. 5a Edición). (Editores Técnicos Asociados, S.A., Ed., & 6a Edición Alemana RATGEGER FÜR ZEMENTINGENIEURE, Trad.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 15 de 09 de 2014.

¹⁸ Ruiz Hidalgo, J. (18 de Mayo de 2009). *Componentes y procesos químicos el cemento*. Recuperado el 2014 de 09 de 15, de http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_18/JAVIER_RUIZ_2.pdf

¹⁹ Gomá, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes*. (Editores Técnicos Asociados S.A., Ed.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 01 de 10 de 2014.

- **Cemento portland.** El cemento Portland es el aglomerante hidráulico de mayor importancia, a pesar de que se conoce desde hace poco más de 150 años. Debe su nombre a cemento Portland a su color gris verdoso, parecido al de las rocas de acantilado de la localidad inglesa de Portland. En esencia, se obtiene el cemento Portland por cocción a 1500 °C de mezclas de caliza con arcilla en proporción adecuada y finalmente pulverizadas. El producto conocido es una especie de escoria (Clinker), que después de frío se muele con pequeñas adiciones de yeso (regulador de la velocidad del fraguado) para dar el cemento.²⁰

El Producto llamado Clinker, está constituido por silicatos y aluminatos anhidros, el cual hay que pulverizar junto con yeso, para retardar su fraguado. Es un cemento Moldeable, resistente y duradero, su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se lo con áridos y agua. El endurecimiento de la mezcla ocurre cierto tiempo después del amasado, permitiendo por lo tanto, moldear el producto resultante.²¹

3.4.1.3 Características y aplicaciones.

- **Cemento natural.** Las características de estos materiales aglomerantes son sus tiempos cortos de fraguado en los rápidos y en sus bajas resistencias lo que constituye el motivo principal de sus aplicaciones. Son utilizables para trabajos de albañilería, morteros de agarre, acabados de juntas, revocos, enlucidos, desagües, fosas, pavimentación y en hormigones de relleno a los que no se les exija resistencia de carga; no pueden ser empleados en hormigón estructural.

Su baja resistencia es indicada para la colocación de piezas de materiales cerámicos sin peligro de que estos se agrieten por la excesiva resistencia de un mortero de unión. No obstante, existen actualmente los cementos-cola, de empleo específico para estos casos.

- **Cemento portland.** Las propiedades fundamentales de los cementos Portland son sus resistencias mecánicas (compresión, tracción, flexión). Pero hay otras propiedades que facilitan la conservación o aplicación de estos aglomerantes, como son la resistencia química (al agua de mar, selenitosa, a las aguas carbónicas), la velocidad de reacción con el agua (hidratación), que es previa a su aplicación, y el

²⁰ Vian Ortuño, Á. (Diciembre de 2006). *Introducción a la Química Industrial*. Barcelona : Editorial Reverté S.A. Recuperado el 16 de 09 de 2014.

²¹ Polzinetti, A. (Abril de 2010). *Cemento Portland. Industrias I*. (F. d. UBA, Editor) Recuperado el 16 de 09 de 2014, de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/13_Clase%20Cemento.pdf

calor desprendido en la hidratación, son más efectivos en construcciones de hormigón en grandes masas.²²

En Colombia se producen tres tipos de cemento Portland²³:

- Portland de escoria de alto horno.
- Cemento Portland Pozolánico.
- Cemento Portland adicionado.

Los más comunes en Colombia se encuentran representados en la tabla 1, de acuerdo a su tipo y descripción.

Tabla 1 Tipos de cemento Portland en Colombia

TIPO	DESCRIPCIÓN
PORTLAND TIPO I	Uso común
PORTLAND TIPO II	Moderada resistencia a los sulfatos
PORTLAND TIPO III	Alta resistencia inicial
PORTLAND TIPO IV	Bajo calor de hidratación
PORTLAND TIPO V	Alta resistencia a los sulfatos Cemento portland de escoria de alto horno Cemento portland Pozolánico. Cemento portland adicionado.

Fuente: Asocreto (2006)

3.5 AGREGADOS

3.5.1 Definición.

3.5.1.1 AGREGADO FINO (Arena). Material pétreo, que pasa el tamiz ICONTEC 4,76 mm (N° 4), es decir con granos de un tamaño menor a medio centímetro.²⁴

3.5.1.2 AGREGADO GRUESO (Granito). Material pétreo, retenido en el tamiz 4,76 mm (N° 4), es decir con granos de un tamaño igual o mayor a medio centímetro.

²² Gomá, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes*. (Editores Técnicos Asociados S.A., Ed.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 01 de 10 de 2014.

²³ Asocreto. (2006). Durabilidad y patología del concreto. *Instituto del Concreto, Asocreto*

²⁴ Instituto Colombiano de productores de cemento. (1986). Fabricación de adoquines de concreto. *ICPC*, 1-6.

3.5.2 Características y aplicaciones.

3.5.2.1 Agregado fino (Arena). Se podrá utilizar la misma arena que se usa comúnmente para elaborar el concreto. Deberá ser tan limpia y uniforme como se pueda y se almacenará de tal manera que se pueda manejar sin contaminarla. En lugares lluviosos o en épocas de invierno, la arena se deberá almacenar bajo techo o cubierta con telas impermeables o plásticos para que no se sature; una arena saturada puede tener más agua de la que necesita la mezcla.²⁵

Está libre de arcilla, libre de partículas deleznable, libre de material que pasa el tamiz de 74 micras, libre de partículas livianas (Mica, Carbón, lignito). Libre de sulfatos, materia orgánica, si al hacer el ensayo colorimétrico de contenido de MATERIA ORGÁNICA resulta más oscuro que el color ámbar se rechaza.

Tabla 2 Criterio color aceptación agregado fino

COLOR	#	DE LA CRITERIO DE REFERENCIA ACEPTACIÓN ORGÁNICA
AMARILLO CLARO	1	ACEPTABLE
AMARILLO OSCURO	2	ACEPTABLE
ÁMBAR	3	ACEPTABLE
ÁMBAR OSCURO	4	NO
NEGRO	5	NO

Fuente: Asocreto (2006)

3.5.2.2 Agregado grueso (granito). El índice de aplanamiento y alargamiento debe ser <15%. Desgaste en la máquina de los ángeles <40%.

En el caso de los adoquines, si el tamaño máximo es igual o menor que el recomendado será más fácil obtener superficies lisas, bien terminadas y el manejo de la mezcla también será más fácil; si por el contrario el tamaño máximo es mayor, se dificultará el manejo de la mezcla y tenderán a aparecer irregularidades en el acabado de los adoquines. (Instituto Colombiano de productores de cemento, 1986).

²⁵ Instituto Colombiano de productores de cemento. (1986). Fabricación de adoquines de concreto. *ICPC*, 1-6.

3.5.3 Granulometría de los agregados. A Se recomienda buscar una granulometría completa (arena y agregado grueso) lo más cercana posible a la siguiente:

Tabla 3 Granulometría típica agregados para concreto

TAMIZ		% QUE PASA (EN PESO)
NORMA ICONTEC 32	DESIGNACIÓN ALTERNA	
12,70 mm	1/2"	100
9,51 mm	3/8"	100
4,76 mm	N° 4	85
2,38 mm	N° 8	65
1,19 mm	N° 16	50
595 μ	N° 30	35
297 μ	N° 50	15
149 μ	N° 100	5
74 μ	N° 200	3

Fuente: Norma Técnica Colombiana 174

3.6 AGUA

3.6.1 Definición. El agua es el componente del concreto que entra en contacto con el cemento generando el proceso de hidratación, que desencadena una serie de reacciones que terminan entregando al material sus propiedades físicas y mecánicas, su buen uso se convierte en el parámetro principal de evaluación para establecer el eficiente desempeño del concreto en la aplicación.²⁶

3.6.2 Clasificación del agua en el concreto.

3.6.2.1 Agua de mezclado. Cantidad de agua que requiere el concreto por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco.

²⁶ Osorio, J. D. (2010). Hidratación del concreto: Agua de curado y Agua de Mezclado. 360 ° EN CONCRETO, 1-3.

3.6.2.2 Agua de curado. Es la cantidad de agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fue diseñado. Este proceso adicional es muy importante en vista de que, una vez colocado, el concreto pierde agua por diversas situaciones como: altas temperaturas por estar expuesto al sol o por el calor reinante en los alrededores, alta absorción donde se encuentra colocado el concreto, fuertes vientos que incrementan la velocidad de evaporación.

Aunque en la actualidad existen productos que minimizan la pérdida superficial del agua, en el caso de que no sean utilizados se requiere adicionársela periódicamente a los elementos contruidos para que alcancen el desempeño deseado.

3.7 ADOQUÍN DE CONCRETO

3.7.1 Definición. Elemento de concreto prefabricado, de forma prismática, de reducido tamaño, que se utiliza como material para construcción de capas de rodadura de pavimentos.²⁷

Elemento no aligerado en su masa, de concreto, prefabricado, con forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos tales que en conjunto permiten conformar una superficie que se utiliza como capa de rodadura en los pavimentos y en algunos casos, en los pisos recubiertos con adoquines de concreto.²⁸

3.7.2 Partes del Adoquín

3.7.2.1 Cara de desgaste. Cara superior del adoquín la cual queda a la vista en el pavimento y soporta directamente el tránsito.

3.7.2.2 Arista. Línea de intersección entre dos planos o caras. Por lo general se hace referencia a la que conforma la cara de desgaste y las paredes.

3.7.2.3 Cara de apoyo. Cara inferior del adoquín que queda en contacto con la capa de arena que lo soporta.

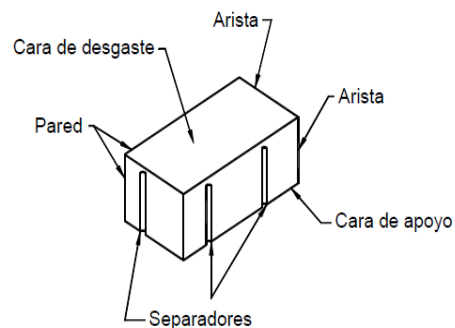
²⁷ Sanchez Sagobal, F. (s.f.). *Copernico Escuela-VIAS*. Recuperado el 20 de 09 de 2014, de http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/pag_glosario/Glosario/A.pdf

²⁸ Norma Tecnica Colombiana (NTC). (2004). *Adoquines de Concreto para pavimentos* (Vol. Segunda Actualización). Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado el 15 de 06 de 2014

3.7.2.4 Pared, cara lateral. Cada una de las caras laterales y verticales del adoquín que están en contacto con otros adoquines vecinos a través de la junta que conforman entre ellos.

3.7.2.5 Separadores. Cada una de las salientes verticales generadas sobre las paredes de los adoquines para garantizar una separación adecuada y uniforme entre adoquines contiguos.

Figura 1 Partes de un adoquín



Fuente: NTC 2017

3.7.2.6 Capa superior, capa superficial. Capa que conforma la cara de desgaste en los adoquines bicapa.

3.7.2.7 Bisel. En los adoquines biselados o parcialmente biselados es el perfil inclinado (generalmente un plano a 45°) que, reemplaza la arista que conforma la cara de desgaste y las paredes.

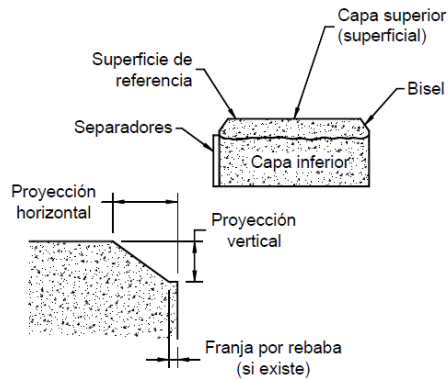
3.7.2.8 Superficie de Referencia. En los adoquines no biselados, es la superficie que corresponde a la cara de desgaste; y en los biselados, corresponde a la cara de desgaste sin tomar en cuenta el volumen del prisma sustraído por la presencia del bisel.

3.7.2.9 Capa Inferior. Capa debajo de la capa superficial de los adoquines bicapa que constituye la mayoría de la masa de los mismos.

3.7.2.10 Proyección Horizontal del bisel. Es la proyección del perfil del bisel sobre la superficie de referencia (prolongación de la cara de desgaste) del adoquín, incluyendo la franja por rebaba, si existe.

3.7.2.11 Proyección vertical del bisel. Es la proyección del perfil del bisel sobre la pared del adoquín.

Figura 2 Partes de un adoquín (corte)



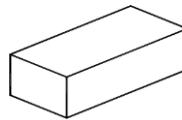
Fuente: NTC 2017

3.7.3 Clasificación.

3.7.3.1 Según la geometría general

- **Adoquín estándar:** Es el adoquín que en conjunto conforma una superficie continua, a excepción de la junta estándar. Por lo general, se denomina simplemente como adoquín.

Figura 3 Adoquín no biselado

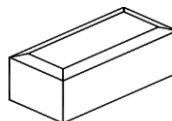


Fuente: NTC 2017

3.7.3.2 Según sus aristas

- **Adoquín biselado:** Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en todas sus aristas.

