

**PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES Y SUB-BASES
EN VÍAS TERCIARIAS POR MEDIO DE UNA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE CON
LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS DE PTAR: CASOS DE ESTUDIO PERÚ Y
ECUADOR**

XIMENA VÁSQUEZ CABALLERO

DIRECTOR

ING. JUAN MANUEL GONZÁLEZ GUZMÁN



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2024

PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES Y SUB-BASES EN
VÍAS Terciarias por medio de una construcción sostenible con la
aplicación de biosólidos de PTAR: Casos de estudio Perú y Ecuador

XIMENA VÁSQUEZ CABALLERO

DIRECTOR

ING. JUAN MANUEL GONZÁLEZ GUZMAN



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2024

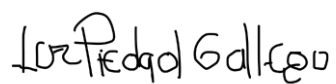
Nota aceptación



Firma de tutor



Firma de jurado 1



Luz Piedad Gallego Osorio
Firma de jurado 2

Bogotá D. C., Mayo de 2024

DEDICATORIA

A Dios, por haber permitido culminar mi carrera profesional y asimismo bendecirme con salud y oportunidades para lograr mis objetivos.

A mis padres, Marcela Caballero y Sergio Vásquez por haber sido ese gran apoyo, sin ellos no hubiese sido posible cumplir mi sueño de estudiar Ingeniería Civil.

A mis abuelos paternos y maternos y a mi tío Rafael Núñez, quienes fueron y serán esa voz de aliento, gracias por su ayuda, por sus oraciones y buenos deseos para mi carrera profesional, los llevo siempre en mi corazón.

A mi novio, Diego Montaña, una persona incondicional quien ha sido mi soporte a lo largo de mi carrera, su apoyo y sus positivos consejos fueron claves.

A mis amigas y a mi prima Katherine Padilla, por ser esas redes de apoyo donde siempre encontré y encontraré palabras de aliento.

Ximena

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el ingeniero Juan Manuel González por la supervisión brindada en cada momento, su dedicación docente y su guía fueron pilares fundamentales en la ejecución de esta investigación.

Para aquellos profesores quienes enseñan con vocación y amor a su profesión, gracias por motivar e inspirar a través de sus clases.

A la Universidad Militar Nueva Granada por permitirme lograr dar un paso más hacia el éxito y cumplir el sueño de ser profesional.

Ximena

Contenido

INTRODUCCIÓN	14
PROBLEMA	16
IDENTIFICACIÓN	16
DESCRIPCIÓN	18
PLANTEAMIENTO	21
DELIMITACIÓN	22
CONCEPTUAL	22
GEOGRÁFICA	23
CRONOLÓGICA	24
OBJETIVOS	27
OBJETIVO GENERAL	27
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
ANTECEDENTES	28
INTERNOS	28
EXTERNOS	30
JUSTIFICACIÓN	32
MARCO TEÓRICO	34
FUNCIONAMIENTO DE UNA PTAR	34
BIOSÓLIDOS	36
BIOSÓLIDOS APLICADOS EN LA INGENIERÍA CIVIL	41
VÍAS TERCARIAS	43
SUBRASANTES	45
SUB – BASES GRANULARES	46
MARCO CONCEPTUAL	48
MARCO INSTITUCIONAL	50
MARCO LEGAL	51
MARCO HISTÓRICO	53
MARCO AMBIENTAL	54
METODOLOGÍA	55
CAPÍTULOS	56
CASO DE ESTUDIO REALIZADO EN PERÚ	56
ANÁLISIS DE RESULTADOS, PERÚ	65
CASO DE ESTUDIO REALIZADO EN ECUADOR	66
ANÁLISIS DE RESULTADOS, ECUADOR	70
APLICACIÓN EN COLOMBIA	71
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	82

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de Ishikawa. Uso de biosólidos para subrasantes y sub-bases en vías terciarias.....	18
Ilustración 2. Matriz DOFA sobre biosólidos.....	19
Ilustración 3. Matriz DOFA sobre construcción sostenible.....	20
Ilustración 4. Matriz DOFA sobre vías terciarias	21
Ilustración 5. Resumen esquema de tratamiento en una PTAR.....	35
Ilustración 6. Biosólidos generados por PTAR del campus UMNG	37
Ilustración 7. Biosólidos en ingeniería civil.....	41
Ilustración 8. Diferencias entre economía lineal y economía circular	43
Ilustración 9. Red vial terciaria	43
Ilustración 10. Estructura de pavimento	45
Ilustración 11. Pilares claves en el desarrollo sostenible	49
Ilustración 12. Calle Intiraymi San Sebastián - Cusco	56
Ilustración 13. Calcinación del biosólido.....	58
Ilustración 14. Trituración del biosólido calcinado	58
Ilustración 15. Ensayo de límite líquido del biosólido.....	59
Ilustración 16. Procedimiento de secado y pesaje para muestras de biosólidos	62
Ilustración 17. Ensayo compresión no confinada con los % de biosólidos	63
Ilustración 18. Muestras de biosólidos en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 12%.....	63
Ilustración 19. Biosólido después del proceso de secado	67
Ilustración 20. Biosólido ya deshidratado y molido	67
Ilustración 21. Materiales ya cocidos.....	68
Ilustración 22. Gráfica de resultado para ensayo de CBR	69

Lista de tablas

Tabla 1. Biosólidos generados por la PTAR Salitre	25
Tabla 2. Correspondencia entre clases de capas granulares, tipo de pavimento y categorías de tránsito.....	46
Tabla 3. Granulometría para sub-bases de acuerdo el IDU	46
Tabla 4. Requisitos para sub-bases granulares de acuerdo al IDU	47
Tabla 5. Dosificación de biosólido al 3%	60
Tabla 6. Dosificación del biosólido al 6%.....	60
Tabla 7. Dosificación del biosólido al 9%.....	61
Tabla 8. Dosificación del biosólido al 12%.	61
Tabla 9. Análisis y datos concluidos.....	65
Tabla 10. Comparación y comprobación de normativas entre Perú y Colombia.....	74
Tabla 11. Comparación y comprobación de normativas entre Ecuador y Colombia.....	75

GLOSARIO

Aguas residuales: Son aquellas que han sido afectadas negativamente por la acción del ser humano y requieren tratamientos para ser purificadas y reusables.

Biosólido: Son los residuos orgánicos que resultan del tratamiento de aguas residuales de origen comercial, industrial y municipal (aguas negras).

Construcción sostenible: Utilizar materiales reciclables y renovables en los proyectos de construcción y reducir al mínimo el consumo de energía y la producción de residuos.

Economía circular: Es un sistema de aprovechamiento de recursos donde priman las 3R (reducción, reutilización y reciclaje) de los elementos, donde los residuos se convierten en recursos.

Estructura de pavimento: Conjunto de capas compuestas en materiales compactados que se construyen sobre la superficie del terreno para soportar el tránsito vehicular y distribuir las cargas de manera uniforme.

Ingeniería circular: Es un campo relativamente nuevo de la ingeniería que se centra en diseñar y aplicar soluciones con el objetivo de minimizar los residuos y la contaminación a lo largo del ciclo de vida de un producto y/o proyecto.

Lodo: Residuo extremadamente líquido (más de un 95% de agua). Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual inicial y características técnicas de los tratamientos llevados a cabo en las aguas residuales.

Mantenimiento rutinario: Conservación continua (a intervalos no mayores de cinco años), con el fin de mantener las condiciones óptimas para el tránsito y uso adecuado de la infraestructura de transporte.

Mitigación: Reducción de daños potenciales sobre la vida y bienes producidos por eventos ambientales y humanos.

Mejoramiento: Cambios en una infraestructura de transporte con el propósito de mejorar sus especificaciones técnicas iniciales.

Metales pesados: Son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta, en general tóxicos para los seres humanos.

Patógenos: Es un agente infeccioso que puede originar enfermedades y malestar al organismo en el que este.

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales se encarga de realizar la limpieza de las aguas residuales doméstica, industrial y comercial para que pueda ser devuelto de forma segura a nuestro medio ambiente.

Reciclar: Proceso en el cual materiales usados o desperdicios son convertidos en materia prima o nuevos productos.

Residuos: Fragmento que resulta de la descomposición o destrucción de un material.

Reutilizar: Acción de volver a utilizar un material o producto el cual ha sido desechado.

Sostenibilidad: Característica que permite satisfacer las necesidades actuales sin afectar las futuras.

Sub-bases: Es una capa granular de la estructura de pavimento ubicada entre la subrasante y la base

Subrasantes: Superficie que soporta la estructura de pavimento, está compuesta por terreno natural.

Vías terciarias: Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí y también vías de bajo volumen.

RESUMEN

El presente trabajo de grado corresponde a la investigación sobre el uso de biosólidos de PTAR, para el mejoramiento de subrasantes y subbases de vías terciarias en Colombia aplicando las metodologías de los casos de estudio realizados en Perú y Ecuador y así poder proponer una solución a la problemática presente en la salud pública y el medio ambiente. Para su realización, se parte del análisis de la composición de los lodos residuales provenientes del proceso de las PTAR, los procesos de estabilización según las normas y decretos, tanto para el uso de biosólidos en Colombia, como los requeridos en el uso de vías terciarias. Finalmente, esta investigación propone un mejoramiento de las subrasantes y subbases, para un proceso constructivo sostenible, innovando en el uso de materiales sustentables en la ingeniería civil para reducir el impacto ambiental.

Palabras claves: Biosólido, construcción, PTAR, sostenibilidad, vías terciarias.

**PROPOSAL FOR THE IMPROVEMENT OF SUBGRADES AND SUB-BASES IN
TERTIARY ROADS THROUGH SUSTAINABLE CONSTRUCTION WITH THE
APPLICATION OF PTAR BIOSOLIDS: CASE STUDIES IN PERU AND ECUADOR.**

SUMMARY

This degree work corresponds to the research on the use of biosolids from WWTPs for the improvement of subgrades and subbases of tertiary roads in Colombia, applying the methodologies of the case studies carried out in Peru and Ecuador in order to propose a solution to the present problems in public health and the environment. For its realization, we start from the analysis of the composition of the residual sludge coming from the WWTP process, the stabilization processes according to the norms and decrees, both for the use of biosolids in Colombia, as well as those required for the use of tertiary roads. Finally, this research proposes an improvement of subgrades and subbases, for a sustainable construction process, innovating in the use of sustainable materials in civil engineering to reduce the environmental impact.

Key words: Biosolid, construction, PTAR, sustainability, tertiary roads.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población en Colombia ha sido significativo en las últimas décadas, lo que conlleva aspectos positivos para el desarrollo de la sociedad, pero también efectos negativos debido a la necesidad de la explotación de recursos naturales como el agua, es por eso que, el consumo de agua ha mostrado un aumento relevante en los últimos años debido a diversos factores como lo es el incremento poblacional del país que obedece a hacer uso en gran magnitud de este recurso vital, dado esto, implica el manejo consciente del agua puesto que es usada en sectores domésticos, industriales y comerciales por lo cual, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) hacen su debido tratamiento para que pueda ser devuelta de forma segura al medio ambiente (Moscoso,2016).

Hoy en día, al momento de tratar los afluentes de aguas residuales en las PTAR, se generan subproductos estabilizados que reciben el nombre de biosólidos, los cuales ocasionan una gran contaminación ambiental conforme a que no se les suele dar un uso adecuado y terminan siendo depositados al aire libre generando problemáticas de contaminación, gestión y malestar en los ciudadanos por el olor desagradable que pueden llegar a producir, siendo así, uno de los mayores desafíos que enfrentan las PTAR es el manejo de los biosólidos generados en el tratamiento de agua.

Por otra parte, a causa del crecimiento de la población también se hacen necesarios desarrollos vitales en la construcción como lo son las vías, puesto que son la parte fundamental para el desarrollo de un país, en Colombia existe un déficit en la construcción y mantenimiento de las vías terciarias, actualmente son más los corredores viales en mal estado con los que cuenta el país y esto puede llegar a generar una problemática nacional puesto que ocasiona desigualdades territoriales y económicas. En este momento a las vías terciarias no se les da la

debida importancia que merecen, por lo cual se debe tener presente que sin el buen mantenimiento de ellas se ve afectado el transporte de alimentos y demás suministros generados por veredas o los sitios alejados a ciudades capitales, eso sin contar la mala calidad de vida que pueden llegar a tener las personas que habitan en zonas rurales pues se les complica su traslado. (DNP, 2020)

En consideración a ambas problemáticas, se pretende dar una alternativa ambiental para nuevos posibles materiales biodegradables en la construcción de sub-bases y subrasantes en vías terciarias y poder mejorar de gran manera la infraestructura vial terciaria colombiana, dado que la ingeniería en el área ambiental, está a favor de la naturaleza, en cuidarla y preservarla (Pellicer, 2021).

Debido a lo anterior, y gracias a estudios de casos realizados que ya hicieron participe este tipo de construcción sustentable, se desarrolla esta propuesta para implementar el uso de los biosólidos en la construcción de vías terciarias para el mejoramiento de sub-bases y subrasantes de manera sostenible que satisfagan a la comunidad y al desarrollo de un país en donde se prime la importancia de conservar y proteger el medio ambiente pues es un compromiso clave el cual tiene un ingeniero civil.

PROBLEMA

IDENTIFICACIÓN

Según estudios demográficos, entre 1960 y 2022, la población en Colombia se amplió de 16,06 millones a 51,87 millones de habitantes, lo cual representa un incremento del 223,0 % en 62 años, fomentando los procesos de urbanización y los movimientos migratorios para suplir las necesidades que abarca tanta población, los desarrollos urbanos se generan para crear espacios aptos y sostenibles que ofrezcan a los residentes una mejor calidad de vida, promoción del crecimiento económico y contribución al bienestar general de la población. (Galvis, L. A. 2015).

