

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE TRANSPORTE Y MOVILIDAD VIAL	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN TÉCNICA Y/O TECNOLÓGICA PARA EL
MEJORAMIENTO DE PROCESOS EN LA INVESTIGACIÓN EN LA MALLA VIAL LOCAL

ESTUDIO DE LA TECNOLOGIA DE BIOASFALTO Y SU USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA BOGOTÁ

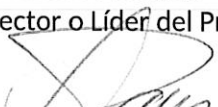


Álvaro Sandoval Reyes
Director General UAERMV



Camilo Enrique Marrugo Martínez
Gerente del Desarrollo, la Calidad y la Innovación

Jorge Alberto Ascencio Castañeda
Director o Líder del Proyecto



Humberto Ramírez Gómez
Generador o Patrocinador del Proyecto

BOGOTÁ D.C., Diciembre 2024

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN TÉCNICA Y/O TECNOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO DE PROCESOS EN LA INVESTIGACIÓN EN LA MALLA VIAL LOCAL

ESTUDIO DE LA TECNOLOGIA DE BIOASFALTO Y SU USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA BOGOTÁ

Álvaro Sandoval Reyes
Director General UAERMV

Camilo Enrique Marrugo Martínez
Gerente del Desarrollo, la Calidad y la Innovación

Jorge Alberto Ascencio Castañeda
Director o Líder del Proyecto

Humberto Ramírez Gómez
Generador o Patrocinador del Proyecto

BOGOTÁ D.C., Diciembre 2024

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN:	5
1. JUSTIFICACIÓN	5
2. ALCANCE	8
3. OBJETIVOS	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos Específicos	8
4. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	9
Asfalto	9
Bioligante	11
Punto de ablandamiento	12
Ductilidad	13
Penetración	13
Viscosidad	14
Susceptibilidad al daño por humedad	15
Módulo complejo	15
5. ANTECEDENTES	16
Bioligantes a partir de fibras de maderas	17
Bioligante a partir de residuos	19
Bioligantes a partir de residuos animales	20
6. METODOLOGIA	23
7. DESARROLLO DEL PROYECTO	25
8. CONCLUSIONES	35
9. RECOMENDACIONES	36
10. GLOSARIO	37
11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	38

(puede adicionar otros campos si se requiere)

LISTADO DE TABLAS

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Tabla 1 Composición química del asfalto	9
Tabla 2 Composición química de asfaltos colombianos	9
Tabla 3 Análisis SARA de asfaltos	10
Tabla 4 Fracciones correspondientes al asfalto 60/70	10
Tabla 5 Componentes SARA de bioligantes.....	16

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Composición SARA de los asfaltos.....	10
Figura 2 Ensayo de punto de ablandamiento.....	12
Figura 3 Ensayo de Ductilidad de materiales asfálticos.....	13
Figura 4 Equipo de penetración de materiales bituminosos.....	14
Figura 5 Viscosímetro rotacional	14
Figura 6 Comportamiento a penetración y punto de ablandamiento del asfalto en función de la cantidad de biomasa.....	17
Figura 7 Comportamiento del asfalto en función del tipo de biomasa de fibras de madera	18
Figura 8 Índice de envejecimiento del asfalto en función de la cantidad de aceite.....	19
Figura 9 Comportamiento del asfalto en función del tipo de biomasa de residuos de animales.....	21
Figura 10 Comportamiento a penetración y punto de ablandamiento del asfalto en función de la adición de bioligante	22
Figura 11 Métodos para la investigación	23
Figura 12 Proceso de filtrado del aceite de cocina.....	24
Figura 13 Proceso para modificar el asfalto adicionándole aceite de cocina reusado.....	25
Figura 14 Viscosidad a 60°C del asfalto en función del aceite adicionado.....	26
Figura 15 Viscosidad a 135°C del asfalto en función del aceite adicionado.....	27
Figura 16 Viscosidad del asfalto en función del aceite adicionado.....	28
Figura 17 Penetración del asfalto en función del aceite adicionado	28
Figura 18 Punto de ablandamiento del asfalto en función del aceite adicionado.....	29
Figura 19 Viscosidad del asfalto modificado con 2% de aceite.....	30
Figura 20 Densidad diseño Marshall con asfalto AR2%	31
Figura 21 Estabilidad diseño Marshall con asfalto AR2%.....	31