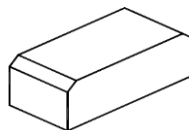
Figura 4 Adoquín biselado



Fuente: NTC 2017

- **Adoquín parcialmente biselado:** Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en algunas de sus aristas.

Figura 5 Adoquín parcialmente biselado



Fuente: NTC 2017

3.7.3.3 Debido a la forma

- **Adoquín Tipo 1, adoquín rectangular:** Es el adoquín con una forma única, básicamente rectangular, que se puede colocar siguiendo diversos patrones de colocación como espina de pescado, hileras, tejido de canasto, etc.

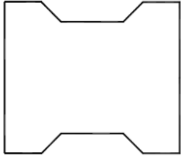
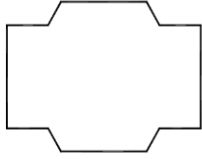
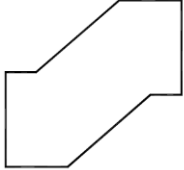
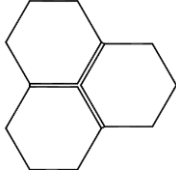
Figura 6 Clases de Adoquín Tipo I

Adoquín recto	Adoquín Angulado	Adoquín ondulado
Adoquín Uni-Decor	Adoquín Super-Decor	Adoquín Tipo V

Fuente: NTC 2017

- **Adoquín Tipo 2, adoquín no rectangular:** Es el adoquín con forma única, diferente a la rectangular, que sólo se puede colocar siguiendo un sólo patrón de colocación en hileras. Algunas de las variantes de forma del adoquín Tipo 2, se observan en la figura 7.

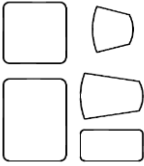
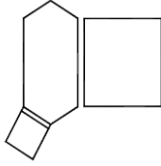
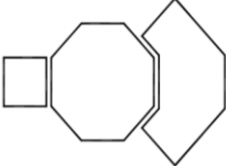
Figura 7 Clases de Adoquín Tipo 2

Adoquín Hueso de Perro o "I"	Adoquín "Cruz"
	
Adoquín "Vollverbund"	Adoquín "Trébol"
	

Fuente: NTC 2017

- **Adoquín Tipo 3, sistema de adoquines:** Son los adoquines de dos o más formas que conforman una superficie completa siguiendo uno o varios patrones de colocación. Algunas de las variantes de forma del adoquín Tipo 3 son los sistemas:

Figura 8 Clases de Adoquín Tipo 3

Adoquín Tipo 3 (Clásico)	Adoquín Tipo 3 (Simetría)	Adoquín Tipo 3 "Figura"
		

Fuente: NTC 2017

3.7.4 Dimensionamiento del adoquín

- **Longitud:** La longitud nominal de los adoquines no debe ser menor de 50 mm ni mayor de 250 mm.
- **Ancho:** El ancho nominal de los adoquines no debe ser menor de 50 mm.

- **Espesor:** El espesor estándar de los adoquines no debe ser menor de 60 mm.
- **Junta estándar:** El ancho de la junta estándar debe ser de 2 mm.
- **Bisel:** El bisel debe tener igual forma o perfil en toda su longitud de mínimo 3 mm y máximo 7 mm.

3.8 PAVIMENTOS DE ADOQUÍN

3.8.1 Definición y características. Su capa de rodadura está conformada por adoquines de hormigón, colocados sobre una capa de arena y con un sello de arena entre sus juntas. De la misma manera que los pavimentos de asfalto, pueden tener una base, o una base con una sub-base, que pueden tener espesores ligeramente menores que los utilizados para los pavimentos de asfalto. También se consideran pavimentos flexibles y son del color gris claro del hormigón. Los pavimentos de adoquines de hormigón son una vieja idea (los pavimentos de piedra), traída al presente, pero con un nuevo material (el hormigón); con inmensas ventajas sobre los de piedra o los de arcilla cocida.²⁹

Pavimento cuya capa de rodadura está conformada por adoquines de concreto colocados sobre una capa de arena y un sello de arena en las juntas entre adoquines. Esta capa de rodadura va colocada sobre la estructura de base (base o base y subbase) de espesores y materiales adecuados (definidos por el diseñador estructural del pavimento), que junto con la capa de rodadura le dan la capacidad estructural al pavimento de adoquines de concreto, el cual se comporta como un pavimento flexible.³⁰

²⁹ Instituto de cemento Portland Argentino. (s.f.). *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES*. Recuperado el 20 de 09 de 2014, de <http://www.icpa.org.ar/publico/files/pavadoq.pdf>

³⁰ Norma Técnica Colombiana (NTC). (2004). *Adoquines de Concreto para pavimentos* (Vol. Segunda Actualización). Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado el 15 de 06 de 2014

4. METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO METODOLÓGICO

4.1.1 Definición de hipótesis, variables e indicadores.

4.1.1.1 Hipótesis de investigación. Los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre” de la ciudad de Bogotá, pueden ser incluidos como materia prima en la elaboración de adoquines de concreto para pavimentos, teniendo en cuenta el diseño de mezcla y el proceso de elaboración de la planta PREFABRICADOS DEL SOL LTDA de la ciudad de Sogamoso, verificando el cumplimiento de los requisitos de la NTC 2017; esto en base a una investigación experimental.

4.1.1.2 Definición conceptual de variables.

- Variables independientes:

Porcentaje de biosólido adicionado a la mezcla: En esta investigación se usó el subproducto biosólido de la PTAR “El salitre” de la ciudad de Bogotá, como materia prima. Niveles de la variable (0%, 5%, 10% y 15%).

- Variables dependientes:

Resistencia a la flexotracción: Se mide en MPa, y se realiza de acuerdo a la norma NTC 2017.

Absorción de agua: Se mide en porcentaje (%), medida de la cantidad de agua que absorbe el adoquín, se realiza de acuerdo a la NTC 2017.

Densidad: se mide en kg/m^3 , se realiza de acuerdo a la NTC 2017.

- Variables intervinientes:

Tamaño partículas agregado, contenido de humedad proceso de elaboración, conformado, y curado de los adoquines.

4.2 RECOLECCIÓN MATERIA PRIMA

4.2.1 Muestra de biosólidos. La muestra de biosólido se toma de la PTAR EL SALITRE; planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bogotá, en donde se generan aproximadamente 4500 toneladas al mes de este residuo.

Figura 9 Ubicación PTAR Bogotá



Fuente: Google Earth

4.2.1.1 Recolección del biosólido. Para la recolección de biosólidos se tendrá en cuenta la guía NTC-ISO 5667-13 (Gestión Ambiental, Calidad del agua. Parte 13, que se refiere al muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas.³¹

4.2.1.2 Revisión del lugar para el muestreo. Se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR El Salitre, el día 15 de agosto del año 2014; con el fin de determinar cuál es el lugar óptimo, para realizar una toma de muestra manual. Se define como mejor alternativa, hacer el muestreo en las bandas transportadoras.

Figura 10 Revisión lugar para muestreo biosólido



Fuente: Autor

³¹(INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y GESTIÓN AMBIENTAL, 1998. 21 p.)

4.2.1.3 Muestreo desde bandas transportadoras. El proceso se realiza de forma manual, con pala, la recolección incluye el ancho total de la banda transportadora.

4.2.1.4 Tipo de muestreo. El tipo de muestreo es aleatorio, en un lugar puntual de la banda transportadora, con el fin de que la muestra de biosólidos no se vea alterada.

4.2.1.5 Almacenamiento, preservación y manipulación. La muestra total se recogió y almacenó en bolsas plásticas de polietileno, selladas herméticamente, con el fin de evitar escapes o alteración en la humedad, además se protegen cada instante de fuentes directas de calor.

Figura 11 Almacenamiento de biosólido



Fuente: Autor

4.2.1.6 Secado del biosólido. La muestra del biosólido, se lleva a un proceso de secado, bajo una caseta construida con plástico, el proceso consiste en dejar secar totalmente el biosólido a temperatura ambiente de 18 a 20 °C, con el fin de realizar el proceso de tamizado con más facilidad.

Figura 12 Secado del biosólido



Fuente: Autor

Se revisa el proceso de secado, día de por medio, realizando volteos y distribuyendo la muestra de biosólido.

4.3 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS

Se realizan diferentes ensayos tanto al granito como a la arena, teniendo en cuenta las normas técnicas colombianas e INVIAS establecidas, a continuación se mencionan las que se van a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

Tabla 4 Ensayos a realizar materias primas

MATERIAL	ENSAYO
GRANITO	I.N.V.E. – 213 – 13 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.
	I.N.V.E. – 223 – 13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado grueso.
	Prueba de humedad.
ARENA	I.N.V.E. – 213 – 13 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.
	I.N.V.E. – 222 – 13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado fino.
	I.N.V.E. – 245 – 13 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión Micro-Deval.
	I.N.V.E. – 133 – 13 Equivalente de arena.
	Prueba de humedad.
BIOSÓLIDO	Al biosólido se le realizara un ensayo de tamizado según la granulometría de la arena a reemplazar.
	Caracterización química del biosólido.
	Prueba de Humedad

Fuente: Autor

4.3.1 Granulometría granito y arena. Teniendo en cuenta la norma I.N.V.E. – 213 – 13 se tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio del tamizado.

Para el proceso se dispuso de una serie adecuada de tamices, (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200.) La cantidad de muestra usada, tanto para el agregado grueso como el fino, es de 1 Kg.

Figura 13 Tamices agregados



Fuente: Autor

Después de tener las muestras de los agregados de acuerdo a las indicaciones y procedimientos de la norma, se decidió realizar tamizado manual, ya que la cantidad de muestra no amerita usar la tamizadora mecánica. Los datos registrados hacen referencia al peso retenido en cada tamiz.

Figura 14 Agregados (Granito y arena)



Fuente: Autor

4.3.2 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado grueso. De acuerdo a la norma I.N.V.E. – 223 – 13 este ensayo tiene como objeto principal determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. En este proceso se sumerge en agua una muestra del agregado durante un periodo de 24 horas, para que las partículas llenen sus poros permeables, posteriormente se lava el material y con un paño se limpia el líquido superficial y se ingresa en una cesta para el pesaje al aire y sumergido con lo cual se determina la densidad aparente, nominal y absorción que requiere el agregado grueso.

Figura 15 Prueba absorción de agua granito



Fuente: Autor

4.3.3 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado fino. En este ensayo se determina como objetivo principal la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), teniendo en cuenta la norma I.N.V.E. – 222 – 13.

En el desarrollo de esta prueba se seleccionan 1500 g de arena, este se sumerge en agua durante un periodo de 24h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra (o parte de ella) se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por medio del picnómetro, finalmente la muestra se seca al horno y se determina su masa seca.

Figura 16 Prueba absorción y densidad de arena



Fuente: Autor

4.3.4 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval. Según la norma I.N.V.E. – 245 – 13, se describe el proceso mediante el cual se mide la resistencia a la degradación por abrasión de una muestra de agregado fino utilizando el aparato de micro Deval, en este ensayo se seleccionan 500 g de arena, que cumplan con la granulometría normalizada estipulada en los requisitos de la norma.

Figura 17 Prueba Micro-Deval



Fuente: Autor

Por medio de este ensayo se busca determinar cuál es el porcentaje de pérdida de material granular fino, por el desgaste, que le proporcionan las esferas de acero después de una carga abrasiva.

4.3.5 Equivalente de arena. Según la norma I.N.V.E. – 133 – 13, se tiene por objeto principal determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos, en este caso la arena, teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la norma, este ensayo consiste en escoger una muestra de arena, que pase el tamiz N°4, aproximadamente 500 g del mismo.

Figura 18 Prueba equivalente de arena



Fuente: Autor

4.3.6 Granulometría biosólido. La granulometría del biosólido fue basada bajo la norma I.N.V.E. – 213 – 13 (Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino). En este ensayo se utilizaron 3,5 Kg de biosólido.

Inicialmente se realiza la reducción del tamaño de las partículas del biosólido, para facilitar el tamizado del material. Se usó una lona para poner encima la muestra a reducir, y se utilizan herramientas como el pisón y el martillo, todo el proceso se realiza manualmente con muestras pequeñas de biosólido y así facilitar el trabajo.

Figura 19 Muestra biosólido



Fuente: Autor

Los tamices seleccionados son (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°30, N°50, N°200), en este caso por tratarse de más cantidad de material se usó la tamizadora mecánica.

Figura 20 Tamizado biosólido



Fuente: Autor

4.3.7 Caracterización química del biosólido. En Colombia actualmente no existe una norma, que clasifique los biosólidos, según su composición química, por tanto se usó como referencia la norma Norteamericana establecida en el código de Registro Federal, título 40 Parte 503 de la agencia de protección ambiental-EPA; esta norma establece los criterios importantes en cuanto a manejo de biosólidos, y

los parámetros relacionados con el contenido de metales pesados, calidad microbiológica, etc.