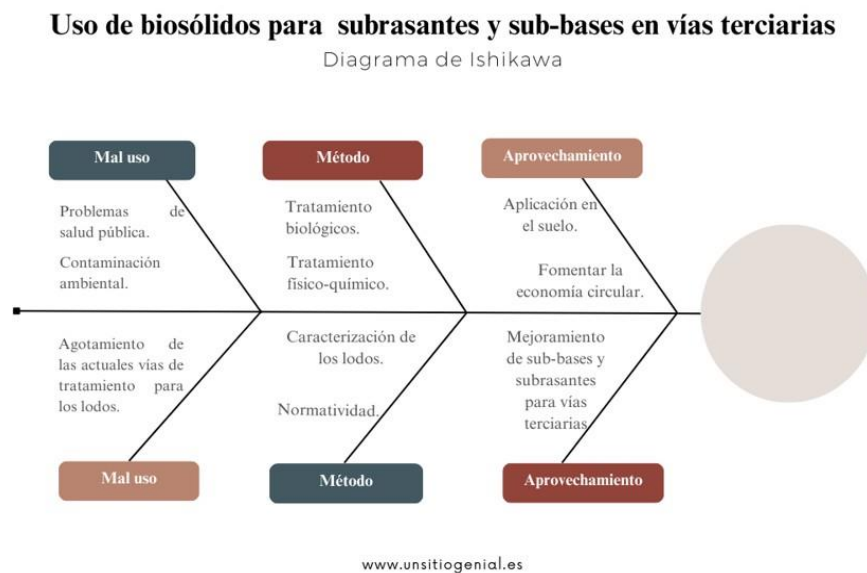
Al tratar temas del incremento poblacional en Colombia, lastimosamente no solo hace referencia a asuntos positivos como lo es el desarrollo de un país, sino que también se ve inmerso a temas negativos muy preocupantes y uno de ellos corresponde a la explotación del recurso hídrico, dado que al haber una sobrepoblación de habitantes, suplir sus necesidades básicas que para este caso de estudio es el doméstico, las PTAR experimentan un aumento en el volumen de aguas residuales que deben procesar, por ende, existe una creciente preocupación por la sobreproducción de biosólidos que estas generan.

En el año 2020, las PTAR en Colombia generaron aproximadamente 1.5 millones de toneladas de biosólidos, cifra significativa que debe ser alarmante porque al no tener un espacio adecuado para ellos y no hacer el debido uso de reutilización de los mismos se vuelve una problemática ambiental que afecta no solo los receptores de agua sino también a las personas que residen cerca, pues los biosólidos producen malos olores por la descomposición de materia orgánica que poseen. (Sawyer et al., 2011)

Para mitigar el impacto ocasionado, en el transcurso de los años varios países han venido analizando las diversas alternativas que resulta reutilizar los biosólidos, por ende, se han implementado normas con el objetivo de minimizar los riesgos asociados; la norma 40 CFR parte 503 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), clasifica los biosólidos de acuerdo con el contenido de patógenos portantes en dos categorías: **clase A** para los que pueden ser usados sin restricciones, presentan la más alta calidad y cumplen estrictas normas de contenido de patógenos y metales, los biosólidos de **clase B** han sido sometidos a un grado de tratamiento menor que los de clase A y pueden contener niveles más altos de patógenos y metales. La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT contempla indicadores similares, sin embargo, establece concentraciones menores de sus metales pesados. En Colombia hoy en día existe el Decreto 1287 de 2014 que establece las condiciones y criterios para el aprovechamiento de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en donde también catalogan los biosólidos en dos tipos de clase y así estipular el debido uso que se le debe hacer (Bedoya et al., 2013).

Existe una preocupación por la sobreproducción de biosólidos, ellos logran ser una fuente valiosa de nutrientes para el suelo, pero también pueden presentar contaminantes que si no se manejan adecuadamente se convierten en grandes problemas para la salud pública y para el medio ambiente, De acuerdo con la Ilustración 1, se identifican las causas raíces del problema, analizando todos los factores involucrados en la ejecución que conlleva este proceso de implementar los biosólidos para el mejoramiento de las sub-bases y subrasantes en vías terciarias como alternativa para una construcción sostenible. (EPA, 2023)

Ilustración 1. Diagrama de Ishikawa. Uso de biosólidos para subrasantes y sub-bases en vías terciarias



Fuente: propia

Ahora bien, partiendo de las bases planteadas para la implementación de los biosólidos como propuesta hacia el mejoramiento en algunas capas de pavimento (sub-bases y subrasantes) en vías de bajos volúmenes, se creó bajo una necesidad que está motivada por el instinto de subsistencia a la conservación y construcción de corredores viales, Colombia es un país con muchas deudas a la ciudadanía en términos de infraestructura vial lo que hace dificultar la movilidad.

DESCRIPCIÓN

Con el propósito de una mejor comprensión para el desarrollo del presente trabajo de grado, se realizan tres matrices DOFA. La primera matriz corresponde a los biosólidos, la generación de ellos está directamente relacionada con la producción de aguas residuales en el mundo como consecuencia del crecimiento exponencial de la población en los últimos 50 años, motivo por el cual, se han generado alternativas para el manejo de estos biosólidos disminuyendo

la contaminación que originan, al igual en la búsqueda de estrategias rentables para la disposición final de estos, dado que poseen características para posibles casos de reutilización en los sectores de producción.

Ilustración 2. Matriz DOFA sobre biosólidos



Fuente: Propia

La segunda matriz DOFA hace referencia a la construcción sostenible, con un aporte del 5.1% del PIB registrado en el año 2023, la construcción es el sexto sector económico más relevante de Colombia. Sin embargo, el desarrollo histórico de esta actividad ha dejado un gran costo ambiental, se calcula que en el país queda menos del 30% de los ecosistemas andinos a causa que siguen disminuyendo de manera acelerada debido a la pérdida de biodiversidad por actividades como la explotación para materiales de construcción, se agrava y empeora con la crisis climática, porque hace al país más vulnerable a los desafíos que ésta impone. (Razón pública, 2023).

Ilustración 3. Matriz DOFA sobre construcción sostenible



Fuente: Propia

Por último y no menos importante, se realiza la matriz DOFA para vías terciarias, reto fundamental para Colombia porque al ser un país en vía de desarrollo no es viable pavimentar toda la red vial terciaria debido a que su tráfico no es tan constante como el de en autopistas o vías primarias, sin embargo, eso no justifica el estado de abandono en las que se encuentran gran parte de esta red vial del país; la directora general del INVÍAS cita que “Las vías terciarias son un instrumento para que aumente el tráfico en nuestras vías principales”, asimismo, se deben mejorar estos corredores viales y preferiblemente realizarlo por medio de una construcción sostenible porque hoy día se ha implementado el uso de materiales biodegradables para la ejecución y optimización, para este caso se plantea en la sub-base y subrasante que hacen parte de la estructura de pavimento. (INVIAS, 2023)

Ilustración 4. Matriz DOFA sobre vías terciarias



Fuente: Propia

PLANTEAMIENTO

¿Cuáles deben ser los parámetros a tener en cuenta para utilizar biosólidos en las subrasante y sub-bases de vías terciarias de manera que su construcción sea sostenible en Colombia, según los casos analizados?

DELIMITACIÓN

CONCEPTUAL

Las PTAR tienen como objetivo reducir los agentes contaminantes presentes en el agua, al realizar este tipo de procesos, se generan unos productos derivados llamados lodos, los cuales se originan en los tratamientos primarios y secundarios, dicho material al ser estabilizados se convierte en biosólidos los cuales son un residuo biodegradable. Su composición no uniforme complica el tratamiento seguro, especialmente donde existe legislación relativa a la conservación de la naturaleza, además de materia orgánica y nutrientes, los biosólidos contienen una amplia gama de contaminantes domésticos e industriales, incluidos metales pesados, residuos de medicamentos, contaminantes orgánicos persistentes, patógenos o micro plásticos. (Hušek et al., 2022)

Al realizar el tratamiento de aguas residuales se parte de objetivos fundamentales con el fin de preservar el medio ambiente, los cuales van desde la protección de la cuenca hídrica receptora de dichas aguas, hasta la salud de quienes habitan entorno a dicho cuerpo receptor. Se deben resaltar los beneficios ambientales, sociales y económicos que puede traer el tratamiento de las aguas residuales producidas a nivel doméstico, industrial y comercial llegan a ser en alto grado beneficiosas para el desarrollo y aprovechamiento de un recurso no renovable del cual necesita la sociedad, como es el agua. (Pimiento, Nieves,, 2019).

Colombia genera aproximadamente más de 274 toneladas diarias de lodos debido al gran volumen de agua residual tratada puesto que su población es extensa, lo que conlleva un gran desafío para las PTAR, por lo tanto, representa un reto logístico y financiero para su debido transporte, almacenamiento y disposición final. (Elsa et al., 2018)

El presente trabajo de grado se limita a demostrar la importancia que resulta el buen manejo de residuos que para este caso son los biosólidos, en donde se evidencia que si pueden ser reutilizados en el mejoramiento de subrasantes y sub-bases en vías terciarias de Colombia, teniendo como referencia casos de estudio internacionales en donde su aplicación arrojó buenos resultados puesto que se implementa la construcción sostenible para crear e innovar proyectos respetuosos de ingeniería con el medio ambiente.

GEOGRÁFICA

En el mundo, Colombia es uno de los países más vulnerables al cambio climático por su condición tropical, diversidad geográfica y ecosistémica y las condiciones socioeconómicas, el país recibe las consecuencias ocasionadas por cambios del clima y se ve representado en las variaciones de temperatura y precipitación; el sector transporte ha sufrido las repercusiones del clima en diversas oportunidades dado que cuando suceden épocas de invierno, es decir lluvias frecuentes, las vías terciarias se suelen empantanar lo que conlleva casi imposible el desplazamiento en ellas pues los vehículos tienden a enterrarse. Por otro lado, cuando se presentan temporadas de sequía, es decir mucho sol, suele producir mucho polvo lo que provoca derrapes en los vehículos y así ocasionar en el peor de los casos un accidente a sus transeúntes. (ANI, 2014).

En el país existe un gran porcentaje de vías terciarias que necesitan mantenimiento o ser contruidos completamente y están a la espera de que se ejecuten proyectos puesto que se presenta una gran ineficiencia para atender la red rural, de esa manera, durante el segundo semestre del presente año, se marcará un hito en la historia vial de Colombia con la entrada en funcionamiento del Instituto Nacional de Vías Regionales (INVIR), una entidad dedicada

exclusivamente a la construcción, mantenimiento y mejoramiento de las vías terciarias del país pues el estado de las vías terciarias son variables fundamentales para el desarrollo de la población en las veredas más lejanas y recónditas de los diferentes municipios colombianos y no solo aquellas alejadas sino también vías de bajos volúmenes Una vez analizada esa problemática, se pretende implementar materiales sostenibles para el mejoramiento de la estructura de pavimento de vías terciarias con un enfoque ambiental en economía circular. (Estrada, 2020).

El objeto de estudio para esta investigación, es el proponer su aplicación en el desarrollo de vías terciarias por medio del mejoramiento de la subrasantes y sub-bases en Colombia, siendo la red vial más extensa del país de acuerdo con el Ministerio de Transporte (Mintransporte) se estima que la red terciaria tiene una longitud de casi 143.000 km de los cuales solo cerca de 1400 km están pavimentados. La malla vial terciaria se encuentra bajo la gestión, principalmente, de los municipios; lo que dificulta aún más su información, seguimiento y mantenimiento. (Grupo Bancolombia, 2022)

CRONOLÓGICA

La producción de lodos está directamente proporcionada al aumento de la población no solo en Colombia sino alrededor del mundo; conforme a una investigación ya realizada por Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), los biosólidos generados en el proceso de lodos activados, según el tratamiento recomendado por los consultores para la digestión, espesamiento y deshidratación de los lodos, fueron calculados en la simulación del BioWin que es un programa de software especializado y diseñado para simular y optimizar procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, a partir de las proyecciones de población, caudales y cargas contaminantes, que sirvieron para alimentar los datos de entrada del modelo, en la Tabla No.1 se presentan los valores de diseño utilizados para el dimensionamiento de las instalaciones de

manejo y disposición de los biosólidos de la PTAR para el horizonte del proyecto al año 2040, dato que se concluyó gracias a proyecciones realizadas, promedios anuales y mensuales contando una ampliación futura de la PTAR El Salitre ubicada en la ciudad de Bogotá, la cual es la más grande e importante de Colombia.

Tabla 1. Biosólidos generados por la PTAR Salitre

Año	Toneladas Métrica/d	m³/d
2015	119	433
2020	127	460
2025	128	467
2030	132	480
2035	134	487
2040	136	494

Fuente: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aeb74e52010b.pdf>

Se estudiaron resultados para largo plazo, se observa que la producción de biosólidos en la PTAR Salitre para la condición de diseño de las instalaciones de manejo y disposición de los mismos pasa de 460 m³ a 494 m³, lo que representa un aumento del 7 % en el lapso 2015 – 2040. (Sawyer & Koei, 2011).