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Figura 22 Flujo diseño Marshall con asfalto AR2%	32
Figura 23 Relación estabilidad - flujo diseño Marshall con asfalto AR2%	33
Figura 24 Vacíos diseño Marshall con asfalto AR2%	33

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

INTRODUCCIÓN:

En las últimas décadas ha tomado fuerza el enfoque de sostenibilidad, a tal punto que la Organización de las Naciones Unidas ha generado unos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dentro de los cuales se encuentra el ODS 9. (Industria, Innovación e Infraestructura), ODS 11. (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y ODS 12 (Producción y consumo responsable) [1], [2]. Colombia no ha sido ajeno de estos objetivos, por lo cual ha generado los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial (LIVV) para Colombia, el cual indica que los proyectos adelantados en materia de infraestructura vial deben cumplir con las medidas de manejo para evitar, prevenir, mitigar, corregir y/o compensar la totalidad de los impactos ambientales que potencialmente se puedan generar [3].

Lo anterior unido con el enfoque misional de la UMV para la conservación de la malla vial y su visión del desarrollo de un modelo sostenible para la misma, generan interés en la búsqueda de materiales no convencionales para la elaboración de mezclas asfálticas que permitan atender el compromiso de economía circular sin descuidar las características mecánicas del material. En este sentido, se presenta una investigación bibliográfica de los Bioasfaltos como una solución ambiental, técnica y económicamente sostenible para el remplazo parcial de asfaltos derivados del petróleo.

1. JUSTIFICACIÓN

La Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV) desempeña un papel esencial en el marco del Plan Distrital de Desarrollo (PDD) "Bogotá Camina Segura" 2024-2027. Este plan tiene como objetivo transformar a Bogotá en una ciudad enfocada en el bienestar y la igualdad de oportunidades, con un firme compromiso con la acción climática y la justicia ambiental. En este contexto, la presente investigación se justifica por su capacidad para identificar avances en el desarrollo de infraestructuras más resistentes, sostenibles y seguras, que contribuirán al bienestar social y a la protección del medioambiente, involucrándose en la participación de diferentes compromisos que se definen para lograr los objetivos propuestos en los siguientes escenarios.

1. Alineación con el Plan Distrital de Desarrollo:

El Plan Distrital de Desarrollo "Bogotá Camina Segura" establece una visión integral y sostenible para la ciudad. La investigación se enmarca en el objetivo estratégico del plan:

- **Objetivo Estratégico: Bogotá Ordena su Territorio y Avanza en su Acción Climática**
 - **Acción Climática y Justicia Ambiental:** La UAERMV contribuye significativamente a este objetivo mediante la implementación de proyectos sostenibles que reducen las

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

emisiones de gases de efecto invernadero y mejoran la infraestructura verde de la ciudad.

- **Movilidad Sostenible:** La UAERMV prioriza el mantenimiento y desarrollo de una red de movilidad sostenible, incluyendo carriles para bicicletas y caminos peatonales, alineándose con las metas de reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire.

Esto permitirá incidir positivamente en condiciones sanitarias y ambientales que mejoran la calidad del aire, una sostenibilidad para uso y disfrute apropiado del espacio público y generar un asentamiento humano seguro y sostenible, por medio de este tipo de investigaciones para la aplicación de nuevas tecnologías y procedimientos innovadores y sostenibles, que orientan a una mejora en la calidad ambiental en la atmósfera de la ciudad, siendo una intervención directa con las políticas públicas distritales de Ambiente, Gobierno y Planeación.