Con respecto a la prueba de caracterización química realizada a la muestra de biosólido, se basó en una prueba de laboratorio ejecutada en la ciudad de Bogotá en el laboratorio ambiental de la Universidad de los Andes, en la Cra. 1E No. 19 A 40 Edificio Mario Laserna Piso 4. (VER ANEXO 15).

4.3.8 Contenido de humedad. Expresado como el porcentaje del peso de agua en una masa dada de material, al peso de las partículas sólidas. Se determinó el contenido de humedad para la arena, el granito y el biosólido.

Figura 21 Prueba de Humedad muestras



Fuente: Autor

4.4 ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN

La elaboración del adoquín, se realizó con la empresa PREFABRICADOS DEL SOL LTDA, ubicada en el Parque Industrial de la ciudad de Sogamoso en la carrera 11 No. 50-55, la empresa posibilita fabricación de postes para redes eléctricas y telefónicas, tubos en concreto simple y reforzado, bloque de concreto y escoria, adoquines, vigueta losa, tapas para alcantarillado, poste para cerca, rejillas sumidero, y bordillos.

En cuanto al uso de materiales se tienen la siguiente información: Cemento Holcim Tipo 1, el agregado fino es suministrado por la cantera, “Proveedora Héctor Reyes” ubicada en la ciudad de Sogamoso, el granito por la empresa “central de triturados”, de la ciudad de Duitama, el agua es obtenida directamente del grifo, gracias a la empresa Coservicios SA ESP de la ciudad de Sogamoso.

Figura 22 Ubicación fábrica prefabricados del Sol LTDA



Fuente: Google Earth

4.5 ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN

Teniendo en cuenta que dentro de los objetivos de la investigación se encuentra determinar la influencia del biosólido sobre las propiedades mecánicas del adoquín de concreto, según la NTC 2017, se dispuso del diseño de mezcla y especificaciones que brinda la empresa PREFABRICADOS DEL SOL LTDA, de la ciudad de Sogamoso.

Teniendo en cuenta lo anterior se decidió elaborar un adoquín Tipo 1, rectangular biselado.

4.5.1 DIMENSIONES.

- Longitud: 200 mm
- Ancho: 10 mm
- Espesor: 60 mm
- Bisel: 3 mm

4.5.2 Número de especímenes. Para las pruebas a realizar en la NTC 2017 se recomienda tener 10 especímenes; 5 para las pruebas de absorción de agua y

densidad; y 5 para las pruebas de resistencia a la flexo tracción. Se tienen en cuenta dos variables definidas; la primera: el porcentaje de biosólido a incorporar (0%, 5%, 10%, 15%), y la segunda los días de curado, para realizar los análisis mecánicos a los adoquines (14, 28 y 42 días).

El número total de elementos cerámicos a elaborar es de 120 adoquines, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Numero de adoquines por porcentaje de biosólido

DÍAS	% BIOSÓLIDOS			
	0	5	10	15
14	10	10	10	10
28	10	10	10	10
42	10	10	10	10

Fuente: Autor

Se realizan 4 mezclas con 30 adoquines cada una, teniendo en cuenta el porcentaje de biosólido a agregar con los días de curado y adicional los ensayos a realizar. Los adoquines serán divididos teniendo en cuenta la tabla 6.

Tabla 6 Ensayos a realizar adoquines según fecha de curado

# Adoquines	Días de curado	Ensayo
5	14	Análisis de apariencia y medición. Módulo de Rotura
5	14	Análisis de apariencia y medición. Ensayo de absorción de agua y densidad.
5	28	Análisis de apariencia y medición. Módulo de Rotura
5	28	Análisis de apariencia y medición. Ensayo de absorción de agua y densidad.
5	42	Análisis de apariencia y medición. Módulo de Rotura
5	42	Análisis de apariencia y medición. Ensayo de absorción de agua y densidad.
30	TOTAL ADOQUINES	

Fuente: Autor

4.6 DISEÑO DE LA MEZCLA.

El concreto está compuesto por agregados finos y gruesos, adicionalmente también es necesaria la implementación de agua y cemento, para lograr una mezcla homogénea que cumpla con las pruebas requeridas.

4.6.1 Propiedades del cemento. El cemento a utilizar debe cumplir con ciertos criterios, propiedades y características, entre las que se encuentran peso específico, superficie específica, consistencia normal, tiempos de fraguado, resistencia composición química. Toda esta información contando con la buena calidad que brinda la empresa productora del material, en este caso Holcim.

4.6.2 Calidad del agua. El agua a utilizar debe cumplir con las tolerancias de concentración máxima de impurezas en el agua de mezclado y de curado; adicionalmente también debe tenerse en cuenta criterios físicos y mecánicos de aceptación del agua respecto a los tiempos de fraguado y la resistencia del concreto producido con ella.

4.6.3 Propiedades del agregado. Debido a que el concreto esta constituido en su mayor parte por agregados (70% o más en volumen), la siguiente información es importante: origen y propiedades petrográficas y mineralógicas, análisis granulométrico, forma y textura superficial de las partículas, peso específico aparente, capacidad de absorción de agua, contenido natural de humedad, masa unitaria, contenido de finos y sustancias perjudiciales.

Cabe resaltar que el diseño de mezcla a utilizar hace parte de las características y parámetros ofrecidos por la fábrica “PREFABRICADOS DEL SOL LTDA” de la ciudad de Sogamoso, esto con el fin de cumplir con unos de los objetivos de la investigación y comprobar que variación causa la inclusión de biosólido en la mezcla general que usa la empresa y que cumple con las propiedades mecánicas descritas en la norma técnica colombiana NTC 2017.

4.7 PROPORCIONES Y MEZCLA DE MATERIALES.

Las mezclas otorgadas, se basan teniendo en cuenta la cantidad de biosólido a incorporar (0%, 5%, 10% y 15%), el número de adoquines. (30 por mezcla).

El biosólido a incorporar se reemplaza directamente de acuerdo al contenido de arena. (Ver tabla 7).

Tabla 7 Proporciones de mezcla por incorporación de biosólido

MATERIAL	MEZCLA			
	1 → (0% Biosólido)	2 → (5% Biosólido)	3 → (10% biosólido)	4 → (15% biosólido)
BIOSÓLIDO (L)	0	1	2	3
CEMENTO (kg)	15	15	15	15
AGUA (L)	3,5	3,5	3,5	3,5
ARENA (L)	20	19	18	17
GRANITO (L)	20	20	20	20

Fuente: Fabrica prefabricados del SOL Ltda, Modificada Autor

Para garantizar que cada adoquín de las mezclas 2,3 y 4 posea cantidades exactas de biosólido a reemplazar, se hicieron mini-mezclas, es decir por cada adoquín, una mezcla aparte, para un total de 30 mezclas. Las cantidades a utilizar son las siguientes:

Tabla 8 Proporciones mezcla por adoquín

MATERIAL	MEZCLA POR ADOQUÍN		
	2 → (5% Biosólido)	3 → (10% biosólido)	4 → (15% biosólido)
BIOSÓLIDO (L)	0,033	0,066	0,1
CEMENTO (kg)	0,5	0,5	15
AGUA (L)	0,12	0,12	3,5
ARENA (L)	0,63	0,6	0,57
GRANITO (L)	0,67	0,67	0,67

Fuente: Autor

4.8 PROCESO DE ELABORACIÓN

4.8.1 Mezcla 1. En esta mezcla se hizo uso de una balanza y recipiente para la dosificación del cemento y un balde con medidas de volumen en L, para el suministro de arena, grava y agua.

Figura 23 Cantidad de materias primas, elaboración adoquines



Fuente: Autor

Luego de tener las cantidades de materiales a usar, sin presencia de biosólido en este caso, se hizo uso de la mezcladora mecánica, en la que se forma una composición homogénea y confiable para la elaboración de los adoquines.

4.8.2 Mezclas 2, 3 y 4. En este caso por tratarse de mezclas con cantidades muy pequeñas, la distribución y mezcla se realizó manualmente por cada adquin, y se usaron recipientes mas pequeños, balanza para medir las cantidades; y un balde para realizar la mezcla general.

Figura 24 Proceso elaboración adoquines individualmente



Fuente: Autor

El conformado de los adoquines se realizó en las instalaciones de la empresa PREFABRICADOS DEL SOL LTDA, de la ciudad de Sogamoso, la cual cuenta con una máquina que permite realizar producciones en serie con óptima calidad y en una gran diversidad de formas y dimensiones.

En este caso se eligió la forma de adoquín rectangular, biselado. La máquina garantiza la elaboración de 8 adoquines por cada 8 minutos, cuenta con dos bandejas de 4 moldes cada una, al lado y lado del apisonador mecánico, cada obrero dispone y hace uso de una bandeja.

La máquina cuenta con una presión de compactación de aproximadamente 1500 PSI, (106 kg/cm^2), lo que hace que los adoquines a pesar de la poca cantidad de agua que tienen, ofrezcan una forma y textura resistente. La forma de funcionamiento de la máquina, depende del rendimiento del obrero, para proporcionar la mezcla al molde.

El proceso consiste en agregar las mezclas correspondientes a la bandeja, posteriormente se traslada el molde a la mitad de la máquina donde se encuentra el apisonador mecánico, el cual es el responsable de darle la compactación necesaria al adoquín. Finalmente se retira y limpia por encima con brocha e inmediatamente se pueden pasar al proceso de curado.

4.9 MARCADO DE ESPECÍMENES

Teniendo en cuenta que se realizaron 30 adoquines por cada mezcla, dividido en 3 periodos de falla, (14, 28 y 42 días), y el porcentaje de biosólido incorporado (0%, 5%, 10%, y 15%). Se definió una nomenclatura de acuerdo a las condiciones descritas.

Inmediatamente como se elaboran los adoquines, estos se colocan sobre una estiba o soporte de madera, y se marcan con pintura roja, de aceite.

La nomenclatura escogida es la siguiente:

(0B14, 0B28, 0B42).

(5B14, 5B28, 5B42).

(10B14, 10B28, 10B42).

(15B14, 15B28, 15B42).

Figura 25 Marcado especímenes



Fuente: Autor

De acuerdo a lo anterior:

(0B= Cero (%) por ciento de biosólido posee el adoquín)

(5B= Cinco (%) por ciento de biosólido posee el adoquín)

(10B= Diez (%) por ciento de biosólido posee el adoquín)

(15B= Quince (%) por ciento de biosólido posee el adoquín)

(14,28 y 42= Fecha de falla de los adoquines y/o fecha de pruebas de absorción de agua y densidad.)

4.10 PROCESO DE CURADO

De acuerdo al diagnóstico realizado a la empresa PREFABRICADOS DEL SOL LTDA, de la ciudad e Sogamoso, el tipo de curado usado, consiste en rociar agua a los adoquines 2 veces al día, hasta su momento de comercialización, generalmente 28 días después de su elaboración.

Sin embargo, se optó por tomar recomendaciones de acuerdo a la revisión del estado de arte, efectuando un curado por inmersión en agua, con el fin de acelerar el proceso de hidratación de los especímenes, y generar mayores resistencias.³² De acuerdo a lo anterior, los especímenes estarán sumergidos hasta la realización de

³²J. Monzó, J. P.-M. (1999). Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content. *Science Direct*, 87-94

las pruebas de flexotracción, absorción de agua y densidad; es decir 14, 28 y 42 días desde su fecha de elaboración.

Figura 26 Proceso curado Especímenes



Fuente: Autor

4.11 ANÁLISIS DE APARIENCIA Y MEDICIONES

Teniendo en cuenta la norma técnica colombiana 2017, Para evaluar el acabado y textura, se deben colocar los cinco especímenes de la muestra y realizar el siguiente procedimiento.

Se utilizaron cinco adoquines enteros y para tomar sus dimensiones se utilizó un calibrador de regla con divisiones cada 0,1 mm y cinta métrica.

Figura 27 Análisis mediciones adoquines



Fuente: Autor

4.12 ANÁLISIS ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD

Para este ensayo se utilizaron cinco adoquines de la muestra después de haberles efectuado las mediciones. Inicialmente se secaron en un horno ventilado a una temperatura entre 100 °C y 115 °C. Estos deben quedar separados entre sí como mínimo 25 mm. Se deben secar durante un periodo mínimo de secado de 24 h.

Figura 28 Análisis absorción de agua y densidad



Fuente: Autor

Una vez obtenida la masa seca, los especímenes se retiraron del horno y se dejaron enfriar, a temperatura ambiente, 18 a 20°C.

Figura 29 Enfriamiento adoquines



Fuente: Autor

Los especímenes de ensayo se sumergieron durante $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ dentro de un recipiente lleno de agua a una temperatura de 18°C tomada en las pruebas de laboratorio.

Figura 30 Adoquines sumergidos totalmente en agua



Fuente: Autor

Luego de este período de saturación se pesaron los especímenes sumergidos en agua suspendidos mediante un alambre para obtener su masa inmersa en agua y suspendida (Ma). Posteriormente se retiraron del agua y se deben dejar escurrir durante 1 min, se debe secar luego el agua superficial con un paño seco y se pesan inmediatamente para obtener su masa saturada (húmeda) (Mh).