Una necesidad primordial que ha venido surgiendo, es el manejo y disposición adecuada de esta cantidad de biosólidos producidos por la PTAR El Salitre, actualmente se disponen en el predio Tequendama- Soacha (con capacidad para 1.519.000 m³) y tiene como botadero de emergencia el predio El Cortijo, la carga contaminante en estos lugares va en incremento y asimismo las molestias generadas por el mal olor que producen. (Pinzón et al., 2018)

En las PTAR, la generación de lodos residuales produce diversas necesidades que requieren atención y soluciones prontas para un manejo adecuado y sostenible que trae este desafío presente en ellas y estas son:

- Manejo adecuado y disposición final en la producción de lodos.
- Estabilización y tratamiento.
- Optimización en los procesos de deshidratación.
- Reducción de olores.
- Normas regulatorias actualizadas
- Colaboración entre sectores.

Todo con el fin de saber operar correctamente este reto actual predominante para el tratamiento de aguas residuales que trae nuevas oportunidades para un segundo uso del biosólido debido que en actividades agrícolas y de construcción sostenible es muy llamativo su accionamiento. (Bedoya, 2013).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros necesarios para el mejoramiento en el proceso de construcción sostenible de sub-bases y subrasantes en vías terciarias de Colombia con la aplicación de biosólidos de PTAR.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Señalar las metodologías empleadas en los casos de estudio investigados sobre los biosólidos de PTAR para la construcción de carreteras.
- Analizar las características fisicoquímicas que contienen los biosólidos para poder ser utilizados como material aditivo de sub-bases y subrasantes en las vías terciarias y como es su comportamiento en el suelo.
- Proponer una alternativa de construcción sustentable por medio de los biosólidos de PTAR para el mejoramiento en la estructura de pavimento de una vía terciaria y así implementar el uso de la ingeniería circular.

ANTECEDENTES

Actualmente los grandes centros poblados o ciudades emergentes presentan un reto para el manejo de aguas residuales que estas generan por sus actividades socio-económicas, de allí se habla sobre las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR que son sistemas convencionales de ingeniería que realizan su mejoramiento para que se puedan reintegrar de manera segura al medio ambiente. Este tratamiento consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tiene como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua. Sin embargo, las PTAR generan una gran cantidad de residuos orgánicos conocidos como lodos o biosólidos los cuales son el resultado final del proceso de depuración, cuyas características dependen de la procedencia de las aguas residuales y el tipo de tratamiento al que se ve sometido (Chávez, 2011).

INTERNOS

Las PTAR generan residuos sólidos en donde algunas veces, no se les da un manejo óptimo para su reutilización en distintas industrias, no se buscan alternativas sostenibles para su implementación en la economía aun sabiendo que los biosólidos presentan un riesgo preocupante al medio ambiente, debido a que son dispuestos en botaderos y contaminan el recurso hídrico, es decir que, un derivado proveniente que llega al momento de tratar el agua residual para reducir o eliminar su carga contaminante es el biosólido que al no recurrir a la gestión responsable para su debido tratamiento y posteriormente a ser reutilizados de manera eficiente se convierten en un problema para el medio ambiente, impactando de manera negativa (Amador et al., 2015).

Cuando se logra entender la problemática ambiental por la que atraviesa el mundo actualmente, se pueden generar alternativas sostenibles respecto a la reutilización e

implementación de los biosólidos en varios sectores actuales, una de las posibles aplicaciones con gran conciencia es para el uso en la producción de diferentes materiales puesto que los aspectos económicos, sociales y ambientales del desarrollo sostenible provocaron gran interés en el uso de biosólidos para la industria de la construcción, debido a que esta ha venido desarrollando ideas sustentables con el medio ambiente para su preservación y conservación responsable (Wójcik, 2018).

Asimismo, es impulsado por las tendencias actuales del mercado para la reducción de huella de carbono, “La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros que la suscribieron”, dentro de los cuales se encuentra Colombia, en este caso reutilizando dichos biosólidos que hacen crear un gran beneficio para el medio ambiente, además de ser innovador en la región de América latina puesto que se encuentra en una posición única para poder convertirse en un gran líder en innovación sostenible, la región posee bastante biodiversidad y abundantes recursos naturales, lo cual le hace tener un panorama prometedor no solo para el presente sino a futuro. (ONU, 2018).

Para este caso de estudio, se propone el uso de biosólidos de PTAR para el mejoramiento de las vías terciarias en los procesos constructivos de las subrasantes y sub-bases, se tomarán de referencia los casos de estudio seleccionados (Perú y Ecuador) que a través en desarrollo del trabajo serán analizados para demostrar la gran alternativa que resulta implementar los biosólidos para temas ingenieriles, pues al reutilizarlos y hacerles el debido proceso de estabilización, su impacto ambiental es nulo y generará una economía circular o también conocida como la ingeniería circular, la cual básicamente es un nuevo modelo de producción y consumo que

garantiza un crecimiento sostenible en el tiempo, haciendo de los procesos constructivos de estas subrasantes y sub-bases sean muchos más eficientes ecológicamente.

EXTERNOS

En la actualidad, el planeta tierra atraviesa por grandes problemas ambientales y uno de ellos corresponde en la mala disposición y manejo de aguas residuales, por esa razón, las PTAR son una parte fundamental de la ingeniería moderna, jugando un papel vital para la protección en los cuerpos de agua y asimismo su sostenibilidad, evitando complicaciones en la salud e incomodidades para quienes habitan cerca de estos sitios, pues al haber un río o cualquier corriente de agua continua que este contaminado ya sean por virus, bacterias, parásitos, fertilizantes, pesticidas, fármacos, nitratos, fosfatos, plásticos, desechos fecales y hasta sustancias radiactivas o en el peor de los casos la presencia de cuerpos en descomposición ya sea humano o animal. Toda esta existencia de impurezas emitidas por el ser humano, ocasionan fuertes olores que conllevan la presencia de insectos y logran convertirlos en plagas que producen enfermedades. (Cooperación técnica república federal, 1991)

Ahora bien, el estado del conocimiento para las PTAR radica en la constante innovación y búsqueda de soluciones más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales las cuales se enfocan en la optimización de procesos para hacer sus tratamientos un poco más avanzados, la sustentabilidad y eficiencia energética a partir del biogás, tecnologías de vanguardia lo que implica la inteligencia artificial, el planteamiento a la resiliencia climática que es básicamente adaptarse a la escasez de agua que se presenta hoy en día debido a que los embalses que suministran este recurso hídrico se están secando, por ende, las personas ya se están dando cuenta y creando conciencia de que el agua no es un recurso finito y muy

probablemente la tercera guerra mundial sea por ella. (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2022)

Este importante paso de búsqueda en favor a la innovación de compromisos efectivos para las PTAR, va de la mano con el enfoque colaborativo de la comunidad, es clave contar con la participación de todos como lo es el gobierno, sectores privados y las organizaciones de la sociedad civil, para compartir conocimientos y así surgen nuevas ideas para el desarrollo e implementación de soluciones con el tratamiento de aguas residuales porque de igual manera, el manejo de estas va regulado por diversas normativas a nivel nacional, regional e internacional. Estas normativas establecen los estándares mínimos de calidad del agua residual tratada que debe cumplirse antes de su descarga al ambiente, así como los requisitos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las PTAR.

Es importante cumplir todas las normativas aplicables para garantizar un manejo adecuado de las aguas residuales, pues al no acatarlas se puede tener consecuencias legales y ambientales graves. (UN Environment Programme , 2023)

JUSTIFICACIÓN

Para lograr los objetivos de estudio, se acude al empleo de técnicas de investigación la cual busca por medio de la aplicación teórica y los conceptos básicos de aguas residuales, biosólidos, problemáticas ambientales, vías terciarias, estructura de pavimento, construcción sostenible y economía circular encontrar explicaciones a situaciones internas (contaminación, tratamiento de lodos residuales, alternativas de materiales para ingeniería civil, mejoramiento de sub-bases y subrasantes de vías terciarias) y del entorno (medio ambiente, población).

Una vez esto, se propone plantear el uso de posibles materiales sostenibles, como es la reutilización de los biosólidos en la construcción de subrasantes y sub-bases, cabe recordar que uno de los principios de la Ingeniería Civil es cuidar, proteger y preservar la naturaleza pues así genera un impacto social positivo conforme a las tres variables claves de esta investigación (biosólido, vías terciarias y construcción sostenible).

Hoy en día, existen países que ya implementaron el uso de biosólidos en carreteras de bajos volúmenes en donde se les realizó el debido análisis como lo es ensayos de CBR, Proctor y otros que serán mencionados más adelante para evaluar su factibilidad en la construcción de estas vías para su estructura de pavimento. En el transcurso del presente trabajo, se irán explicando esos aspectos importantes a considerar de dicha investigación en donde se llegará a la conclusión de que hoy día existen alternativas sostenibles de construcción para la ingeniería que a lo mejor no son tan conocidas y deben ser aplicadas para darle un buen uso a los biosólidos puesto que en las PTAR a veces generan problemas, pues al producir tantos no hay espacio suficiente para ellos.

De igual manera, acorde a normativas y especificaciones requeridas, se deben determinar los parámetros necesarios para el mejoramiento en el proceso de construcción sostenible de

subrasantes y sub-bases en vías terciarias con la aplicación de biosólidos que garantice su buen funcionamiento tomando como guía las metodologías empleadas en los casos de estudio seleccionados (Perú y Ecuador) y por ende analizar las propiedades generalizadas de los biosólidos, es decir que, se plantea la opción de poder aplicar esos casos seleccionados acá en Colombia, estos dos países elegidos para la investigación, al implementar esa nueva metodología los hace atractivos y competentes para el campo de la construcción sostenible.

El caso de estudio realizado Perú a cargo de la universidad Escuela profesional de ingeniería civil en la ciudad de Lima, estudiantes realizaron una tesis cuyo nombre es: **“Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco, 2022”** la cual en una vía de bajo volumen, elaboran diversos estudios para corroborar la efectividad de dicha implementación, por otro lado, para el caso de Ecuador, un estudiante de ingeniería civil de la universidad católica de Santiago Guayaquil realizó su trabajo de investigación que lleva por nombre: **“Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.”**

Al momento de querer implementar alguno de los dos estudios en Colombia, es importante tener en cuenta y cumplir la normativa correspondiente tanto para el uso de biosólidos y las especificaciones para vías, lo cual en el transcurso de esta investigación quedará evidenciado y se desarrollará de manera completa para una mejor comprensión a sus lectores y así dar a conocer que existen grandes alternativas innovadoras que ya fueron creadas para combatir el daño ambiental ocasionado por las obras ingenieriles a la naturaleza, solo hace falta implementarlas más y darlas a conocer.

MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del marco referencial estipulado para el presente trabajo de grado, se aborda el tema de biosólidos, el cual ha despertado gran interés en la ingeniería los últimos años debido a la gran variedad de usos que resulta su reutilización. Para comprender a fondo este fenómeno, es necesario recurrir a las principales teorías y modelos existentes en el área principal para la generación del biosólido.

En este sentido, el marco teórico de la presente investigación que lleva por nombre: *Propuesta para el mejoramiento de subrasantes y sub-bases en vías terciarias por medio de una construcción sostenible con la aplicación de biosólidos de PTAR: Casos de estudio Perú y Ecuador*, se basa en las siguientes teorías:

FUNCIONAMIENTO DE UNA PTAR

Una vez se consume el agua ya sea en casa, centros educativos, negocios, fábricas y entre otros miles aspectos y lugares que requieren el uso de la misma debido a su gran importancia porque es fuente de vida, salud y bienestar, es recibida por las PTAR quienes se encargan de realizarle el debido mantenimiento que requieren, pues al ser un recurso natural muy necesario llegan a estas plantas con presencia de contaminantes como lo son grasas y aceites, materia orgánica, microorganismos patógenos lo que las hace convertir en aguas residuales. (ciatej, 2024)

La mayoría de las PTAR en Colombia utilizan procesos de tratamiento en múltiples etapas para eliminar contaminantes presentes en estas aguas por medio de sedimentación, reacciones biológicas y desinfección para ser devueltas nuevamente al medio ambiente de forma segura. Las etapas comunes incluyen:

- **Pretratamiento:** Aquí son retirados objetos de gran tamaño presentes en el agua residual mediante rejillas y desarenadores.
- **Tratamiento primario:** En este proceso, las aguas residuales se someten a una sedimentación primaria, lo que permite que los sólidos más pesados se hundan y los materiales más livianos, como grasas y aceites, floten para ser desnatados. Esto elimina una porción importante de materia orgánica.
- **Tratamiento Secundario:** Consiste en el procedimiento biológico, empleando frecuentemente procesos de lodos activados, microorganismos como bacterias y protozoos descomponen la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Ilustración 5. Resumen esquema de tratamiento en una PTAR



Fuente: <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Aguas-residuales--plantas-de-tratamiento-y-contaminantes-emergentes/337>

Las PTAR son fundamentales debido a su gran importancia para la protección de la salud pública, el medio ambiente y la gestión sostenible del agua, conforme a la Ilustración 5, se evidencia una manera la cual es reutilizada el agua tratada, lugares como hospitales o lavaderos de carros, cuentan con su propia PTAR y asimismo, mitigan el consumo excesivo que generan estos centros para el servicio de la ciudadanía. Un desafío complejo que enfrentan las PTAR, es el manejo de biosólidos, los cuales son consecuencia del tratamiento ejecutado a las aguas residuales y, por ende, abarcan varios aspectos complejos de gestionar los cuales son:

- Gran volumen de producción.
- Peligrosos contaminantes.
- Costos de tratamiento y disposición final.
- Aceptación pública.