4.13 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXO TRACCIÓN

Una vez evaluadas la apariencia y las dimensiones, y encontrada la absorción de agua y densidad. Los especímenes permanecieron saturados, por inmersión, teniendo en cuenta su proceso de curado, luego se retiraron del agua y se dejaron escurrir durante 1 min.³³

³³ (Norma Técnica Colombiana (NTC), 2004)

Figura 31 Preparación adoquines antes de su falla



Fuente: Autor

Cada espécimen se llevó hasta la rotura por flexión, como una viga simplemente apoyada, cuyo eje debe coincidir con el eje mayor del rectángulo inscrito mediante la aplicación de una carga uniformemente distribuida a lo ancho del espécimen y sobre la proyección en la superficie de desgaste del eje menor del rectángulo inscrito. La primera y segunda falla se realizó en el laboratorio López Hermanos de la ciudad de Tunja, es decir a los 14 y 28 días, y la última falla se realizó en el laboratorio de ingeniería civil de la universidad Santo Tomas de Aquino Tunja.

Figura 32 Máquina módulo de rotura (López Hermanos y USTA Tunja)



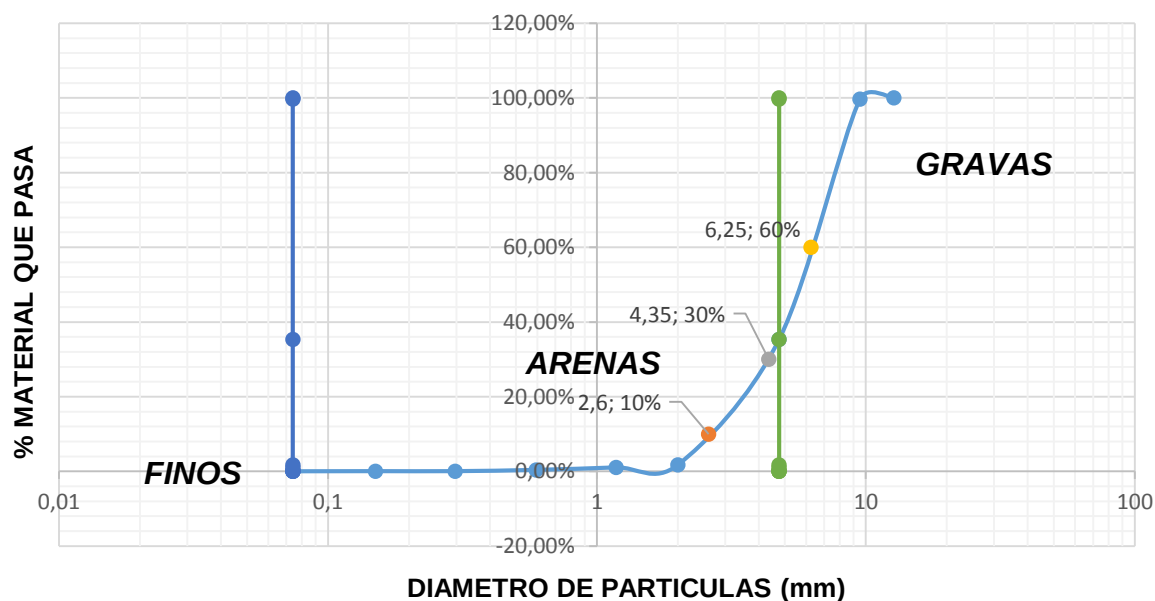
Fuente: Autor

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS

5.1.1 Granulometría granito. De acuerdo a la caracterización física realizada al granito, se pudo encontrar a partir del ensayo de granulometría (**Ver Anexo 1**), que se trata de un material de partículas de grano pequeño a mediano en su mayoría, considerado en el **sistema unificado**³⁴, como un material granular, y suelo tipo GW, lo que quiere decir que es una grava bien gradada, mezclada con arena y muy poca cantidad de finos, como se observa en la tabla 9.

Gráfica 1 Granulometría granito



Fuente: Autor

La grafica 1 definió, los coeficientes de uniformidad y de curvatura, en los que se puede precisar que no hay cambio apreciable en el tamaño de las partículas, es decir, se trata de una muestra uniforme, que puede ser muy estable, y que posee secciones permeables.

³⁴Suarez, J. (2009). *Geotecnia Básica*. Procedimiento auxiliar para la identificación de suelos. Sistema unificado Figura 3.4.

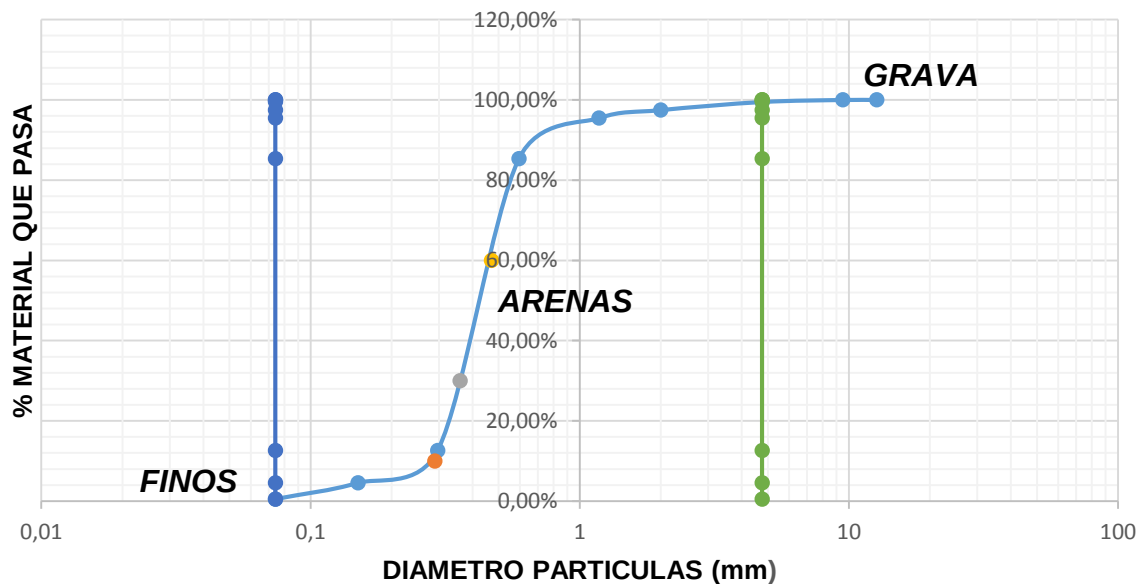
Tabla 9 Porcentaje de material presente en el Granito

% GRAVA	64,07%
% ARENA	35,30%
% FINOS	0,03%

Fuente: Autor

5.1.2 Granulometría arena. En el ensayo de granulometría por tamizado realizado a la arena, se pudo identificar el suelo como una arena tipo SP, en el **sistema unificado**³⁵, lo que quiere decir que es un material razonablemente estable. Revisando las características de los suelos SP, se consideran arenas mal gradadas y gravosas con nada o poca cantidad de finos, como se observa en la siguiente tabla.

Gráfica 2 Granulometría arena



Fuente: Autor

Según los cálculos realizados (**Ver anexo 2**), y la gráfica granulométrica (Gráfica 2) se puede definir que el módulo de finura de la arena es de 2.05, lo que quiere decir que es una arena fina, lo que resulta muy bueno ya que se busca un adoquín con contextura suave y que proporcione manejabilidad a la masa de concreto, y se

³⁵ *Ibíd.*, pág. 58

acomoda dentro de los intersticios del mismo, lo que resulta muy bueno para la elaboración de los especímenes.³⁶

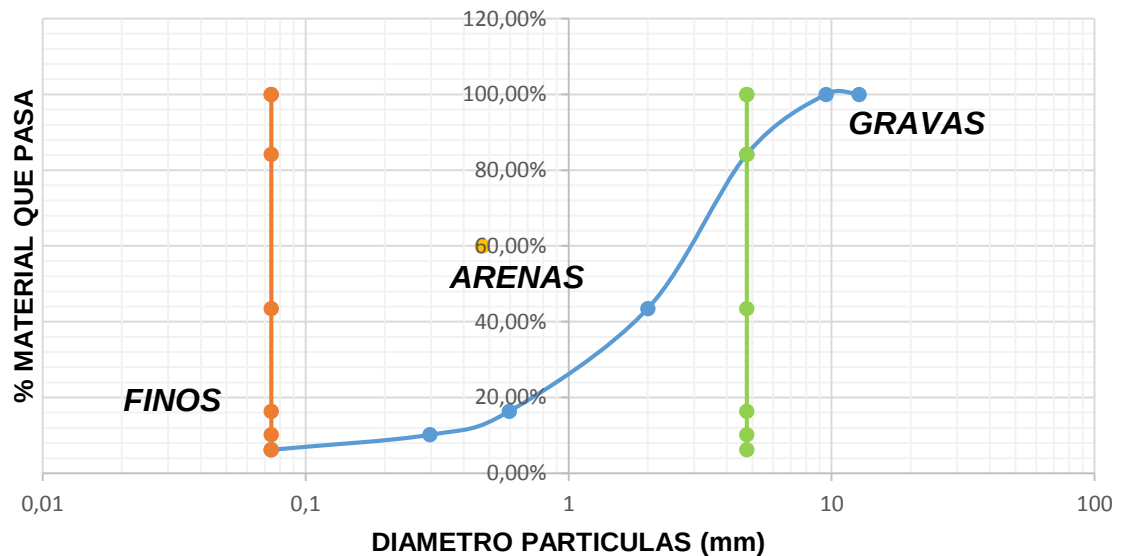
Tabla 10 Porcentaje de material presente en la arena

% GRAVA	0,51%
% ARENA	98,99%
% FINOS	0,51%

Fuente: Autor

5.1.3 Granulometría biosólido. Los resultados encontrados a partir de los cálculos realizados (**Ver anexo 3**), y de la curva granulométrica (**Ver gráfica 3**), muestra un suelo de partículas gruesas con presencia de arenas, arcillas y limos, ya que más del 50% de la fracción pasa el tamiz N° 4 y entre el 5-12 % pasa la malla N°200. Teniendo en cuenta lo anterior según el **sistema unificado**³⁷, se plantea que es un suelo SW-SM, es decir un suelo regularmente estable. La característica de este suelo se podría definir como un suelo con gran presencia de arena, lo que se podría definir como material muy permeable, con presencia de limos y arcillas.

Gráfica 3 Granulometría biosólido



Fuente: Autor

³⁶ Avalos, E. E. (09 de 01 de 2013). *Departamento academico de mecanica de suelos*. Obtenido de Universidad Nacional de ingenieria Lima: <http://edwinestebaavalos/104168914-analisisgranulometricoportamizado>

³⁷ *Ibid.*, pág. 58

De acuerdo a la gráfica 3, se pueden definir las cantidades aproximadas de material grueso, arena y finos, teniendo en cuenta el diámetro de las partículas encontradas en la muestra de biosólido. (Ver tabla 11).

Tabla 11 Porcentaje de material presente en el biosólido

% PARTÍCULAS GRUESAS	15,82%
% ARENA	77,97%
% ARCILLA	6,21%

Fuente: Autor

En la muestra de biosólido, se encontró que tiene un módulo de finura de 2.46 lo que quiere decir que es un material fino, sin embargo al encontrarse en el límite de esta clasificación también se podría entender que existe presencia de material grueso, aunque en cantidades más mínimas.

5.1.4 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción de agua en agregados.

5.1.4.1 Agregado grueso. Según los cálculos encontrados (**Ver anexo 4**), el granito usado para la prueba de absorción arroja un valor del 2%, lo que quiere decir que es un material aceptable, ya que se encuentra dentro del rango que debe cumplir un agregado grueso, en este caso máximo del 3%, es decir se puede usar en las mezclas de concreto sin ningún inconveniente. La densidad relativa de la muestra fue de 2.57, lo que satisface completamente el criterio de aceptación, el cual está entre 2.33 a 2.75.³⁸

5.1.4.2 Agregado fino. Según el ensayo realizado a la arena, (**Ver anexo 5**), la densidad relativa de 2.0, el rango de aceptación para agregados finos que se usan para muestras de concreto están entre 2.21 a 2.67, lo cual quiere decir que no es apta. La densidad relativa de la arena fue de 2.3, por tanto, es un producto que mantiene una porosidad aceptable. En cuanto al porcentaje de absorción, la arena presento una absorción alta, de un 10% aproximadamente, el rango de aceptación, para mezclas de concreto esta de 0% al 5%.

De acuerdo a lo anterior, la arena no cumple con los requerimientos, para ser usada como mezcla de concreto, esto no implica que el material no se apto para la elaboración de los adoquines, ya que para dicho proceso se necesitan mezclas con resistencias más bajas y que posean una textura más pulida, lo cual se garantiza mediante arenas muy finas. Por tanto el agregado fino no es rechazado.