Para abordar de manera sensata estos desafíos, se debe contar con estrategias claves que involucren desde el tratamiento que requiere este tipo de agua hasta el transporte para la disposición final de la materia, pues de nada sirve mejorar la parte técnica sin tener en cuenta los demás imprevistos

BIOSÓLIDOS

Son el subproducto líquido, sólido o semisólido generado por el tratamiento de aguas residuales domésticas/industriales realizado por la PTAR, los cuales contienen características químicas, físicas y microbiológicas que, al ser tratados adecuadamente, permiten su reutilización posterior bajo la normativa estipulada de cada país, adicionalmente pueden contener agentes contaminantes. (Amador et al., 2015)

Ilustración 6. Biosólidos generados por PTAR del campus UMNG



Fuente: Propia

La estructura de los biosólidos puede variar de acuerdo a diversos factores y estos son:

Tipo de tratamiento de aguas residuales: Los diferentes métodos dan como resultados biosólidos con características variables, los cuales están presentes en los siguientes tratamientos del proceso realizados por las PTAR:

- **Tratamiento primario:** La sedimentación simple en este proceso inicial genera biosólidos con alta concentración de materia orgánica no degradada, mayor contenido de humedad y estructura heterogénea, incluyendo partículas gruesas y finas.
- **Tratamiento secundario:** Los procesos biológicos como el lodo activado o la filtración por membranas producen biosólidos con una estructura más fina y compacta, mayor contenido de materia orgánica degradada y menor humedad. La presencia de microorganismos y floc (aglomeraciones de bacterias) influye en la textura y propiedades de los biosólidos.
- **Tratamiento terciario:** Las técnicas de pulido como la filtración avanzada o la desinfección pueden refinar aún más la estructura de los biosólidos, eliminando partículas

suspendidas y reduciendo el tamaño de los flocs, lo que resulta en un material más homogéneo y seco.

Las características de las aguas residuales afluentes: La composición de dichas aguas que ingresan a la planta de tratamiento influye en la composición final de los biosólidos, pues en diferentes sectores se presentan diferentes tipos de agua.

Aditivos utilizados en el proceso de tratamiento: Algunos procesos de tratamiento implican la adición de productos químicos o materiales orgánicos que pueden alterar la composición de los biosólidos.

Por lo general y según (KBBIOENERGY, 2024).la composición típica de los biosólidos es:

- **Materia orgánica:** Componente principal, representa el 40% - 60% de su peso seco, es una mezcla de proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos húmicos.
- **Nutrientes:** Nitrógeno(N), Fósforo (P) y Potasio (K).
- **Metales pesados:** Pueden contener los siguientes: Zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), Plomo (Pb).
- **Microorganismos:** Poseen bacterias, hongos, virus; la mayoría son inofensivos, pero algunos pueden ser patógenos.
- **Agua:** Al ser provenientes de las PTAR, los biosólidos contienen mucha agua, su porcentaje (%) puede variar entre el 60% a 80% de su peso total.

De acuerdo a (North East Biosolids & Residuals Association , 2014) establece lo siguiente.

Para la estabilización del biosólido, estos se someten a varios tratamientos los cuales son:

- **Tratamiento físico:** Se enfocan en la separación de la fase sólida, fase líquida y la reducción del volumen del material. Los métodos físicos comunes incluyen:

Espesamiento: Se utiliza para aumentar la concentración de sólidos en los biosólidos, reduciendo el volumen y facilitando su manejo posterior. Técnicas comunes incluyen la sedimentación por gravedad, la centrifugación y la filtración por prensa.

Deshidratación: Elimina aún más agua de los biosólidos espesados, convirtiéndolos en un material semisólido o sólido. Se utilizan métodos como el secado por tambor rotatorio, el secado por lecho de lodo y la filtración por membranas.

Acondicionamiento: Se emplea para mejorar las propiedades físicas de los biosólidos, haciéndolos más manejables y adecuados para su uso final. Técnicas comunes incluyen la adición de cal, polímeros o agentes floculantes.

- **Tratamiento químico:** Buscan eliminar patógenos y estabilizar el material para prevenir su descomposición y la liberación de olores desagradables. Los métodos químicos comunes son:

- **Estabilización con cal:** Agrega hidróxido de calcio a los biosólidos para elevar el pH, destruyendo patógenos y estabilizando la materia orgánica.

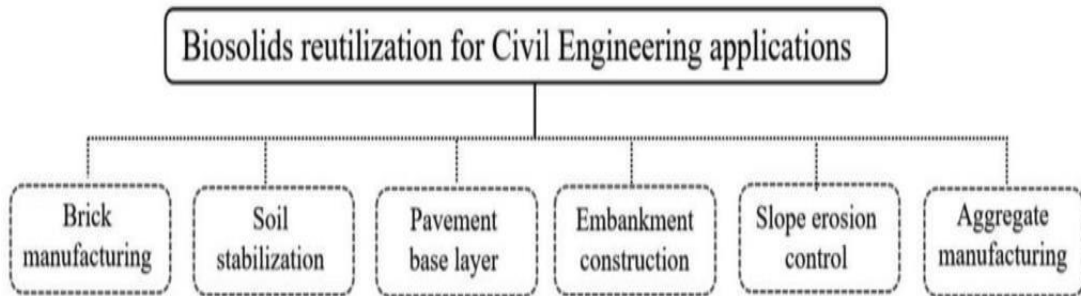
- **Digestión anaerobia:** Descompone la materia orgánica en los biosólidos en condiciones anaeróbicas, produciendo biogás y un lodo digerido más estable.
- **Oxidación térmica:** Utiliza altas temperaturas para incinerar la materia orgánica y reducir el volumen de los biosólidos.

La disposición final de los mismos resulta ser compleja, pues requiere un manejo muy cuidadoso por el volumen que alcanzan a producir las PTAR debido a que operan las 24 horas del día, los 7 días de la semana, y, por otro lado, se encuentran los riesgos ambientales pues algunas veces pueden llegar a contener sustancias muy contaminantes provenientes de las aguas tratadas.

En base a lo anterior, se crea la necesidad prioritaria de darle uso a los biosólidos, por lo general, las empresas encargadas de recibir los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) no cuentan con la capacidad, espacio y el debido manejo requerido para recibir las grandes cantidades producidas de los mismos; hoy día, existen varias alternativas mundiales para la disposición final de este material, se encuentran la ceramización, vitrificación, incineración, disposición en rellenos sanitarios, implementación en suelo agrícola por medio de compostaje y últimamente surgió la implementación del mismo para temas constructivos. (González et al., 2019)

BIOSÓLIDOS APLICADOS EN LA INGENIERÍA CIVIL

Ilustración 7. Biosólidos en ingeniería civil



Fuente: *Application of biosolids in civil engineering: State of the art*

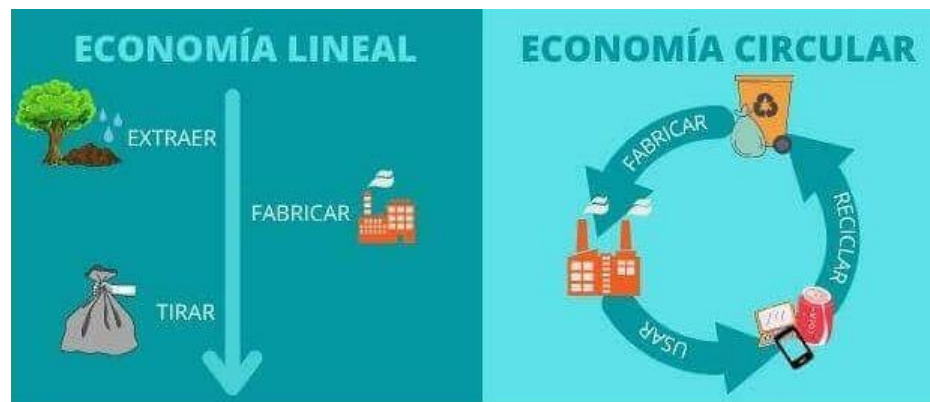
Según las proyecciones realizadas por el Departamento Administrativo Nacional De Estadística (DANE), el crecimiento de la población en Colombia continuará durante las próximas cuatro décadas, hasta 2064, año en el que el país alcanzaría el pico poblacional de 63'197.004 personas; eso equivale un aumento exorbitante para el consumo de recursos y materias primas requeridas por el ser humano y de ahí parte la necesidad de crear una conciencia sostenible en la sociedad. (Galvis, L. A. 2015).

En función de lo anterior, la ingeniería civil ya está optando la búsqueda de nuevos materiales y componentes que ayuden a economizar y mejorar los procesos de construcción, así como a preservar los recursos del planeta, por eso arriba la idea de reutilizar los biosólidos su aplicación en la construcción, como se pudo observar en la (Ilustración 7), estudios han caracterizado los biosólidos con énfasis en sus propiedades geotécnicas para la construcción de terraplenes de carreteras, control de la erosión de taludes, fabricación de ladrillos y áridos y para mejoramientos en las capas de pavimento para vías de bajos volúmenes. (Wanare et al., 2022)

Sin embargo, para poder optar las aplicaciones de biosólidos en la ingeniería civil, estos contienen propiedades que deben ser mejoradas, por ende, es necesaria su debida estabilización y se propone mediante el uso de aditivos los cuales son: cal, cemento y emulsión, en contenidos que pueden variar entre 2% y 8% de acuerdo a estudios internacionales ya realizados para satisfacer los requisitos mínimos de las bases en las carreteras y así tener una compactación adecuada para evitar posibles asentamientos del terreno que se pueden ocasionar posteriores a la construcción, a medida que pasa el tiempo, varios países han estado desarrollando estudios y ensayos para esta nueva metodología sostenible, de forma que, en una PTAR ubicada al oeste de Melbourne Australia, concluye que para implementar los biosólidos estabilizados en rellenos de terraplenes se utilice una geomembrana impermeable para evitar cualquier filtración o lixiviación en la ejecución. (Figueirêdo et al., 2021).

El biosólido es un gran aliado a la hora de hablar sobre economía circular, la cual propone hacer un cambio en el paradigma lineal, que consiste en hacer uso de una sola vez cualquier elemento o material y así quitarle la oportunidad de no poder ser reutilizado (Ilustración 7), es por esto que, la economía circular convierte los residuos en recursos valiosos porque se basa en Reciclar, Reutilizar y Reducir (3R); de esa manera, van tomando más importancia lo cual trae consigo cuidados necesarios requeridos para hacer de ellos un producto muy comercializable y atractivo, el Banco Mundial en su informe “de Residuo a Recurso”, resalta la necesidad de valorar el agua residual: “El agua residual no es un desecho; pueden recuperarse varios recursos de ella: agua, energía, biosólidos y nutrientes, todos estos recursos, cuando son recuperados, llegan a generar grandes beneficios los cuales radican en crear un flujo adicional de ingresos o reducir los costos operativos donde se conserva y preserva el planeta tierra por medio de una sostenibilidad”. (Grupo epm, 2022)

Ilustración 8. Diferencias entre economía lineal y economía circular



Fuente: <https://familiesforsdgs.org/economia-circular-y-ods/#:~:text=Cinco%20de%20los%2017%20ODS,y%20otros%203%20est%C3%A1n%20relacionados>

VÍAS TERCIARIAS

Son aquellas vías de bajo volumen las cuales conectan zonas rurales con cabeceras municipales, centros poblados y predios de producción agropecuaria. Estas vías juegan un papel fundamental en el desarrollo rural, ya que permiten el transporte de productos agrícolas, insumos, personas y servicios básicos a las comunidades rurales.

Ilustración 9. Red vial terciaria



Fuente: <https://fcp.gov.co/fondo-colombia-en-paz-anuncia-inicio-de-inversiones-en-vias-terciarias-del-caqueta/>

Clasificación de vías terciarias:

Las vías terciarias se clasifican en tres categorías según su función y nivel de servicio:

- **Vías locales:** Conectan viviendas, predios y pequeñas comunidades.
- **Vías veredales:** Conectan veredas y centros poblados menores.
- **Vías municipales:** Conectan centros poblados menores con la red vial secundaria o con centros poblados de mayor tamaño.

Características importantes:

- **Menor volumen de tráfico:** Al estar retiradas de las cabeceras municipales y vías primarias, hace que el transporte por esta red vial sea limitado. La seguridad también influye mucho en este aspecto debido a que, al quedar lejos se puede evidenciar presencia de grupos armados o bandas delincuenciales, aquellos que ocasionan hurtos a sus transeúntes.
- **La mayoría no están pavimentadas:** Son muy pocas las vías terciarias que se encuentran pavimentadas puesto que el punto de concentración importante para esta actividad se centra en las vías principales.
- **Más angostas:** Sus anchos de calzada varían de 3 a 6 metros.
- **Diseño geométrico limitado:** Al no tener tanto paso vehicular y estar más adentro de las montañas, no se hace tan necesarios requisitos estrictos de curvas, pendientes y distancias visuales.

SUBRASANTES

Es la capa en que se apoya o cimienta la estructura de pavimento (terreno natural de cimentación o explanación de una vía), de ella prácticamente depende el buen funcionamiento en la estructura de pavimento pues es la variable principal, puede estar formada en corte o relleno. De la calidad de la subrasante dependerá en gran parte, el espesor de pavimento, por ello esta debe cumplir con los parámetros de capacidad de soporte o resistencia.

Funciones de la capa subrasante

Las principales funciones de la capa subrasante según (SURICHAQUI, 2017) son:

- Recibir y resistir las cargas generadas por el tránsito que le son transmitidas por el pavimento.
- Transmitir y distribuir de forma adecuada las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Por lo general, las vías terciarias en su estructura de pavimento, no cuentan con la carpeta asfáltica que es la última capa, pues al ser vías de bajo volúmenes no requieren de esta por temas económicos y factibles.

Ilustración 10. Estructura de pavimento



Fuente: <https://www.facebook.com/yachaywasijaen/photos/a.831808740331180/2100791906766184/?type=3>

SUB – BASES GRANULARES

Capa de la estructura de pavimento, la cual su principal función es soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas aplicadas en la capa de rodadura por donde circulan los vehículos. De acuerdo al nivel de tráfico, importancia de la vía, tipo de pavimento y la posición dentro de la estructura, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en el capítulo 4, tabla 400.1, definen tres diferentes categorías de capas granulares para sub-base las cuales denomina Clase A (SBG_A), Clase B (SBG_B) y Clase C (SBG_C) como lo demuestra la tabla No. 2. (IDU, 2015)

Tabla 2. Correspondencia entre clases de capas granulares, tipo de pavimento y categorías de tránsito

Tipo de Capa	Categorías de Tránsito		
	T0 – T1	T2 – T3	T4 – T5
Pavimento Asfáltico			
Base Granular	BG C	BG B	BG A
Subbase Granular	SBG C	SBG B	SBG A
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland			
Base Granular	BG B	BG A	NA
Subbase Granular	SBG C	SBG B	SBG A

Fuente: <https://www.idu.gov.co/web/content/7570/ET-Cap4.pdf>

Según el IDU en su sección 400-11, los agregados que se usen en la construcción de sub.bases deben cumplir ciertas características y requisitos importantes mediante el ensayo INV E – 213 – 07.

Tabla 3. Granulometría para sub-bases de acuerdo el IDU

		TAMIZ (U.S. Standard)								
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No. 200
		%PASA								
Subbase	SBG_1	100	80-95	60-90	-	36-68	25-50	15-35	06-20	0-10
	SBG_2	-	100	75-95	62-88	42-78	28-55	16-40	06-22	0-12
	SBG_PEA	100	75-98	60-90	-	36-66	25-52	15-40	06-25	0-14

Fuente: <https://www.idu.gov.co/web/content/7570/ET-Cap4.pdf>

Tabla 4. Requisitos para sub-bases granulares de acuerdo al IDU

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Subbase Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Ángeles	En 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval % máximo	Agregado Grueso	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	Valor en seco, Kn mínimo y Relación húmedo/seco % mínimo	INV E-224-07	NA	40-65	50-70	60-75
Durabilidad						
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	18
Limpieza						
	Límite Líquido, % máximo	INV E-125-07	40	25	25	25
	Índice de Plasticidad, % máximo	INV E-126-07	10	6	3	3
	Equivalente de Arena, % mínimo	INV E-133-07		18	18	20
	Valor de Azul de Metileno, máximo	INV E-235-07		10	10	10
	Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo	INV E-211-07		2	2	2
Geometría de las partículas						
	Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo1 cara - 2 caras	INV E-227-07	NA	NA	NA	50-30
	Índice de Aplanamiento, % máximo	INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
	Índice de Alargamiento, % máximo	INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
	Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)	INV E-239-07	NA	NA	NA	NA
Capacidad de Soporte						
	CBR, % mínimo - Referido al 95 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 -07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.	INV E148-07	20	30	40	60

Fuente: <https://www.idu.gov.co/web/content/7570/ET-Cap4.pdf>

El óptimo cumplimiento de estas especificaciones garantiza una buena ejecución para la sub-base granular y así evitar daños o alteraciones a esta capa de pavimento, pues si llegase a existir un daño trae consecuencias negativas desde muy leves como lo es pequeñas fisuras o un daño muy grave como lo es el hundimiento de la misma.

MARCO CONCEPTUAL

Con el paso de los años, se ha evidenciado una crisis global que radica en el gran deterioro que ha sufrido el planeta tierra, un clima que preocupa pues se calienta con rapidez, como fue el caso de España en el año 2023 se presentó la temporada de verano más calurosa registrada en los últimos tiempos.

Colombia no se queda atrás, también se vio afectada en los varios departamentos, como fue el caso del Departamento de Bolívar en donde las temperaturas alcanzaron los 41°C con una sensación térmica de 44°C. Tasas de extinción aceleradas en la flora y fauna y una población creciente que ejerce cada vez más presión sobre la naturaleza son el causante del desgaste tan preocupante por el que está atravesando hoy en día el planeta tierra. (National Geographic, 2024)

Es por tal motivo que la humanidad ha venido tomando conciencia sobre la importancia de preservar el medio ambiente, están entrando en razón con los recursos que nos brinda la naturaleza pues lastimosamente no son finitos. Bajo esa necesidad urgente, han venido surgiendo leyes, licencias, acuerdos y demás normativas ambientales que regulan el daño ocasionado por las actividades realizadas por los humanos; el gran acuerdo de Río 1992 y Johannesburgo 2002 fueron dos eventos históricos para el desarrollo sostenible pues marcaron el hito en la lucha por crear conciencia a nivel global, ambas cumbres compartieron objetivos comunes, pero todo fue se creo bajo el mismo fin. (ONU, 2018)

La (Ilustración 11), evidencia los 3 pilares claves de la sostenibilidad, en donde se demuestra que todo a la final está relacionado para la preservación del medio ambiente, es decir que, se debe trabajar de la mano con los demás sectores para lograr una conciencia responsable y empática con el planeta tierra. En resumen, la Cumbre de Río 92 sentó las bases para la sustentabilidad a nivel global, mientras que la Cumbre de Johannesburgo 2002 se enfocó en la

implementación y seguimiento de los objetivos establecidos en Río. Ambas cumbres han sido fundamentales para impulsar el desarrollo sostenible y abordar los desafíos ambientales y sociales del siglo XXI. (UN Environment Programme , 2023)

Ilustración 11. Pilares claves en el desarrollo sostenible



Fuente: <https://sermassostenible.org/el-proyecto/las-empresas/sostenibilidad-3-pilares/>

MARCO INSTITUCIONAL

Las variables claves para este trabajo de grado corresponden a: biosólidos, vías terciarias y construcción sostenible; además, a nivel nacional e internacional existen entes gubernamentales u organizaciones que las respaldan y sustentan todo lo relacionado a su composición, importancia, estudios y muchas más aspectos sobresalientes, necesarios e indispensables para el manejo de los mismos.

En Colombia, la gestión de biosólidos, involucra diversas entidades que interactúan en diferentes etapas de su proceso, desde la generación hasta la disposición final, como lo son:

- **Organismos generadores de biosólidos:** Corresponden a las PTAR pues son las principales generadoras de ellos debido a los tratamientos realizados para las aguas residuales.
- **Entidades regulatorias, de control y vigilancia:** Ministerio de vivienda, Ciudad y Territorio, Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).
- **Empresas de gestión en biosólidos:** En el mercado, existen empresas que ofrecen servicios de tratamiento, transporte y disposición final para estos materiales orgánicos, es más común ver este tipo de empresas en Estados Unidos.

Por otra parte, el INVIAS es fundamental para la gestión y desarrollo de las vías terciarias en Colombia, de acuerdo a la entidad, representan una red vial extensa que conecta las zonas rurales con los centros poblados y facilita el acceso a bienes y servicios esenciales para las comunidades. Por la necesidad que requiere la logística en el mantenimiento y construcción de las mismas, llega INVIR entidad creada por el último gobierno nacional. Ahora bien, para establecer los criterios técnicos mínimos en el diseño, construcción, mantenimiento y operación

es necesario acudir al Manual de Carreteras publicado por el INVIAS donde explica de forma más técnica y concisa el diseño geométrico para este corredor vial.

Con relación a la construcción sostenible, se debe resaltar que en Colombia este tema es un esfuerzo conjunto que requiere mucha colaboración y compromiso de todos los actores involucrados, existen diversas entidades que respaldan su objetivo y desarrollo como lo son las universidades, al seguir indagando y creando centros de investigación sobre el tema llegan a nuevas alternativas para el buen manejo óptimo de esta construcción que es amigable con el medio ambiente, organismos gubernamentales también brindan garantía en donde estipulan acuerdos para que sean implementados y así promover su uso en varios sectores de producción en el mercado.

MARCO LEGAL

En el marco de territorio nacional se encuentran:

- Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- Ley 99 de 1993, creada por el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 1287 de 2014 es una norma emitida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia que establece los criterios para el aprovechamiento de los biosólidos generados en las PTAR.

- CONPES 3874 del 21 de noviembre de 2016. Política Nacional para la Gestión Integral De Residuos Sólidos.

- Decreto 1076 de 2015 (Régimen Nacional de Licencias Ambientales): Regula las actividades que pueden afectar el medio ambiente, incluyendo la construcción y mantenimiento de las PTAR y el manejo de biosólidos, establece requisitos para la concesión de licencias y procedimientos de evaluación del impacto ambiental.

- Manual de carreteras del INVIAS es una herramienta fundamental para los ingenieros, diseñadores y constructores de vías en Colombia. Contiene información detallada sobre diversos aspectos del diseño geométrico de vías.

Para el marco internacional se tiene:

- Agencia de Protección Ambiental (EPA) en los Estados Unidos. Es una agencia federal responsable de proteger la salud humana y el medio ambiente mediante el desarrollo y el cumplimiento de regulaciones ambientales.

- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, es una norma que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos derivados de sistemas de alcantarillado urbano o municipal y PTAR.

- Agenda 2030, Colombia participa activamente en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) descritos en esta agenda, un marco global adoptado por todos los estados miembros de las Naciones Unidas en 2015.

- The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el desarrollo de planes de gestión del transporte para caminos rurales y

de bajo volumen, proporciona orientación y recomendaciones generales que se pueden aplicar al diseño de caminos terciarios.

MARCO HISTÓRICO

Ha medida que evoluciona el hombre en sus descubrimientos y luego plasmarlos, la ingeniería también experimenta nuevos cambios, es por eso que, el tratamiento de agua potable en Colombia ha venido desarrollándose últimamente, hoy día existen procesos muy componentes para la potabilización de la misma, los cuales no existían en siglos pasados como lo es la implementación de cloro en estos procesos. Ahora bien, al hablar de PTAR, de igual forma se toma de referencia a los biosólidos, el término fue introducido por primera vez en la industria de tratamiento de aguas residuales a principios de los años 90 y luego se abrió camino para distinguir los lodos residuales de alta calidad que, de los convencionales, pues estos contienen grandes cantidades de contaminantes si no son tratados de manera adecuada como los otros. (Wanare, 2022)

En el siglo XXI, el enfoque del tratamiento de agua potable se enfoca en la sostenibilidad y la eficiencia energética, pues estas obras hidráulicas son de suma importancia para la comunidad y, por ende, deben ser promotoras en el cuidado de la naturaleza. Con el paso del tiempo, las PTAR son fundamentales para la protección del medio ambiente, pues reducen los agentes contaminantes presentes en el agua, aportan sostenibilidad social al mejorar la calidad de vida de las personas y cuerpos de agua.

MARCO AMBIENTAL

El objeto fundamental del presente trabajo de grado se basa en la construcción sostenible, a medida que las personas toman conciencia sobre lo fundamental que es el cuidado y preservación de la naturaleza debido a que los recursos suministrados por ella no son finitos, a raíz de ello, surgen nuevas alternativas para mitigar ese daño ocasionado. (Ministerio de Ambiente, 2013) menciona que la construcción sostenible consiste “*en restaurar y mantener la armonía entre el ambiente natural y el espacio construido, buscando crear asentamientos que reafirmen la dignidad humana y promuevan la equidad social y económica, lo cual implica, adoptar nuevas prácticas de diseño, de construcción, procesos de operación y mantenimiento con un enfoque ambiental, social y económico.*”.

La construcción de carreteras es una de las obras que más genera daños al medio ambiente, pues en algunas ocasiones se tiene que deforestar vegetación, derrumbar montañas o suprimir en el peor de los casos, un cuerpo de agua para que la vía pase por allí y así satisfacer las necesidades de la comunidad. La ejecución de una obra vial es de suma importancia para un país pues promueve la economía, el turismo, expansión de ciudades, proporciona calidad de vida a quienes hacen uso de ella e infinidad de cosas buenas que conlleva la construcción de una vía, pero, asimismo como se benefician las personas, la naturaleza también debería estarlo o por lo menos no seguir causándole daños en gran magnitud.

Al implementar recursos sostenibles, se incentiva a las prácticas de las mismas para materiales en la construcción de carreteras y así poder cuidar y preservar el entorno que rodea a la sociedad, una construcción sostenible no solo esta en pro del medio ambiente, sino que también proporciona una mejor calidad de vida a las personas porque sobre eso se enfocan los tres pilares de la sostenibilidad (medio ambiente, económico y social).

METODOLOGÍA

Sobre la base de los elementos teóricos y metodológicos obtenidos en el presente trabajo de grado, se analizarán los dos casos de estudio seleccionados en Latinoamérica para poder implementar la estrategia de trabajo que emplean dichos países (Ecuador y Perú) y así llevarlo a la práctica en Colombia debido a que actualmente las vías terciarias existentes requieren mantenimiento o construcciones desde cero, es relevante destacar que la calidad de las carreteras es un indicador crucial para el desarrollo social y económico de un país.