³⁸ Mena, E. L. (05 de mayo de 2012). *Laboratorios de suelos, universidad Nacional de ingeniería (UNI-RUPAP) Managua*. Obtenido de Departamento de construcción : www.uni.edu.ni/Recintos/labs/RUPAP

5.1.5 Equivalente de arena. A partir del ensayo realizado a una muestra de agregado fino, se pudo especificar empíricamente un valor mínimo equivalente de arena (**Ver anexo 6**), en el que se pudo constatar que la muestra en su mayoría está conformada por arena, y solo un 33% de la muestra está constituido por materia fina o arcillosa.

5.1.6 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval. De acuerdo al ensayo realizado a la arena, (**Ver anexo 7**), se pudo definir que se trataba de un material que no posee pérdida significativa de material, ya que las pérdidas no superan el 10%, después de ser sometidas a la degradación por abrasión, lo que resulta bueno, tratándose de una arena para elaboración de adoquines, ya que se puede trabajar con un material fino, que garantice resistencias no muy altas.

5.1.7 Humedades. De acuerdo a la tabla 12, se pudo encontrar que el porcentaje de humedad más alto, se encuentra en la materia prima (biosólido), esto sabiendo, que es la humedad inicial, antes del proceso de secado. (**Ver anexo 8**).

Tabla 12 Tabla resumen, características materias primas

	HUMEDAD (%)		ABSORCIÓN (%)	DENSIDAD RELATIVA	DENSIDAD APARENTE
ARENA	5		10	2,1	2,3
GRANITO	3		2	2,57	2,65
BIOSÓLIDO	INICIAL	FINAL	--	--	--
	88	9			

Fuente: Autor

5.2.8 Caracterización química del biosólido. Teniendo en cuenta que en Colombia, no existe una norma que regule las concentraciones máximas de metales pesados, en el biosólido, se tiene en cuenta la norma norteamericana establecida en el Código de Registro Federal, Título 40, Parte 503 de la Agencia de Protección Ambiental-EPA, la cual garantiza y controla las cantidades permitidas de parámetros contaminantes (contenido de metales pesados, calidad microbiológica, y atracción de vectores, entre otros). La caracterización química del biosólido, se realizó en conjunto con el macro-proyecto de la universidad Santo Tomas de Tunja, que tiene como línea de investigación “Construcción y nuevos materiales”³⁹

³⁹ Mozo Moreno, William. (2014). Fabricación de materiales de construcción a partir de biosólidos, procedentes del tratamiento de aguas residuales. *Proyecto de investigación*.

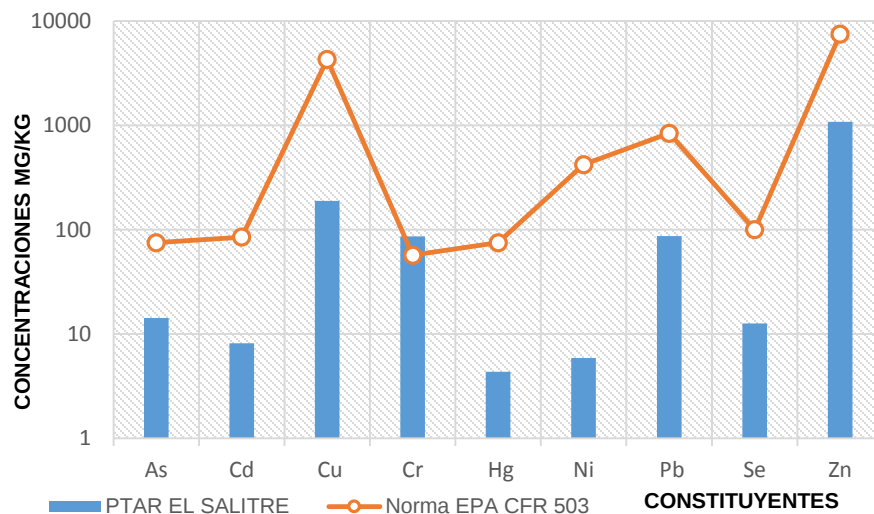
5.1.8.1 Caracterización química del biosólido para el año 2012. PTAR “El Salitre”. En la PTAR EL SALITRE, se lleva a cabo un riguroso plan de seguimiento a las características del biosólido generado por la depuración o tratamiento de las aguas residuales; para esto se monitorean periódicamente parámetros físicos, químicos y microbiológicos donde mensualmente en muestras compuestas se determina la concentración de metales pesados como: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio y Zinc. (Ver tabla 13)

Tabla 13 Caracterización química del biosólido para el año 2012.

Parámetro	concentración PTAR el salitre (mg/kg)	concentración máxima EPA 503-13 (mg/kg)
As	14.22	75
Cd	8.17	85
Cu	188.45	4300
Cr	86.39	57
Hg	4.34	75
Ni	5.89	420
Pb	86.92	840
Se	12.66	100
Zn	1078.96	7500

Fuente: PTAR El Salitre

Gráfica 4 Concentración promedio de metales en el biosólido para el 2012



Fuente: PTAR Salitre. Modificada Autor

Nota: Concentraciones mensuales de elementos potencialmente tóxicos en el biosólido suministrados por la PTAR EL SALITRE (Ver anexos 9-14)

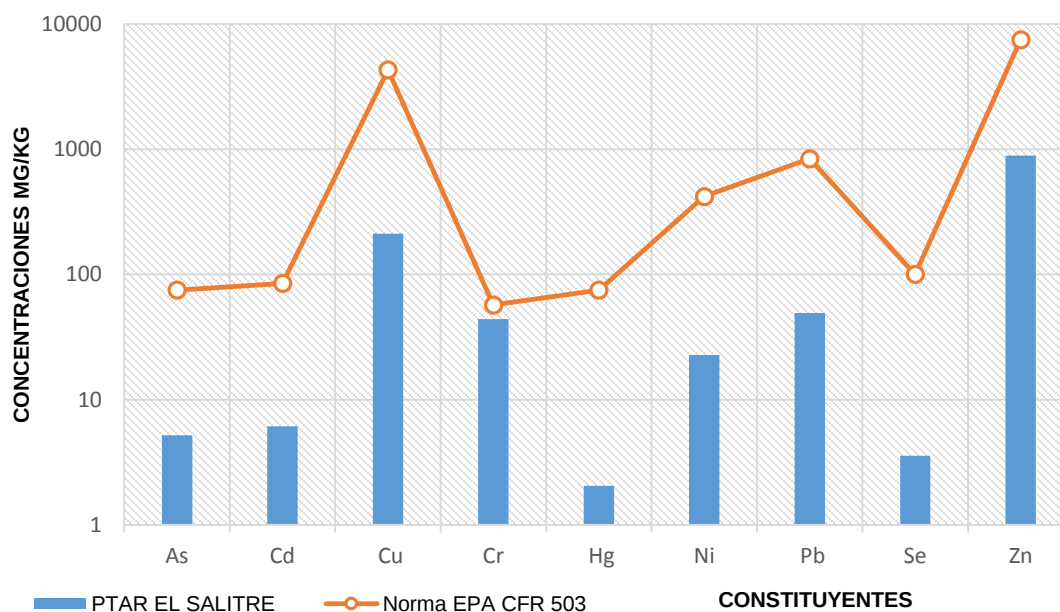
5.1.8.1 Caracterización química del biosólido para el año 2014. Teniendo en cuenta que la PTAR el Salitre presenta caracterización química hasta el año 2012, se dispuso realizar una caracterización química para el año 2014, y así poder corroborar la información suministrada por la planta. La caracterización se realizó mediante el método de la EPA 3051 A y EPA 6010 en el Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad De Los Andes. (Ver anexo 15).

Tabla 14 Caracterización química del biosólido para el año 2014.

Parámetro	concentración PTAR el salitre (mg/kg)	concentración máxima EPA 503-13 (mg/kg)
As	5,21	75
Cd	6,13	85
Cu	212	4300
Cr	44,1	57
Hg	2,05	75
Ni	22,7	420
Pb	49,2	840
Se	3,57	100
Zn	890	7500

Fuente: Autor

Gráfica 5 Concentración promedio de metales en el biosólido para el 2014



Fuente: Autor

Comparando los valores de las concentraciones promedio de metales pesados en el biosólido para el año 2012 y 2014, se encontró que en ningún caso pasa los límites máximos permitidos por la norma 503 de la agencia de protección Ambiental EPA (Ver gráfica 4 y 5).

Teniendo en cuenta lo anterior El biosólido de la PTAR EL SALITRE se clasifica como clase B; material en el cual se detectan patógenos, los cuales han sido estabilizados hasta niveles que no presentan algún riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Lo anterior contando con que se tenga control en el manejo y disposición del subproducto. Para la aplicación del biosólido clase B en los suelos, se deben llevar a cabo medidas de control como restricción al público en las áreas restauradas con este material y la prevención del consumo del material vegetal en animales, razones por las cuales se busca darle una nueva alternativa de aprovechamiento al biosólido de la PTAR EL SALITRE.⁴⁰

5.2 ANÁLISIS APARIENCIA Y MEDICIONES

5.2.1 Mediciones. De acuerdo al análisis y mediciones, realizado a los especímenes (**Ver Anexos 16-19**), se pudo encontrar que las medidas, no cambian representativamente, respecto a la cantidad de biosólido incorporado en el espécimen, ni tampoco de acuerdo al tiempo de curado.

Tabla 15 Tabla medidas promedio adoquines según cantidad de biosólido

	Largo (cm)	Alto (cm)	Ancho (cm)
Adoquín 0%B	20,03	6,25	10,07
Adoquín 5%B	20,02	6,14	10,05
Adoquín 10%B	20,05	6,12	10,03
Adoquín 15%B	20,05	6,13	10,07
Medidas Fabrica	20,00	6,00	10,00

Fuente: Autor

En la tabla 15, se puede notar que no hay cambio significativo en las medidas tomadas, a los adoquines que poseen algún porcentaje de biosólido (5%, 10% o 15%), con respecto a los adoquines normales, (0% biosólido).

⁴⁰ *Ibíd.*, pág. 65.

Los errores porcentuales de acuerdo a las medidas nominales no superan el 5% en ninguna medida tomada, lo que quiere decir que son adoquines bien conformados y comprimidos. (Ver tabla 16).

Tabla 16 Error porcentual prueba medidas adoquines (5%, 10% y 15%)

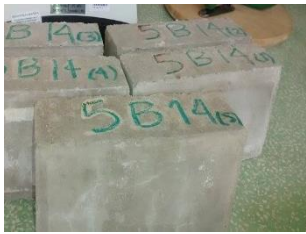
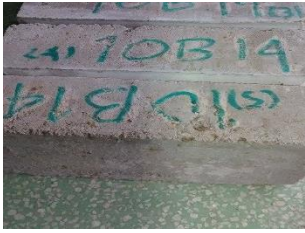
	Alto (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
	$Error\ Porcentual = \frac{Medida\ mayor - medida\ nominal}{medida\ nominal}$		
Medidas Nominales	6,00	20,00	10,00
Adoquín (0% biosólido)	6,25	20,03	10,07
Error porcentual	4,22%	0,17%	0,73%
Adoquín (5% biosólido)	6,14	20,02	10,05
Error porcentual	2,33%	0,10%	0,47%
Adoquín (10% biosólido)	6,12	20,05	10,03
Error porcentual	2,00%	0,23%	0,33%
Adoquín (15% biosólido)	6,13	20,05	10,07
Error porcentual	2,22%	0,23%	0,67%

Fuente: Autor

5.2.2 Apariencia. Por otro lado, la apariencia física del adoquín, varía de acuerdo a la cantidad de biosólido incorporado, esto se puede identificar observando la textura de cada espécimen. (Ver figura 33).

Los adoquines con 0% y 5% de biosólido, presentan una apariencia aceptable, no presentan desmoronamientos ni desportillamiento. Los adoquines de 10% y 15% presentan betas, de color marrón, a causa del biosólido, presentan desportillamiento, que incluyen perdida de material y en algunos casos se empieza a desmoronar el agregado, adicional a esto, el olor es molesto en este tipo de muestras, cuando están en el proceso de curado. (Ver anexo 20).