Conforme a una encuesta realizada en 2019 por el Foro Económico Mundial (FEM), quien presentó a los países con mejores vías en América Latina, Ecuador obtuvo el segundo puesto dentro de 10 participantes, al contar con una infraestructura vial en buen estado y cumpliendo sus mantenimientos lo hizo merecer este resultado. Además, ha demostrado avances viales considerables en las últimas décadas a pesar de los desafíos que puedan surgir, todo esto con el fin de tener un avance significativo en la economía, comunidad y sostenibilidad para mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Por otro lado, Perú a nivel mundial se encuentra entre los 15 países con mejor conectividad, la FEM reconoce la construcción de modernas autopistas y carreteras que hacen impulsar el turismo, comercio y la integración regional, debido a que también se destaca por la seguridad vial que le brinda a su tránsito vehicular. Pese a que presentan retos por mejorar como cualquier región, aun así, cuenta con una red vial aceptable y en buenas condiciones. (Foro Económico Mundial , 2019)

La calidad de las vías Latinoamérica cambia considerablemente de un país a otro, últimamente se han logrado avances importantes que contrarrestan un poco los desafíos presentes y así alcanzar una red vial moderna, eficiente y sostenible en toda la región. Sin embargo, existen

perspectivas para el desarrollo vial en América Latina y una de ellas es la implementación de prácticas sostenibles, que básicamente es utilizar materiales y métodos de construcción amigables con el medio ambiente y resistan las condiciones climáticas presentes en este continente. (Bulletin Fal, 2018)

CAPÍTULOS

CASO DE ESTUDIO REALIZADO EN PERÚ

En el año 2022, dos estudiantes pertenecientes a la universidad Escuela profesional de ingeniería civil en la ciudad de Lima Perú, realizan una tesis cuyo nombre es: **“Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco, 2022”**, la cual proponen una alternativa de uso con el biosólido generados por las PTAR, para estabilización de suelo arcilloso de subrasante, en diferentes dosificaciones; cuyo objetivo general es determinar en qué medida el biosólido de PTAR influye en la estabilización el cual es un proceso que permite mejorar propiedades físicas y mecánicas del suelo natural para la capa de pavimento seleccionada.

Ilustración 12. Calle Intirraymi San Sebastián - Cusco



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 48

Para esta investigación, se estudiaron los biosólidos de la PTAR San Jerónimo – Cusco en donde llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

1. Etapa de recolección y descripción del material biosólido de PTAR:

Las estudiantes solicitaron la muestra de material a la PTAR, la cual correspondía a 30 kilos de biosólidos, prueba primordial para continuar con el avance del trabajo en curso, pues el nuevo uso que se le iba a dar a este material no solo aportaría al medio ambiente sino también a una nueva materia prima para materiales en ingeniería civil.

2. Secado y calcinado del biosólido:

Fase importante porque así se retira toda el agua contenida del biosólido, el proceso dura aproximadamente 3 horas por cada 0.030m³ de lodo residual, llegando a una temperatura de 350°C, sobre eso, se tomó casi 1 hora para llegar al punto de calcinación de materia orgánica a una temperatura de 500°C (temperatura recomendada por los especialistas para eliminar la materia orgánica de acuerdo a especificaciones técnicas).

El procedimiento de calcinación tuvo una duración aproximada de 12 horas, una vez calcinado totalmente el biosólido, se tritura en frío con un apisonador para obtener unas partículas más finas, al tenerlas, se procede a realizar la granulometría del biosólido ya calcinado y triturado en una muestra de 500 gramos, a la cual previamente se le realizó el debido lavado para retirar impurezas que pudiesen haber estado presentes, luego pasarlo por el tamiz N° 200, así se determinó que este material tiene la caracterización de un limo.

Ilustración 13. Calcinación del biosólido



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg33

Ilustración 14. Trituración del biosólido calcinado



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 34

Al realizarle los ensayos límites de attemberg (LL y LP), obtuvieron como resultado que el biosólido no contiene estos dos límites puesto que al realizar este ensayo para el límite líquido (LL) empezó a presentar fracturas y así sucedió con el ensayo de límite plástico (LP) no logrando cumplir la norma establecida. Por medio de un análisis visual como se evidencia en la (ilustración 15), el biosólido obtuvo la apariencia de una arena fina la cual es la más común para las construcciones.

Ilustración 15. Ensayo de límite líquido del biosólido



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo

3. Exploración del suelo natural

La muestra la realizaron en la calle Intirraymi en el departamento de Cusco, según especificaciones técnicas de Perú (Reglamento nacional de edificaciones CE 010 pavimentos urbanos), el muestreo se realizó con 3 calicatas (exploración de terreno) de 250 kg para un total de 120 especímenes. El procedimiento fue la sustitución del suelo natural por el biosólido en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 12%.

4. Ensayos de laboratorio para los biosólidos.

Realizaron la sustitución de % suelo natural debidamente pesada con las dosificaciones seleccionadas de biosólido; los ensayos elaborados se ejecutaron según las especificaciones técnicas peruanas que fueron:

- Límites de attemberg.
- Índice de plasticidad.
- % de humedad.

- Proctor estándar.
- Resistencia a la compresión no confinada.
- Cohesión.
- CBR.
- Resistencia al esfuerzo cortante.

La implementación de biosólidos la realizaron de la siguiente manera:

Tabla 5. Dosificación de biosólido al 3%

N° DE VECES	INDICADOR	%	PESO DEL BIOSÓLIDO	PESO DEL SUELO	PESO TOTAL / N° MUESTRA
03	Densidad Máxima Seca	3%	1125 g	36375g	37500g
03	Densidad Máxima Húmeda		1125g	3675g	37500g
03	Resistencia a la Compresión		15.3g	494.7g	510g
03	Cohesión		27g	873g	900g
03	CBR		1620g	52380g	54000g
03	Resistencia al Esfuerzo Cortante		27g	873g	900g
03	Limite Límite (LL)		54g	1746g	1800g
03	Limite Plástico (LP)		5.4g	164.6g	180g
	Índice de Plasticidad		IP = LL – LP		

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 65

Tabla 6. Dosificación del biosólido al 6%

N° DE VECES	INDICADOR	%	PESO DEL BIOSÓLIDO	PESO DEL SUELO	PESO TOTAL / N° MUESTRA
03	Densidad Máxima Seca	6%	2250g	35250g	37500g
03	Densidad Máxima Húmeda		2250g	35250g	37500g
03	Resistencia a la Compresión		30.6g	479.4g	510g
03	Cohesión		54g	846g	900g
03	CBR		3240g	50760g	54000g
03	Resistencia al Esfuerzo Cortante		54g	846g	900g
03	Limite Límite (LL)		108g	1692g	1800g
03	Limite Plástico (LP)		10.8g	169.2g	180g
	Índice de Plasticidad		IP = LL – LP		

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 66

Tabla 7. Dosificación del biosólido al 9%

N° DE VECES	INDICADOR	%	PESO DEL BIOSÓLIDO	PESO DEL SUELO	PESO TOTAL / N° MUESTRA
03	Densidad Máxima Seca	9%	3375g	34125g	37500g
03	Densidad Máxima Húmeda		3375g	34125g	37500g
03	Resistencia a la Compresión		45.9g	464.1g	510g
03	Cohesión		81g	819g	900g
03	CBR		4860g	49140g	54000g
03	Resistencia al Esfuerzo Cortante		81g	819g	900g
03	Límite Límite (LL)		162g	1638g	1800g
03	Límite Plástico (LP)		16.2g	163.8g	180g
	Índice de Plasticidad		IP = LL – LP		

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 50

Tabla 8. Dosificación del biosólido al 12%.

N° DE VECES	INDICADOR	%	PESO DEL BIOSÓLIDO	PESO DEL SUELO	PESO TOTAL / N° MUESTRA
03	Densidad Máxima Seca	12%	4500 g	33000 g	37500g
03	Densidad Máxima Húmeda		4500g	33000g	37500g
03	Resistencia a la Compresión		61.2g	448.8g	510g
03	Cohesión		108g	792g	900g
03	CBR		6480g	47520g	54000g
03	Resistencia al Esfuerzo Cortante		108g	792g	900g
03	Límite Límite (LL)		216g	1584g	1800g
03	Límite Plástico (LP)		21.6g	158.4g	180g
	Índice de Plasticidad		IP = LL – LP		

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 66

- Densidad máxima seca y densidad máxima húmeda:

Este ensayo es conocido como Proctor Estándar, lo realizaron bajo la norma MTC E 116, mezclaron ambas muestras, es decir que, reemplazaron parte de suelo natural por una dosificación de biosólido.

Al realizar el desmolde, se lleva la muestra al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 ° C para su secado, al cumplir este tiempo se pesa nuevamente junto con la masa de suelo seco. Dicho procedimiento lo realizaron 5 veces para cada dosificación en el ensayo de Proctor estándar realizado para 3%, 6%, 9% y 12% de biosólido y espécimen de suelo con el fin de obtener un % de error menor al tener pruebas impares

Ilustración 16. Procedimiento de secado y pesaje para muestras de biosólidos



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 66

- Resistencia a la compresión:

Ensayo realizado bajo la norma MTC E – 121 (NTP 339.167 – ASTM D 2166 – 91), utilizaron una muestra de suelo con un peso de 170 gr la cual se sustituyó con 5.1g en la dosificación de biosólido (3%) por peso del suelo y así ejecutaron para las demás dosificaciones.

Ilustración 17. Ensayo compresión no confinada con los % de biosólidos



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 70

- Cohesión:

Las estudiantes realizaron 3 probetas por espécimen para el ensayo de corte directo con el método (UU) no consolidado no drenado, para ello suministraron una muestra de 100g de suelo, la cual sustituyó 3g de biosólido (3%) por peso al suelo natural, así de esta manera quedando 97 g de peso para el suelo natural. De la misma manera fue realizado lo mismo para las demás dosificaciones de biosólido.

Ilustración 18. Muestras de biosólidos en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 12%



Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 71

- Límite líquido (LL):

En base a la norma MTC E 10, realizaron el debido ensayo en donde a una muestra de biosólido al 3% lo que equivale a 4.5g, le agregaron una muestra de suelo natural ya seca y tamizada para luego agregarle agua y mezclarlo uniformemente. Se lleva al horno durante 24 horas, de acuerdo a la norma, realizaron un cierre de 40 – 30 golpes, 30 – 20 golpes. 20-15 golpes y por último de 15 – 10 golpes, el procedimiento se repitió para cada dosificación de biosólido.

- Límite plástico (LP):

Bajo las estipulaciones de la norma MTC E 111, tomaron una muestra de 20g en la que sustituyeron 0.6 g de biosólido (3%) quedando de suelo natural un peso de 19,4 g, al realizar el montaje que se requiere fue llevado al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 ° C.

- CBR:

Se indicó a sustituir con 180g de biosólido (3%) quedando un total de 5.820g de suelo natural, se compacta en 5 capas y al final con enrazado para los 3 CBR realizados de 55, 26 y 12 golpes como lo estipula la norma MTC E 132 – NTP 339. 145, una vez desmontados se deben dejar en agua durante 96 horas y cada día que dura el ensayo se deben tomar las lecturas de los pesos, todo se realizó para cada dosificación de biosólido.

- Resistencia al esfuerzo cortante:

En base a la norma UNE 103 401 – 98/ ASTM D 6528), realizaron 3 probetas que fueron llevadas a corte directo, con muestras de suelo de 100g se sustituyó 3g de biosólido por peso del

suelo, quedando 97g de suelo natural, dicho ensayo lo realizaron para cada una de las dosificaciones de biosólido estipuladas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS, PERÚ

De acuerdo a los datos obtenidos por medio de la realización de varios ensayos en laboratorio, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 9. Análisis y datos concluidos

9% de biosólido	Descripción	Valor	Unidad
	Densidad máxima seca	2,08	g/cm ³
	Densidad máxima húmeda	2,33	g/cm ³
	Resistencia a la compresión	0,94	g/cm ²
	Cohesión	0,42	kg/cm ²
	Límite líquido (LL)	19,71	%
	Índice de plasticidad	3,07	%
	CBR	9,42	%
	Resistencia al esfuerzo cortante	0,483	kg/cm ²

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo, pg 99

El previo análisis de datos se basó en la examinación exhaustiva de un conjunto de datos a cargo de las dos estudiantes quienes elaboraron la investigación en laboratorio para determinar conclusiones precisas y verídicas. Como demuestra la Tabla No 14, la mejor dosificación que presenta buenas propiedades con el suelo natural es el 9% de biosólido.

Los resultados específicos demuestran que la estabilización con sustitución de biosólido de PTAR impacta de manera positiva para las propiedades físicas y químicas requeridas para la ejecución de subrasante en suelo arcilloso de la calle Intirraymi. En el caso de CBR, según la norma CE.010 Pavimentos Urbanos, estipula un alcance de subrasante bueno en un rango de $(8\% < \text{CBR} < 17\%)$, el cual si se cumple para dicha investigación.

CASO DE ESTUDIO REALIZADO EN ECUADOR

En la universidad católica de Santiago de Chile para el año 2016, el entonces estudiante Feijóo González Andrés Emilio de ingeniería civil, realizó su tesis que lleva por nombre **“Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales”**. Un trabajo investigativo el cual se basó en la problemática actual que presentan las PTAR en Ecuador para el manejo de aguas residuales, pues al no ser tratadas de manera correcta, terminan siendo depositadas en los ríos, lagunas y así afectando el entorno aledaño de los mismos. El caso de estudio fue tipo experimental en donde hubo análisis sobre el comportamiento de los biosólidos y arcillas expansivas como material de subbase para vías.

La investigación se llevo de la siguiente manera:

1. Materiales

La primera muestra que uso corresponde a 900m^3 de arcilla extraída al noroeste de la ciudad de Guayaquil, la segunda muestra fue de 100 m^3 de lodo residual obtenido después del secado (Ilustración 17), para que posteriormente fuera deshidratado y molido (Ilustración 18).

Ilustración 19. Biosólido después del proceso de secado



Fuente: F. G. (2016). Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de Repositorio ucsg, pag 45

Ilustración 20. Biosólido ya deshidratado y molido



Fuente: F. G. (2016). Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de Repositorio ucsg, pag 45

2. Fabricación

Para realizar la debida implementación de arena más grava de arcilla junto con los lodos residuales, fue necesario el uso de una mezcladora mecánica y así poder homogenizar los materiales en proporción de 90% arcilla y 10% lodo, tuvo adición de agua para lograr un material refinado con pequeñas partículas, el tamaño de estos compuestos con adiciones de biosólidos tuvo una granulometría variada. Para temas de empaque y transporte, lo realizaron

con cuidado para no alterar las muestras al instante de ser llevadas al horno y así empezar con los análisis.

3. Cocción

Se lleva a cabo los procesos de calentamiento con una temperatura de 900 °C durante 48 horas para luego ser llevados a laboratorio y analizar su composición granulométrica, límites de plasticidad, CBR, ensayo de Proctor y determinar su % de humedad.

Ilustración 21. Materiales ya cocidos



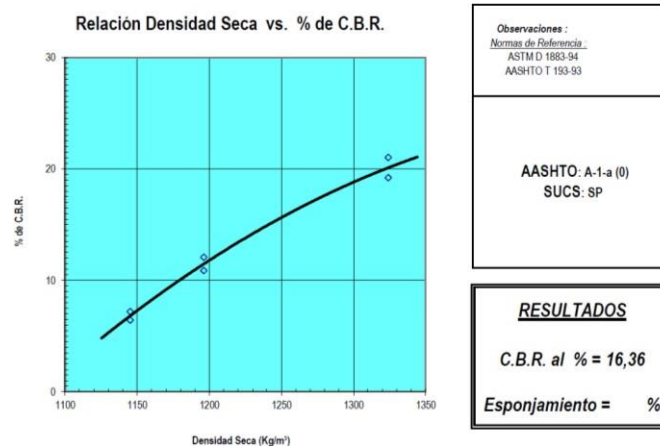
Fuente: F. G. (2016). Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de Repositorio ucsg, pag 48

Para la caracterización de los materiales estudiados, existieron ensayos importantes que fueron realizados los cuales son:

- **Ensayo de composición granulométrica:** Se realiza el ensayo para la grava y arena evidenciando que la mezcla de estos materiales registra una granulometría más volumétrica, posee características con poca presencia de finos.
- **Límites de plasticidad:** La realización de este ensayo determina la existencia de un suelo no plástico, lo cual cumple con lo establecido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Ecuador.

- **CBR:** La ilustración 20 muestra la gráfica establecida al momento de realizar dicho ensayo, donde evidencia su % final el cual fue un CBR de 16,36% que indica una resistencia baja, es decir que su uso es óptimo para vías de bajos volúmenes y no para autopistas o vías con mucho tráfico vehicular.

Ilustración 22. Gráfica de resultado para ensayo de CBR



Fuente: F. G. (2016). *Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Repositorio ucsg, pag 52

- **Ensayo Proctor:** Obtuvo una densidad seca máxima es de 1308 kg/m³ con un porcentaje de humedad óptima de 35%.
- **Ensayo de gravedad específica y absorción de agregado grueso:** La realización en el laboratorio determinaron una gravedad específica de 2,05 y gravedad específica aparente de 2,69. Se obtuvo un porcentaje de absorción el cual corresponde a 22,69 %.

ANÁLISIS DE RESULTADOS, ECUADOR

De acuerdo a los ensayos realizados por el estudiante a cargo de dicha investigación, este concluye que los resultados obtenidos no clasifican como sub-base para la construcción desde cero, sino que, SI sirven perfectamente para un mejoramiento de las mismas según las estipulaciones y normativas de vías ecuatorianas, este proceso de mejorar busca fortalecer y estabilizar la capa de subbase de una carretera con el objetivo de mejorar su capacidad de soporte y prolongar su vida útil. (Cemex)

La culminación de estudio realizado en la ciudad de Quito Ecuador, demuestra que existe la posibilidad de utilizar los biosólidos como un material de construcción y así evitar la mala disposición de los mismos, de igual forma, busca incentivar en los futuros estudios académicos el implemento de materiales generados por las PTAR como lo son los biosólidos y así demostrar que tienen un segundo uso de manera sostenible.

APLICACIÓN EN COLOMBIA

Conforme a los casos de estudio analizados previamente, se evidencia que, SI existe la posibilidad de hacer uso de los biosólidos como material para construcción, siendo así, se debe tener presentes varias cosas y ellas son:

1. **Parámetros requeridos para el uso de biosólidos**

A nivel mundial existen varias especificaciones para la implementación de los mismos, en territorio nacional, se encuentra el Decreto 1287 de 2014 (Ministerio de Vivienda,2014), quien establece criterios para el uso de biosólidos y estipula lo siguiente:

- **Categorización de biosólidos:** Conforme a sus características, se clasifican en dos grupos:

Categoría A: Biosólidos con menor contenido de contaminantes y mayor estabilidad. Pueden ser utilizados en agricultura, silvicultura, revegetación de suelos y paisajismo entre otros.

Categoría B: Biosólidos con mayor contenido de contaminantes y menor estabilidad. Su uso está restringido a ciertas aplicaciones, como la revegetación de suelos de áreas degradadas y el compostaje.

- **Estándares de calidad:** Los biosólidos deben cumplir con dichos estándares establecidos para parámetros como lo son metales pesados, patógenos y materia orgánica.

- **Manejo y aplicación:** Se establecen requisitos para el manejo, transporte, almacenamiento y aplicación de los biosólidos, con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente.

- **Monitoreo y control:** Se establece un sistema de monitoreo y control para verificar el cumplimiento de los criterios establecidos en el decreto.

Los biosólidos mencionados en los presentes casos de estudio, no obtuvieron un análisis previo para conocer su composición y así, hacer la debida comparación con los que se originan en Colombia a causa de no encontrar información específica de la misma ya sea para el caso de Perú o Ecuador; debido a esto, se busca constatar que la composición de los biosólidos varia notablemente según la PTAR donde sean generados , pues los biosólidos que se producen en la capital de Colombia, es decir en Bogotá D.C, no tendrán las mismas propiedades de los cuales son formados por otra ciudad del país y así mismo del mundo.

2. Especificaciones y normativa para vías

Existen diversas normas para la ejecución de vías, pero específicamente se hará énfasis con el INVIAS quien es una entidad colombiana encargada de la planeación, construcción, mantenimiento y administración de la red vial nacional, la cual estipula lo siguiente para vías terciarias:

- **Manual de carreteras:** Bajo su normativa principal, establece dicho manual para la buena ejecución de las obras viales en donde establece lineamientos técnicos y criterios de diseño que son:
 - Clasificación de las vías terciarias: Aspecto clave para así definir parámetros de diseño y estándares de construcción para su debido mejoramiento o instalación.
 - Diseño geométrico: Datos importantes para la debida ejecución de las mismas que implica: Ancho de calzada, curvas, pendientes y visibilidad.
 - Pavimentación: Depende mucho del tráfico presente, clima y disposición de materiales en la zona, las opciones pueden ser: Afirmado, grava compacta y concreto rígido.

- Drenajes: Hace énfasis en las estructuras hidráulicas requeridas en las vías para no afectar el tránsito o alterar la construcción de la misma.
- Señalización y seguridad vial: Criterios importantes que se deben tener en cuenta para evitar accidentes.
- Mantenimiento: Enfatiza la importancia del mantenimiento preventivo y periódico para prolongar su vida útil y garantizar el buen funcionamiento.

Para ejecutar el uso de los biosólidos y lograr mejorar las subrasantes y sub-bases en vías terciarias, se debe tener presente lo estipulado anteriormente para la buena implementación que resulta la estabilización de dichas capas de pavimento con este subproducto generado por las PTAR.

Según los parámetros analizados en los artículos de Perú y Ecuador, y teniendo en cuenta su posible aplicación en Colombia se obtuvo lo siguiente:

- Para la subrasante, se consultó que estudios mínimos deben ser realizados en esta capa de pavimento para que, a su vez, se comparen ambas normativas de vías optadas por cada país y ver cuales cumplen y cuales no, en este caso, Perú opera con la entidad Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC y Colombia con INVIAS.

Tabla 10. Comparación y comprobación de normativas entre Perú y Colombia

	PERÚ	COLOMBIA
NORMATIVIDAD	MTC	INVIAS
ESTUDIOS REQUERIDOS PARA SUBRASANTES		
Clasificación de suelos	x	X
Granulometría	x	X
CBR	x	X
Ensayo de permeabilidad	x	X
Cohesión	x	X
Densidad máxima seca	x	X
Densidad máxima húmeda	x	X
Resistencia al esfuerzo cortante	x	X
Límites de Attemberg	x	X
Índice de plasticidad	x	X

Fuente: Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. Universidad Cesar Vallejo

Ambos países emplean la misma metodología para la ejecución de una subrasante para vías de bajo volumen, en cuanto a porcentajes o valores exactos, es complejo suministrar un dato específico puesto que depende de varios factores como lo es el clima, tipo de suelo, nivel de tráfico debido a que hay vías terciarias que presentan mayor tránsito que en otras y todo esto influye a la hora de suministrar un certamen final.

- En cuanto a sub-bases, también se empleó la misma metodología anterior que consiste en comparar ambas normativas de cada país, para este caso corresponde Colombia y Ecuador quien se rige bajo Ministerio de Transporte y Obras Públicas - MTOP.

Tabla 11. Comparación y comprobación de normativas entre Ecuador y Colombia

	ECUADOR	COLOMBIA
NORMATIVIDAD	MTOP	INVIAS
ESTUDIOS REQUERIDOS PARA SUB-BASES		
Análisis granulométrico	x	x
Resistencia a la abrasión	x	x
CBR	x	x
Durabilidad	x	x
Ensayos de densidad y humedad	x	x
Ensayo cono y arena	x	x
Índice de plasticidad	x	x

Fuente: F. G. (2016). Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de Repositorio ucsq

De acuerdo a la tabla anterior, ambos países manejan la misma metodología para estudios relacionados a la sub-base, pero así mismo, para ambas metodologías pueden surgir más ensayos requeridos, estos serán establecidos según el corregimiento o lugar de ejecución puesto que es una variable fundamental a la hora de establecer parámetros necesarios.

Conforme al caso de estudio realizado en Perú, por medio de un análisis visual a la calle seleccionada, se evidencia que la implementación de biosólidos tuvo buenos resultados en suelos arcillosos porque asimismo deben ser estabilizados para mejorar sus propiedades y evitar daños futuros, el análisis de la investigación realizada en Ecuador demostró que los biosólidos

presentaron propiedades competentes para el mejoramiento de la sub-base, siendo así, el presente trabajo de grado propone la idea de mejorar la estructura de pavimento de vías terciarias compuestas de suelos arcillosos y/o arenosos, por lo general, se suelen encontrar lejanas a las cabeceras municipales, con presencia de mucha vegetación cerca y altas temperaturas.

Sería una gran alternativa poder implementar esta metodología de construcción sostenible en Colombia, puesto que hay varios lugares en el país que requieren el mejoramiento de vías terciarias, un claro ejemplo de ello es en el departamento de La Guajira, en las rancherías (conjunto de ranchos, chozas o casas pobres) ubicadas a las afueras de los centros poblados municipales, existen vías en terribles condiciones que dificultan el acceso de vehículos y generan malestar a las viviendas cercanas, pues al ser un departamento con temperaturas muy altas, el suelo de estas vías generan mucho polvo y por ende, afectar a quienes habitan en zonas aledañas.

Al dificultar el paso de vehículos, se hace complejo la presencia de policías, carros para el suministro de alimentos y agua, vehículos de emergencia y el transporte de las personas que residen allí, esto genera una mala calidad de vida pues ya han existido casos de inseguridad y muertes por desnutrición; no quiere decir que la solución final de ello radica al mejorar las vías, sino que ayuda de cierta manera a esa problemática que enfrenta ese departamento y los demás lugares en Colombia donde la infraestructura vial terciaria se encuentra en malas condiciones.

Los casos de estudio elegidos, realizaron los debidos ensayos necesarios para vías de bajos volúmenes y obtuvieron buenos resultados al aplicar cierto %de biosólido a la mezcla correspondiente de arena y grava, como consecuencia de ello, la construcción sostenible resulto siendo un éxito, de esa manera, los parámetros ejecutados para tener en cuenta son:

- Estabilización de biosólidos.
 - Ejecución de pruebas de laboratorio requeridas para pavimentos.
 - Análisis de resultados para verificar las propiedades que se generan con la mezcla de arena, grava y biosólidos.
- Llevar a la práctica.

En las vías terciarias, cuando no se lleva un mantenimiento preventivo de las mismas, estas se van deteriorando poco a poco por factores como el clima, el tránsito diario, mala calidad de materiales o fallas en el diseño, por lo tanto, se hace necesario el mejoramiento de sub-bases y subrasantes las cuales son parte fundamental en la estructura de pavimento, lo que beneficia de la siguiente manera:

- Reducción en la deformación del pavimento.
- Menor riesgo de hundimientos o grietas.
- Reducción de costos para el mantenimiento.