Figura 33 Apariencia adoquines (0%, 5% 10% y 15%)

0% Biosólido	5% Biosólido
	
10% Biosólido	15% Biosólido
	

Fuente: Autor

5.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN O MODULO DE ROTURA⁴¹

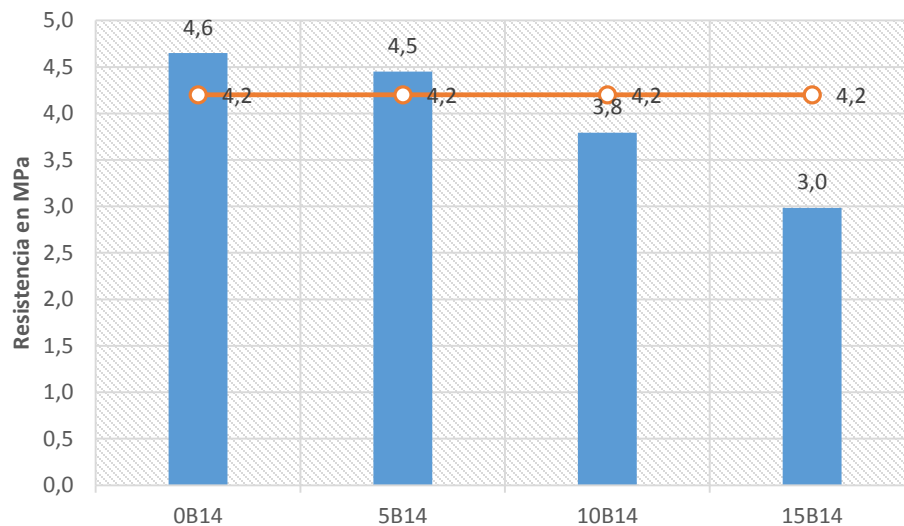
5.3.1 Primera falla. La primera falla realizada a los 14 días, se hizo a 20 adoquines, divididos en 4 clases de especímenes, 5 que no contienen biosólido, 5 que contienen 5% de biosólido, 5 que contienen 10% de biosólido, y 5 que contienen 15% de biosólido. La falla se realizó de acuerdo a las especificaciones de la norma (NTC 2017). Los ensayos correspondientes se realizaron en el laboratorio “López Hermanos Ltda”, (Anexos 21 - 28).

- De acuerdo a la gráfica 8, los adoquines, fallados a los 14 días, sin porcentaje de biosólido cumplen todos con las especificaciones de la norma técnica colombiana 2017, ya que resistencia a la flexotracción, superan los 3.8 MPa, como piezas individuales.
- Los especímenes que poseen 5% de biosólido, igualmente cumplen con los requisitos preestablecidos en la NTC 2017, sin embargo se puede observar que la resistencia a la prueba de flexotracción disminuyo con respecto a los adoquines que no poseían biosólido.

⁴¹ *Ibíd.* , pág. 30

- Por otra parte, los adoquines que poseían 10% y 15% de biosólido, redujeron la resistencia a la prueba de flexotracción. De los 10 adoquines que poseen estos porcentajes, solo 1 sobrepasa la resistencia, 3 de ellos están en su límite, decir 3,8 MPa y los 6 restantes no resistieron el módulo de rotura, es decir no son aptos para uso en pavimentos.

Gráfica 6 Resistencia a la flexotracción adoquines 14 días curado



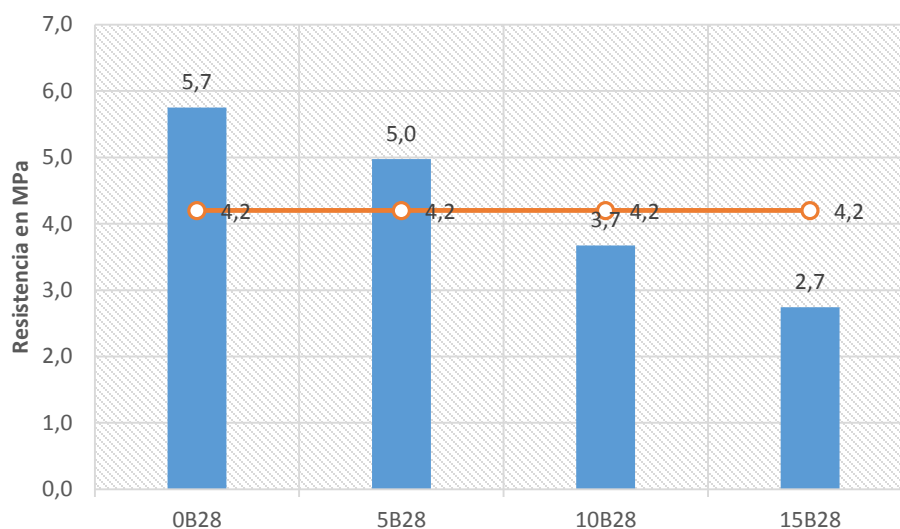
Fuente: Autor

Al sacar la media aritmética a las resistencias de flexotracción que tienen las 4 clases de adoquines, la norma exige una resistencia mínima de 4,2 MPa, la cual solo la cumplen los especímenes que contienen 0 y 5% de biosólido.

Por consiguiente, la cantidad de biosólido a incorporar en los especímenes tiene gran importancia ya que a mayor cantidad de este material, se observa resistencias mínimas notables, que se encuentran por debajo, a lo preestablecido en la norma y que lleva por tanto al rechazo rotundo de las piezas. (Ver gráfica 6).

5.3.2 Segunda Falla. La segunda falla se realizó en el laboratorio “López Hermanos Ltda”. (Anexos 29-36), a los 28 días de curado de los especímenes, en esta muestra, también se encuentran 20 adoquines, divididos en 4 clases de especímenes (0%, 5%, 10% y 15% de biosólido).

Gráfica 7 Resistencia a la flexotracción adoquines 28 días curado

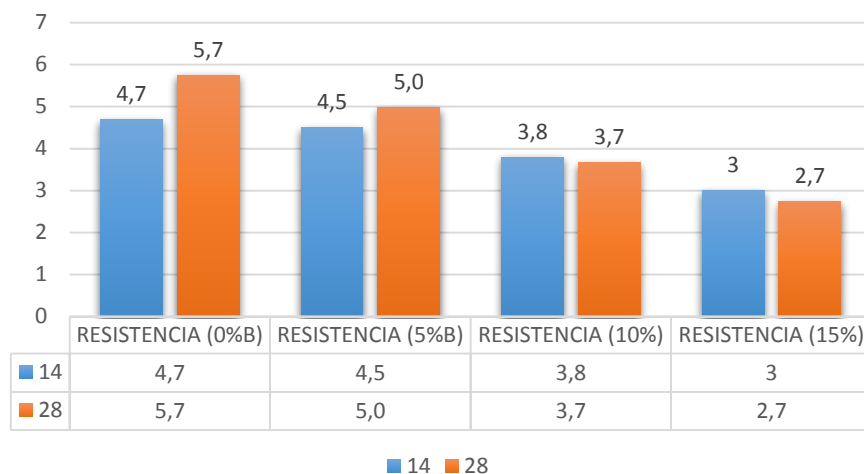


Fuente: Autor

- De acuerdo a la gráfica 7, se puede confirmar que los especímenes que no contienen biosólido, y 5% del mismo; superan el valor de resistencia a la flexotracción, descrito por la norma. Adicional a esto, las resistencias aumentaron notablemente, de acuerdo al tiempo de curado, con respecto a los especímenes que se fallaron a los 14 días.
- Con los adoquines que se fallaron a los 28 días con 10 y 15% de biosólido, se presentan las mismas características ya que redujeron su resistencia a la flexotracción, como se esperaba. De la primera muestra solo 2 adoquines cumplen con la resistencia necesaria para usar como pieza de pavimentos. A pesar de que el tiempo de curado afectó en las muestras con (0% y 5%) de biosólido, aumentando aún más su resistencia, en las muestras anteriores con más porcentaje de dicho material, se siguió presentando disminución de la resistencia, a lo que se atribuye que el biosólido no es un buen material que se adhiera al cemento, la arena y grava si no genera, desprendimiento de material, permitiendo que entre demasiada agua durante el proceso de curado y al pasar 14 días más desde la falla anterior, hubo más permeabilidad y esto perjudicó la resistencia obtenida en estos especímenes.

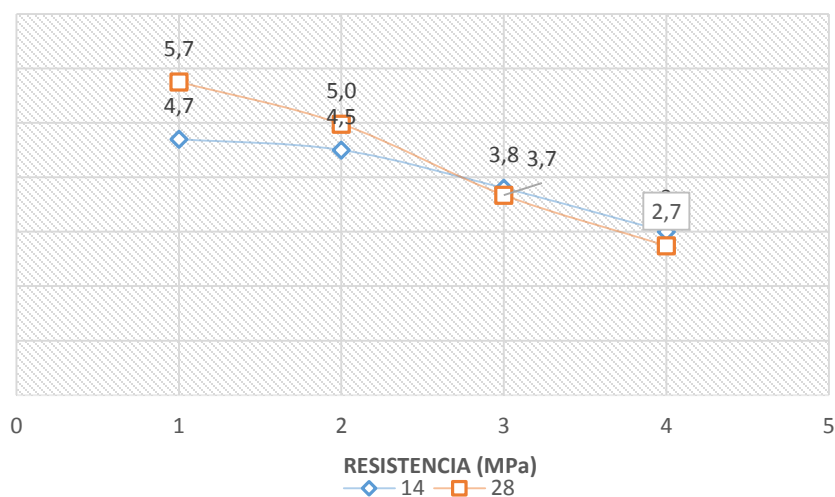
En el promedio realizado a los cinco especímenes, se puede observar la misma tendencia, solo cumplen con la resistencia los especímenes que menos cantidad de biosólido poseen.

Gráfica 8 Resistencia vs tiempo Adoquines 14 y 28 días (Estadísticamente)



Fuente: Autor

Gráfica 9 Resistencia vs tiempo Adoquines 14 y 28 días (Dispersión)



Fuente: Autor

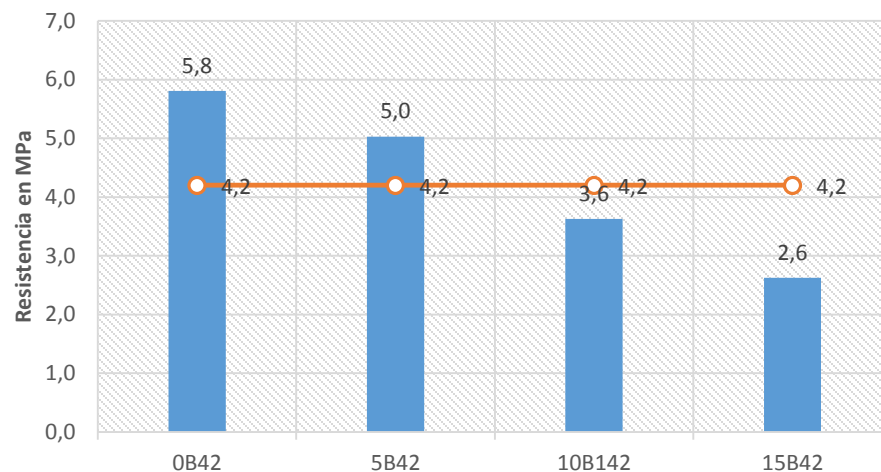
Con respecto a las gráficas 8 y 9, se corrobora que la resistencia aumenta notablemente en los adoquines que no poseen biosólido, en casi un 99%, en los especímenes que poseen 5% también aumenta la resistencia pero no en la misma tendencia, ya que aumenta alrededor de un 50%.

Los adoquines con 10 y 15% presentan una tendencia contraria ya que el tiempo de curado solo logro disminuir la resistencia por las características anteriormente descritas.

5.3.3 Tercera Falla. La tercera falla se realizó en el laboratorio de la universidad Santo Tomas de Aquino, sede campus a los 42 días de curado de los especímenes, para este ensayo también se tuvo en cuenta las especificaciones de la norma técnica colombiana 2017. **(Anexos 37-40).**

- A los 42 días, de curado los adoquines siguen presentando las mismas características y comportamiento a los especímenes anteriores, los que no contienen biosólido presentan una mayor resistencia a través del tiempo de curado.
- Los adoquines que tienen 5% de biosólido, también presentan mayor resistencia a través del tiempo, sin embargo no en la misma intensidad que los adoquines normales.
- De acuerdo a la tendencia presentada, la resistencia a la flexotracción disminuye de acuerdo a la cantidad de biosólido a incorporar. Por otro lado, a pesar de que el proceso de curado usado, permitía que aumentara la resistencia en todos los especímenes, se puede notar que en los adoquines que más porcentaje de biosólido tenían, sucedió lo contrario, es decir entre más tiempo estaban sumergidos en agua, más cantidad de material se perdía, y más permeabilidad existía y por ende disminuyo notablemente la resistencia de estos especímenes.