Ahora bien, para hacer el debido análisis en disponibilidad del suministro de volúmenes requeridos para usar biosólidos que se pueden requerir en una vía terciaria por kilómetro es muy importante conocer el ancho de la vía, como tal no hay un valor específico para este dato debido a su variación de acuerdo al tramo de vía seleccionado, pero en sí, el mínimo ancho debe ser de tres metros. Una vez teniendo dicho valor, se procede a multiplicarlo por el kilómetro requerido y así conocer el % de biosólido necesario, ejemplo:

- En la vereda La Parroquia ubicada en la vía que comunica al municipio de Mariquita Tolima a Fresno, se tiene una red vial terciaria la cual consta con un ancho de tres metros (3m) y se desea estabilizar un tramo de 1 km lo que equivale a 1000m.

$$\frac{3 \text{ m}}{1000 \text{ m}} * 100 = 0.3 \approx 30\%$$

De esa manera, se requiere un 30% de biosólido para poder implementarlo en esta construcción, es muy probable que la aplicación de este material no sea económica debido a que puede generar gastos como lo es el transporte, la mano de obra, el manejo que requieren y de esta manera su almacenamiento, el decreto 1287 estipula que una vez son almacenados los biosólidos solo se hará en un lapso máximo de 6 meses con los debidos cuidados requeridos para evitar fuertes olores.

En tiempo presente puede que su implementación no sea económica, pero a futuro si lo será, su relación costo beneficio valdrá la pena debido a que la vía estará mejor estabilizada y así no ocasiona daños en su estructura de pavimento que genera incomodidades a sus habitantes y esto conlleva problemas sociales, ambientales y económicos.

Señalando anteriormente las metodologías empleadas en los casos de estudio en Perú y Ecuador durante el transcurso de la presente investigación, tuvo un análisis el cual corresponde que los biosólidos tienen la característica de un limo una vez son estabilizados con cal y al realizar los ensayos de límites de atterberg poseen una apariencia de arena fina puesto que en el estado del arte de los biosólidos le hacen una comparación con suelos cohesivos.

Sin embargo, para manejar las posibles resistencias sociales sobre el uso de los biosólidos se presentan dos problemáticas, la primera corresponde a que algunas personas hoy en día tengan conocimiento nulo sobre este material generado por las PTAR y la segunda problemática se basa en que la sociedad si conozca de ellos, pero los tenga en un mal concepto pues en los biosólidos

se encuentra materia orgánica que genera repugnancia, todo esto puede generar desinterés para la reutilización del mismo, es por eso que se debe dar a conocer el biosólido de una forma completa y responsable por medio de centros educativos, campañas del gobierno y en el voz a voz de la ciudadanía para que así logren conocer el segundo uso tan beneficioso que se le pueden dar a los biosólidos y no solo para temas constructivos sino en muchas otras áreas.

Como producto del presente estudio realizado, se demostró la buena implementación que resultó la construcción sostenible para el mejoramiento de las capas de pavimento de vías terciarias, allí hace partícipe la ingeniería circular la cual es ese conjunto de conocimientos y técnicas que hacen reducir los residuos para reintroducirlos como nuevos recursos. (Bello, 2022)

Cuando se ejecuta una obra sostenible, no solo se abarcan beneficios ambientales sino también trae consigo mejoras para la economía y sociedad. La sostenibilidad impacta en la ampliación de las oportunidades para todos, en el presente y futuro pues es un factor clave para poder reducir la pobreza puesto que genera empleo y promueve la calidad de vida en la sociedad. (Prendergast, 1993).

Al generar oportunidades para todos, crea un impacto académico muy positivo, donde surgen procesos de aprendizajes responsables con el entorno, la necesidad de querer indagar más sobre ello y llevarlo a la práctica. La Ingeniería Civil es fundamental para proteger el medio ambiente debido a que no solo la cuida y mitiga su impacto negativo por medio de construcciones sostenibles e innovando cosas nuevas sino que también influencia a las otras disciplinas que trabajan de la mano como lo es la arquitectura y otras ingenierías, para que en sus ámbitos profesionales sean más sostenibles y así, con el voz a voz, cada día serán más las personas y agrupaciones que sabrán la importancia de reciclar, reusar y reducir cada material o desecho generado para hacer del planeta tierra, un mundo mejor.

CONCLUSIONES

- A nivel mundial, el crecimiento económico y la protección del medio ambiente presentan un conflicto crucial para la industria de la construcción, de ahí surge la oportunidad para la ingeniería civil en brindar nuevas alternativas sostenibles en sus obras ejecutadas debido a que esta profesión tiene una gran responsabilidad con el medio ambiente para cuidarlo y preservarlo.
- Al implementar el uso de biosólidos por medio de una construcción sostenible se crea una alternativa para que la actividad constructora responda hacia el logro del desarrollo sostenible.
- La necesidad de mejorar las vías terciarias se basa en poder restaurar las condiciones de vida en los campesinos, potencializar el crecimiento económico que genera la red de infraestructura vial pues son un pilar fundamental para el desarrollo de un país y su debida, es por eso que se establece la necesidad de contar con suelos más estables y sin daños.
- El caso de estudio de Perú, infiere que los resultados específicos de los debidos laboratorios, deducen que la estabilización con sustitución de biosólido de PTAR si influye en las propiedades físicas, mecánicas, parámetros de consistencia y al esfuerzo cortante de un suelo arcilloso de subrasante para el pavimento de la calle seleccionada.
- La construcción sostenible genera significativos beneficios económicos puesto que al hacer un uso más eficiente de los recursos este produce un ahorro total de costos a largo plazo y mejora la productividad.
- El presente trabajo de grado sigue abriendo las puertas para futuros estudios ya prácticos en Colombia, donde se haga realidad el uso de los biosólidos para la estabilización de

subrasantes y sub-bases en vías terciarias pues es una alternativa muy atractiva en el campo de la ingeniería civil.

RECOMENDACIONES

- Los biosólidos presentan una gran variación en su contenido natural de agua y contenido orgánico, al tiempo que muestran comportamientos de compactación deficientes, es necesario estabilizarlos adecuadamente para reducir las características de plasticidad y mejorar las demás propiedades para su reutilización en aplicaciones constructivas.
- El biosólido al ser un material con propiedades orgánicas, se debe mezclar con grandes porcentajes de arena y grava puesto que él por sí solo no puede cumplir las funciones requeridas para su implementación en el mejoramiento de vías terciarias, según los casos de estudio analizados, se recomienda el uso en un 10% de biosólido y 90% material del suelo natural.
- Se hace necesario la reutilización de estos residuos puesto que al ser consientes con la problemática ambiental que atraviesa el mundo hoy en día, sería un error grave depositarlos en cuerpos de agua o vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Betancur, L. M., Macías Mazo, K. I., & Suárez Mendoza, A. J. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 2, núm. 1, pp. 57-60.
- Alemania, Cooperación técnica república federal . (1991). *Manual de Disposición de Aguas Residuales*. Lima: Institut Fresenius GmbH.
- Álvaro Chávez Porras PhD, A. R. (2011). Análisis químico y biológico de biosólidos sometidos a. *Facultad de Ingeniería Universidad Militar NuevaGranada*.
- Amador et al., 2. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *CENIC. Ciencias Químicas*, pp. 1-10.
- ANI. (2014). Plan de Adaptación de la Red Vial Primaria de Colombia. *PLAN VÍAS-CC: vías compatibles con el clima*.
- Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2022). Desafíos de la gestión sanitaria y ambiental post pandemia y cambio climático. *XXXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de AIDIS*.
- Bedoya, a. (2013). Caracterización de biosólidos generado en planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Rev, salud pública*.
- Bello, P. U. (2022). El aporte de un ingeniero para lograr una economía circular. *Universidad Andrés Bello*.
- Bulletin Fal. (2018). Road transport in Latin America: evolution of its infrastructure and impact between 2007 and 2015. *cepal*.
- campo, F. t. (2016). Límites de Atterberg. Definición e interpretación. *Geotecnia fácil*.
- Cemex. (s.f.). Sub base granular. *Cemex Colombia*.
- ciatej. (2024). Aguas residuales, plantas de tratamiento y contaminantes emergentes. *CIATEJ*.
- Ciudades Verdes . (2022). Preparación de la Subrasante. *Ciudades Verdes* .
- Cluster, L. (2022). Colombia . *Colombia Red Carretera*.
- Condori Bustamante et al. (2022). Biosólido de PTAR para la estabilización de suelo arcilloso de subrasante para pavimento, calle Intirraymi, San Sebastián-Cusco. *Universidad Cesar Vallejo*.
- Cristian Camilo Cotes, S. A. (2023). GUÍA METODOLÓGICA DE PLANIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO RÍGIDO EN LAS VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE VILLANUEVA- LA GUAJIRA. *Universidad de La Guajira*.
- DNP (2020). Departamento de Planeación Nacional. *Mejoramiento de vías terciarias – Vías de tercer orden – Proyectos Tipo*.
- Eco mar, M. a. (9 de JULIO de 2020). ¿Qué son las aguas residuales?, <https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/>. España.
- Elsa et al., 2. (2018). Uso de biosólidos en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. *Artículos Originales* .
- Emilio, F. G. (2016). *Fabricación de sub-base para vías utilizando lodos remanentes de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Repositorio ucsg.
- Engineering Institute of Technology. (2023). The Circular Economy – How Engineers Can Achieve It. *EIT*.

- Estrada, J. S. (2020). Metodología de gestión de riesgos para el mejoramiento de vías terciarias por medio de placa huella. *Repositorio Universidad Militar Nueva Granada*.
- (EPA), U. E. (2023). Biosolids. *US Environmental Protection Agency (EPA)*.
- FERGON y Alcaldía de Yumbo. (2020). *Función e importancia de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales*.
- Foro Económico Mundial . (2019). Países con mejores vías de la región. *Ekos*.
- Galvis, L. A. (2015). Crecimiento económico y demográfico regional en Colombia, 1985-2012. *Revista de economía institucional*, 17(33), 183-201.
- González, R. (2019). AVANCES EN EL SANEAMIENTO Y LA GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. *FACCEA*.
- Grupo Bancolombia. (2022). Vías terciarias en Colombia: un reto para el desarrollo del país. *Capital inteligente* .
- Grupo epm. (2022). Tema 2. Biosólidos. *Grupo epm*.
- IDU. (2015). SUBBASES Y BASES . *Alcaldía Mayor de Bogotá*.
- INVIAS. (2023). Instituto Nacioanal de Vías.
- Jackson, C. (2021). What Is Sustainable Construction? *CONSTRUCTION21 INTERNATIONAL*.
- KBBIOENERGY. (2024). BIOSOLIDS. *KBBIOENERGY*.
- Lowe, Z. a. (2003). *Economic'Challenge'of'Sustainable'*. escholar Manchester Business School .
- Mahdy, Z. L. (2021). Zero-Valent Iron Nanoparticles Remediate Nickel-Contaminated Aqueous Solutions and Biosolids-Amended Agricultural Soil. *Materials*.
- Manjárres, C. L. (2021). *Use of biosolids in Colombia: methods of stabilization and applications at*. Tunja: Universidad de boyaca.
- Marta Wójcik, ħ. B. (2018). Unconventional Materials from Sewage Sludge with a Potential Application in a Road Construction. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, Volumen 12, 65–75.
- Matěj Hušek. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *ELSEVIER*.
- Mazurowski, P. (2021). What are the functions of layers in a flexible pavement? *Tensar*.
- Ministerio de Ambiente. (2013). Construcción Sostenible.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 de 2014*. Bogotá.
- National Geographic. (2024). Cómo hemos deteriorado la Tierra en el último medio siglo. *National Geographic España*.
- North East Biosolids & Residuals Association . (2014). *Phosphorus in biosolids*. EE.UU: NEBRA.
- ONU. (2018). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40155.4>
- Pellicer, G. E. (2021). *Boosting the sustainable development goals in a civil engenering bachelor degree program*. Valencia, Spain: emerald insight.
- Pimiento, A. R. (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR: impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Revista caribeña de ciencias sociales*.
- Pinzón, A. A. (2018). LODOS GENERADOS EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EL SALITRE BOGOTÁ, COMO INSUMO PARA LAPRODUCCIÓN DE COMPOST. *Proyecto de grado* .
- Prendergast, J. (1993). Engineering sustainable development. *ProQuest*.
- Prieto et al. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Investigaciones en ingeniería*.

- Razón pública. (2023). No habrá construcción sin Naturaleza. *Razón pública para saber en serio lo que pasa en Colombia*.
- Sawyer, H. a., & Koei, N. (2011). Producto Final – Anexo No. 20 Alternativas para el Manejo y Disposición de. *Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre*, 161.
- Soriano, M. (2012). *Construcción Sostenible*. Union Europea: Escuela de Organizacion Industrial.
- SURICHAQUI, C. M. (2017). MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE EN UNA VÍA AFIRMADA DE LA RED VIAL DEPARTAMENTAL DE LA REGIÓN JUNÍN MEDIANTE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON ÓXIDO DE CALCIO - 2016. *Universidad Peruana de los Andes*.
- Thomé, B. (2021). Potential uses of sewage sludge in highway construction. *Potential uses of sewage sludge in highway construction*.
- UN Environment Programme . (2023). Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente. *UN Environment Programme* .
- Unilabs. (2020). Patógeno . *Unilabs*.
- Vanessa Prieto-Sandoval. (2017). *Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación* . Memoria Investigaciones en Ingeniería.
- Wanare, D. (2022). Application of biosolids in civil engineering: State of the art. *ELSEVIER*.