Gráfica 10 Resistencia a la flexotracción adoquines 42 días curado

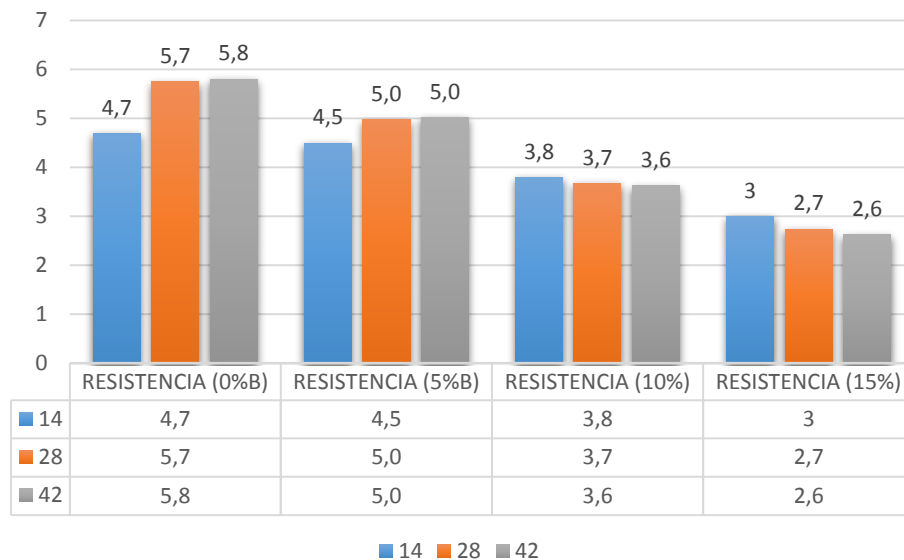


Fuente Autor

En la gráfica 10, finalmente se confirma la tendencia que venían presentando los adoquines ante las pruebas de flexo tracción, concluyendo que se puede usar porcentajes de biosólido en cantidades mínimas que no superen el 5% con el fin de

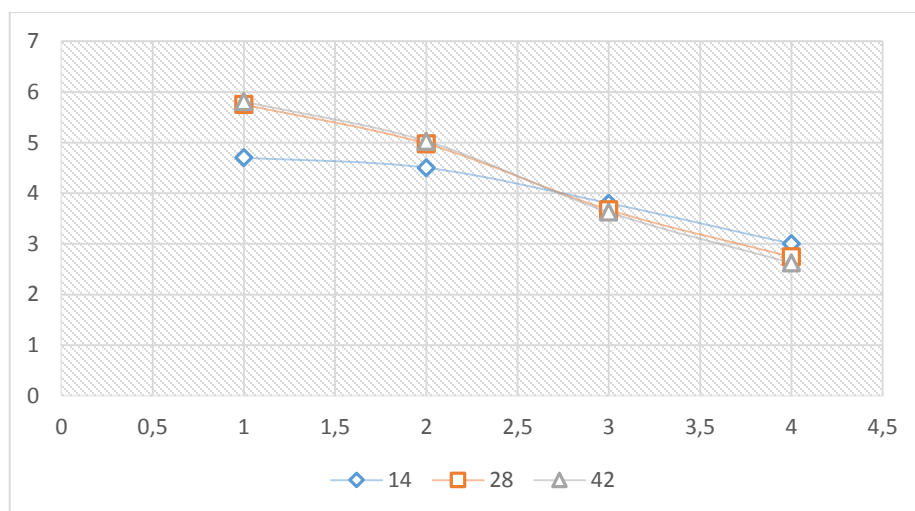
evitar que las piezas no sean rechazadas de acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 2017.

Gráfica 11 Resistencia vs tiempo Adoquines 14, 28 días y 42 días (Estadísticamente)



Fuente: Autor

Gráfica 12 Resistencia vs tiempo Adoquines 14, 28 días y 42 días (Dispersión)



Fuente: Autor

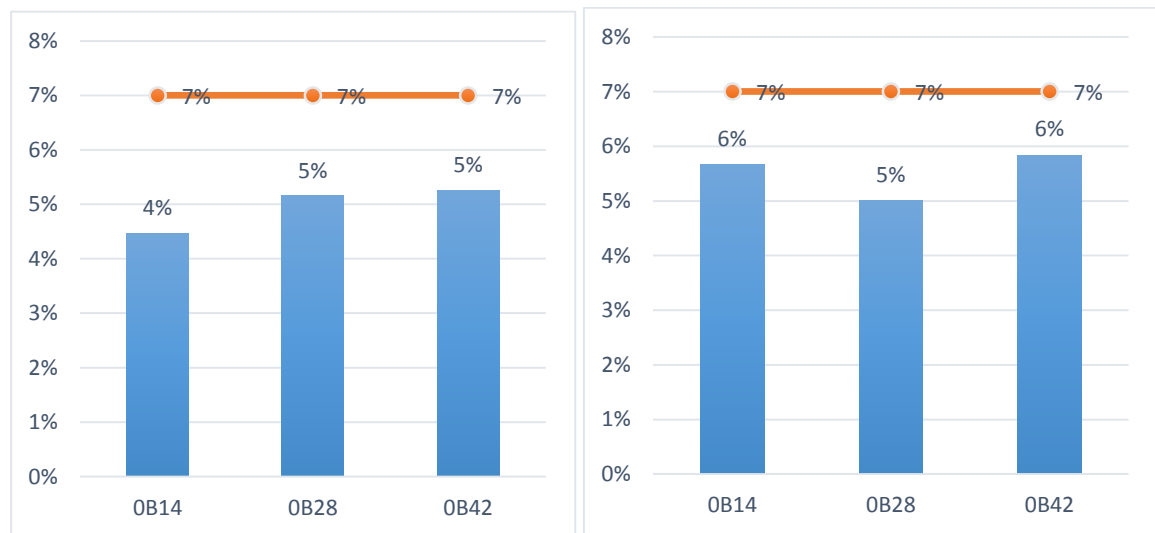
En cuanto a la resistencia vs tiempo, se puede ver que la tendencia desde los 28 a los 42 días es muy similar y la resistencia aumento aunque no en gran medida en los adoquines con (0% y 5% de biosólido) y disminuye en los de (10% y 15%) entre más tiempo pasa. (Ver gráficas 11 y 12).

5.4 ABSORCIÓN DE AGUA

De acuerdo a los análisis y cálculos realizados a los especímenes se pudo encontrar que la absorción de los adoquines, varía de acuerdo a la cantidad de biosólido incorporado en la mezcla. **(Anexo D).**

- En cuanto mayor es la cantidad de biosólido, mayor es el porcentaje de absorción, lo que resulta negativo ya que la norma técnica colombiana 2017, exige un valor máximo del 7% de absorción por cada espécimen.

Gráfica 13 Absorción de agua (0% y 5% biosólido)

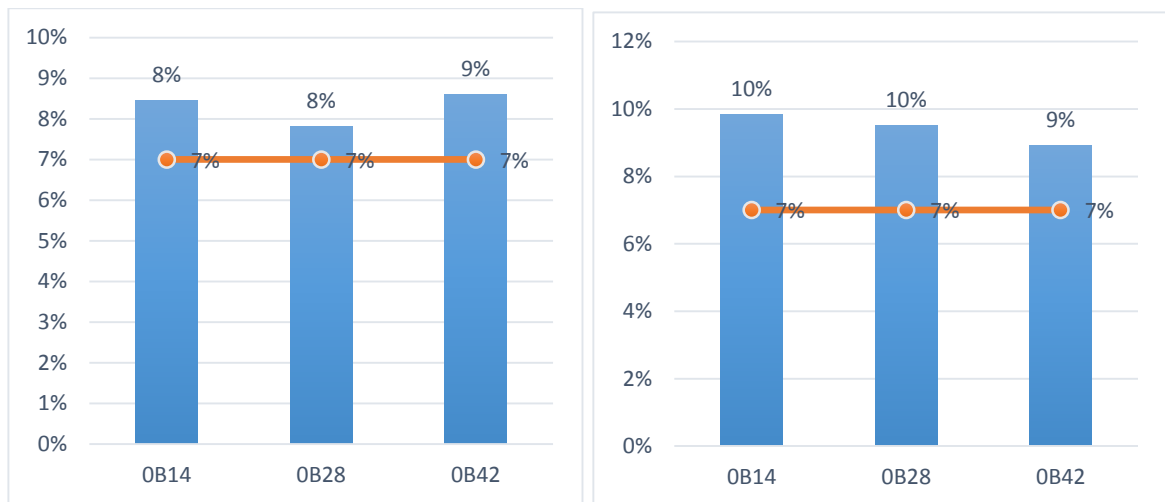


Fuente Autor

- De acuerdo a las gráfica 23, los especímenes que no poseen porcentaje de biosólido y los que contienen solo 5%, cumplen rotundamente con la prueba de absorción de agua, ya que ninguno sobrepasa el 7% exigido en la norma.
- Como se esperaba, de acuerdo a los análisis de prueba a la flexotracción los especímenes con más cantidad de biosólido (10% y 15%) presentan una absorción

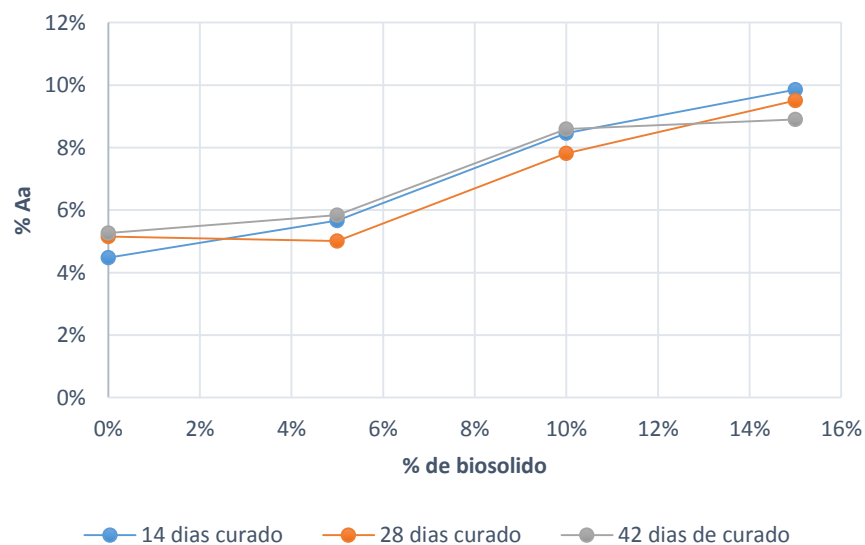
de agua, que sobrepasa el nivel exigido en la norma, por lo cual se rechazan estos adoquines, ya que si se les diese utilidad en la construcción de pavimentos, no resistirían adecuadamente, y la absorción de agua que mantiene hace que el espécimen se desmorone y pierda material constantemente. (Ver grafica 24).

Gráfica 14 Absorción de agua (10% y 15% biosólido)



Fuente: Autor

Gráfica 15 % Absorción de agua vs % Biosólido



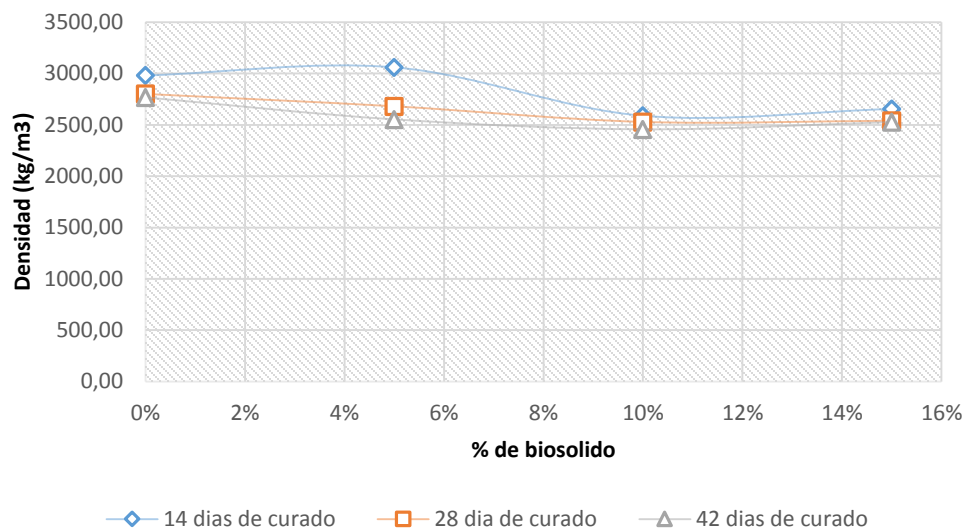
Fuente Autor

De acuerdo a la gráfica 15, se puede observar que el tiempo de curado de los especímenes no afecta de ninguna forma el porcentaje de absorción de los adoquines, al contrario esta última variable es dependiente de la cantidad de biosólido incorporada, ya que al ser mayor, así mismo el adoquín va a absorber más agua.

5.5 DENSIDAD

De acuerdo a la prueba de densidad de los adoquines, se pudo notar que es una variable independiente en cuanto a la cantidad de biosólido que posee la muestra, ya que los valores encontrados varían unos de otros, incluso cuando se trata de la misma cantidad de biosólido, sin embargo se pudo observar que el tiempo de curado de los especímenes está muy atado a la prueba de densidad ya que a mayor tiempo de curado se presentaban valores menores de densidad.

Gráfica 16 Densidad vs % Biosólido



Fuente: Autor

- Los resultados encontrados mediante las pruebas realizadas, muestran que los adoquines que se pueden aprovechar y que cumplen con todas las características y requisitos preestablecidos en la norma, hacen referencia a los que tienen 0% y 5% de biosólido.

- La variable tiempo en cuanto al curado, satisface la necesidad de aumentar la resistencia a la flexotracción en los adoquines que poseen menos cantidad de biosólido, además la absorción de agua también es menor y no pasa el límite superior.
- Los adoquines que presentan 10% y 15% de biosólido, se rechazan claramente, ya que no cumplen con ninguna variable, ni con el módulo de rotura, ni con las pruebas de densidad y absorción de agua.

6. CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis químico realizado al biosólido, de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”, se puede garantizar que es un material aprovechable, ya que la cantidad de metales pesados no sobrepasa los niveles exigidos en la norma americana EPA Título 40 parte 503, lo que quiere decir que las concentraciones promedio de elementos potencialmente tóxicos están por debajo de los límites permitidos y no van a afectar la salud de las personas que tienen contacto directo con el mismo.
- La caracterización física de las materias primas (arena y granito), son base fundamental para concluir que el diseño de mezcla brindado por la fábrica “PREFABRICADOS DEL SOL LTDA” de la ciudad de Sogamoso, cumplen las pruebas mecánicas exigidas en la NTC 2017, a pesar de que posee un agregado grueso de partículas pequeñas, con una composición uniforme y la arena es muy fina, logran texturas y apariencias atractivas al mercado; y las resistencias encontradas están por encima de las establecidas por norma.
- Los resultados obtenidos a partir de esta investigación, han demostrado que se puede incluir el biosólido en los adoquines de concreto para pavimento, siempre y cuando se controle su porcentaje, y el tiempo de curado. Estas variables son definitivas para la elaboración del espécimen, por consiguiente, las unidades de concreto que cumplen con todas especificaciones de la norma NTC 2017, tienen un porcentaje máximo de biosólido del 5%. Los adoquines con 10% y 15%, se rechazan principalmente por la baja resistencia a la flexotracción que presentaron.
- La resistencia a la prueba de flexotracción, con respecto a la variable tiempo; es directamente proporcional, en los especímenes que poseen 0% y 5% de inclusión de biosólido, es decir entre más tiempo permanecieron inmersos en agua más resistencia presentaban; por tanto el curado que se definió es una buena elección porque aumento el tiempo de maduración y les proporciono más hidratación, con resistencias superiores a las exigidas por las normas.
- Los especímenes con 10% y 15% de biosólido, no cumplieron con ningún requerimiento, no obstante disminuyeron su resistencia con respecto al tiempo, este fenómeno se le atribuye también al método usado como curado, ya que el biosólido generó en la mezcla más porosidad y por ende el espécimen absorbió más agua de la necesaria.
- La absorción de agua es una variable dependiente del porcentaje de biosólido, es decir que a mayor cantidad de biosólido mayor absorción de agua presentan los adoquines, lo que no es bueno ya que la norma no acepta más de un 7%. Los

adoquines con 10% y 15% tampoco cumplen con esta prueba e igualmente son rechazados.

- La apariencia de los adoquines con mayor cantidad de biosólido, presentan betas de colores oscuros, se desportillan mediante cualquier manejo, esto se debe, a que el biosólido no es compatible con los agregados (arena y granito), ya que las características de permeabilidad difieren bastante, por el hecho de que el biosólido es muy permeable, la inclusión de biosólido en porcentajes grandes, genera una condición contraria que genera fisuras y desmoronamientos en los adoquines.
- La densidad no depende del porcentaje de biosólido, sin embargo en todos los especímenes se verifico que entre mayor tiempo de curado menor densidad presentan lo que sería bueno, ya que tendrían capas de rodadura con menor peso, que logran soportar las resistencias exigidas.

7. RECOMENDACIONES

- Utilizar otra forma de curado para los adoquines, con el fin de determinar si es una variable representativa en cuanto a las pruebas mecánicas de absorción de agua y resistencia a la flexotracción.
- Utilizar otra forma de adición de biosólido, en los mismos porcentajes; como recomendación cenizas del compuesto, ya que a través de las referencias bibliográficas se concluye que resisten más que un adoquín normal.
- Realizar un análisis de lixiviados en el agua en la cual estaban sumergidos los especímenes, esto con el fin de determinar la cantidad de contaminantes que pueden generar después de estar elaborados los adoquines.
- Al momento de moldear los especímenes, debemos lograr que las superficies planas de estos, estén lisos sin imperfecciones, y que las mezclas queden lo más homogéneas posibles.
- Utilizar herramientas, utensilios y protección adecuados para el uso del biosólido, ya que se trata de un producto contaminante.
- Realizar un análisis más detallado, de la proporción de biosólido seco, de (0%,1%, 2%, 3%, 4% y 5%), con el fin de verificar el cambio de las propiedades físicas y mecánicas, y dar resultados más exactos.
- Verificar que se cuente con las máquinas y herramientas, necesarias para los ensayos.

GLOSARIO

A

Absorción: Incremento de la masa de un agregado, debido a la penetración de agua dentro de los poros de sus partículas durante un periodo especificado, pero sin incluir al agua adherida a la superficie exterior de las partículas La absorción se expresa como un porcentaje de la masa seca del agregado.

Adoquín: Elemento de concreto prefabricado, de forma prismática, de reducido tamaño, que se utiliza como material para construcción de capas de rodadura de pavimentos.

Agregado Fino: Es el material inerte y árido cuyos granos pasan el 100% por el tamiz 4,74mm y son retenidos en un 100% en el tamiz 74 u.

Agregado Grueso: Es el material inerte y árido cuyos granos son retenidos el 100% por el tamiz 4,76mm.

Agua: El agua como componente del concreto el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que estas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

Aguas Residuales: Desecho líquido proveniente de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.

Apariencia: Característica o conjunto de características que posee un objeto, y que lo describen física como internamente.

Arena: Agregado fino que interviene en la composición del hormigón.

B

Biosólido: sólido proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales, estabilizado biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes (mayores y

menores), bajo contenido de microorganismos patógenos y presencia permisible de metales pesados.

----- C-----

Cemento: Conglomerado hidráulico que mezclado con los agregados pétreos y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica que al endurecer se conoce como concreto.

Concreto: Es una mezcla cuidadosa de cemento, arena, grava y/o algunos productos adicionales.

Curado: Es el proceso que controla y mantiene un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable en el concreto, durante la hidratación de los materiales cementantes.

----- D-----

Densidad: Masa por unidad de volumen de un material, expresada generalmente en kg/m^3 (lb/pie^3).

Densidad en condición seca al horno (SH): Masa por unidad de volumen de las partículas de agregado secas al horno, incluyendo el volumen de los poros permeables e impermeables de las partículas, pero no los vacíos entre ellas.

Densidad en condición saturada y superficialmente seca (SSS): Masa por unidad de volumen de las partículas del agregado saturadas y superficialmente secas, incluyendo el volumen de los poros permeables e impermeables de las partículas y el agua que llena los poros permeables, pero no los vacíos entre las partículas.

Densidad aparente: Masa por unidad de volumen de la porción impermeable de las partículas del agregado.

Dosificación: Medición (en masa volumen) de las propiedades apropiadas de los materiales que componen al concreto, con el fin de obtener las características requeridas tanto en esta fresco como endurecido.

----- **E**-----

Espécimen: Medición (en masa volumen) de las propiedades apropiadas de los materiales que componen al concreto, con el fin de obtener las características requeridas tanto en esta fresco como endurecido.

----- **F**-----

Flexotracción: Son esfuerzos que se sitúan por debajo del plano neutro de una viga o un elemento similar.

----- **G**-----

Granito: Agregado grueso de tamaño inferior a 10-8 mm.

Granulometría: Distribución de los tamaños que componen la masa de los agregados determinado mediante un análisis granulométrico que divide el material en fracciones de igual tamaño.

----- **L**-----

Lodo: líquido con contenido de sólidos en suspensión sin ningún tipo de tratamiento.

----- **M**-----

Mezcla: Una mezcla es la combinación física de dos o más sustancias que retienen sus identidades y que se mezclan pudiendo formar según el caso aleaciones, soluciones, suspensiones y coloides.

Módulo de rotura: Resistencia máxima determinada en un ensayo de flexión o torsión. En un ensayo de flexión, el módulo de rotura en la flexión es el esfuerzo máximo en la fibra cuando se produce el fallo. En un ensayo de torsión, el módulo

de rotura en la torsión es el esfuerzo de cizalladura máximo de la fibra extrema de un miembro circular cuando se produce el fallo.

Mortero: Mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción.

----- **P**-----

Patógenos: Es todo agente (o cualquier "ente" en otras áreas fuera de la biología) que puede producir enfermedad o daño a la biología de un huésped, sea este humano, animal o vegetal.

Peso específico: Es la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de aguas residuales (o agua residual doméstica) incorpora procesos físicos, químicos y biológicos los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del uso humano cotidiano del agua.

----- **T**-----

Tratamiento de aguas residuales: Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes que pueden llevar las aguas residuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. YAGÜE, S. V. (2002). Use of dry sludge from waste water treatment plants as an additive in prefabricated concrete bricks. *http://materconstrucc.revistas.csic.es*, 31-41.
- Ambientum. (2002). Clasificación de aguas residuales industriales. *Revista Ambientum*, 35-37.
- Asocreto. (2006). Durabilidad y patología del concreto. *Instituto del Concreto, Asocreto*.
- Avalos, E. E. (09 de 01 de 2013). *Departamento académico de mecánica de suelos*. Obtenido de Universidad Nacional de ingeniería Lima: <http://edwinestebaavalos/104168914-analisisgranulometricoportamizado>
- Dáguer, G. P. (2013). GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. *Sociedad, ambiente y Futuro ACODAL*, 1-7.
- Darwin Hernández, J. D. (2006). APROVECHAMIENTO DE LODOS ALUMINOSOS GENERADOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN, MEDIANTE SU INCORPORACIÓN COMO AGREGADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 119-132.
- Gomá, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes*. (Editores Técnicos Asociados S.A., Ed.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 01 de 10 de 2014
- Instituto Colombiano de productores de cemento. (1986). Fabricación de adoquines de concreto. *ICPC*, 1-6.
- Instituto de cemento Portland Argentino. (s.f.). *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES*. Recuperado el 20 de 09 de 2014, de <http://www.icpa.org.ar/publico/files/pavadoq.pdf>
- J. Monzo, J. P. (2003). Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. *Science Direct*, 373-381.
- J. Monzó, J. P.-M. (1999). Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content. *Science Direct*, 87-94.
- K.L. Lin, T. K. (2004). Hydration characteristics of waste sludge ash that is reused in eco-cement clinkers. *Science Direct*, 1074-1081.
- Martin Cyr, M. C. (2007). Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. *Science Direct*, 1278-1289.

Mena, E. L. (05 de mayo de 2012). *Laboratorios de suelos, universidad Nacional de ingeniería (UNI-RUPAP) Managua*. Obtenido de Departamento de construcción : www.uni.edu.ni/Recintos/labs/RUPAP

Mozo Moreno, W. (2014). Fabricación de materiales de construcción a partir de biosólidos, procedentes del tratamiento de aguas residuales. *Proyecto de investigación*.

Norma Técnica Colombiana (NTC 2017). (2004). *Adoquines de Concreto para pavimentos* (Vol. Segunda Actualización). Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado el 15 de 06 de 2014

Norma Técnica Colombiana (NTC 174). (2000). *Especificaciones de los agregados para concretos* (Vol. Segunda Actualización). Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado el 08 de 08 de 2014

Osorio, J. D. (2010). Hidratación del concreto: Agua de curado y Agua de Mezclado. 360 ° *EN CONCRETO*, 1-3.

Polzinetti, A. (Abril de 2010). *Cemento Portland. Industrias I.* (F. d. UBA, Editor) Recuperado el 16 de 09 de 2014, de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/13_Clas%C3%A9%20Cemento.pdf

Ramallo, R. (1983). *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Reverté, S.A.

Raudel Ramos Olmos, Rubén Sepúlveda Marqués, & Francisco Villalobos Moreto. (2002). *El agua en el medio ambiente, Muestreo y análisis*. Mexicali, Baja California: UABC: Plaza y Valdes.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO (RAS), T. D. (2000). *SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS Y PLUVIALES*. Bogotá, D.C.: MinDesarrollo.

Ruiz Hidalgo, J. (18 de Mayo de 2009). *Componentes y procesos químicos el cemento*. Recuperado el 2014 de 09 de 15, de http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_18/JAVIER_RUIZ_2.pdf

Sanchez Sagobal, F. (s.f.). *Copernico Escuela-VIAS*. Recuperado el 20 de 09 de 2014, de http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/pag_glosario/Glosario/A.pdf

Suarez, J. (2009). *Geotecnia Básica*. Procedimiento auxiliar para la identificación de suelos. Sistema unificado Figura 3.4.

Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

Vian Ortuño, Á. (Diciembre de 2006). *Introducción a la Química Industrial*. Barcelona: Editorial Reverté S.A. Recuperado el 16 de 09 de 2014

Virella Bloda Alberto, & Calleja Carrete, J. (1985). *PRONTUARIO DEL CEMENTO* (Vol. 5a Edición). (Editores Técnicos Asociados, S.A., Ed., & 6a Edición Alemana RATGEBER FÜR ZEMENTINGENIEURE, Trad.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 15 de 09 de 2014

Zuluaga, J. A. (2009). Los biosólidos: ¿Una solución o un problema? *P+L*.