2. Contribución al Plan Nacional de Desarrollo:

La investigación también responde a los compromisos del Plan Nacional de Desarrollo, en particular con la meta 4: Transformación Productiva, Internacionalización y Acción Climática. Se promueve un uso eficiente de los recursos para el desarrollo de ciudades y hábitats resilientes. La implementación de infraestructuras más resistentes, objetivo principal de la investigación, busca la conservación y el mantenimiento de los pavimentos mientras se protege el medioambiente. Esto se logra mediante la identificación y evaluación de biomateriales que puedan remplazar parcialmente o modificar el asfalto para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, proporcionando soluciones amigables con la salud ambiental.

3. Cumplimiento de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):

La investigación contribuye a los ODS de la siguiente manera:

- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura:** Se enfoca en identificar soluciones al impacto medioambiental y cumplir con las metas de infraestructura sostenible mediante procesos industriales limpios y el fomento de la innovación y la investigación.
- **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Busca reducir el impacto negativo ambiental, mejorando la calidad del aire mediante la disminución de emisiones de gases contaminantes y un uso controlado de combustibles fósiles.

En resumen, la investigación apoya el desarrollo de infraestructuras sostenibles, mejora la calidad ambiental y contribuye a la formación de una ciudad más segura y saludable, en consonancia con los objetivos del PDD, el Plan Nacional de Desarrollo y los ODS.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Alineado con lo anterior se ha identificado que actualmente la demanda en producción de combustibles fósiles para suplir las necesidades de consumo energético es elevada, sin embargo, en Latinoamérica y en consecuencia en Colombia desde el año 2013 se viene presentando una fuerte desaceleración en la producción de estos materiales, con un leve incremento en los últimos años[4][5], esta tendencia responde a un escenario donde confluyen diversos factores económicos, sociales y ambientales. En lo que respecta al consumo de asfalto, tan solo en Europa cerca del 94% de las carreteras pavimentadas son asfálticas y la producción anual de este tipo de mezcla en caliente es cercana a las 300 millones de toneladas[6]. Por otra parte, en Colombia la producción de mezcla asfáltica durante julio de 2024 fue de 202.900m3, es decir que aproximadamente se necesitaron más de 22 toneladas de asfalto [7]. Por lo anterior existe la necesidad de buscar nuevas fuentes alternas a este producto.

En los últimos años se han adelantado proyectos de investigación que buscan aprovechar diferentes tipos de materiales biológicos (biomasa) para la generación de energía, que pueden provenir de diferentes fuentes como residuos de madera, residuos de agricultura, residuos humanos y animales, residuos de aceites vegetales, entre otros. A partir del procesamiento de la biomasa mediante procesos químicos de conversión térmica, se obtiene biocombustible, el cual puede ser usado para reemplazar el asfalto convencional, diluirlo entre un 25% - 75%, o modificarlo <10% y obtener de esta forma Bioasfalto.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

2. ALCANCE

El presente proyecto de investigación tiene como alcance probar materiales alternativos que contribuyan a disminuir o reemplazar los materiales derivados del petróleo dentro de una mezcla asfáltica en caliente. Este proceso comprende la modificación de un asfalto convencional adicionándole aceite recuperado de cocina, el cual será involucrado dentro de una mezcla asfáltica para medir sus características mecánicas y finalmente evaluar su competencia tomando como referencia una mezcla asfáltica fabricada con materiales convencionales.

3. OBJETIVOS

Dentro del presente proyecto se plantearon los siguientes objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar la tecnología para el posible uso de Bioasfaltos en las mezclas asfálticas producidas por la UMV.

3.2. Objetivos Específicos

1. Elaborar el estado del arte a sobre Bioasfaltos y los materiales aprovechables para su obtención.
2. Generar un plan experimental para el desarrollo del proyecto.
3. Identificar el efecto de involucrar bioaceites en la modificación de asfaltos.
4. Evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica elaborada con bioligantes.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

4. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

En el presente marco teórico se involucran los conceptos teóricos necesarios para la adecuada comprensión de los bioasfaltos y sus procesos relacionados, así como las pruebas necesarias para identificar su comportamiento.

Asfalto

El asfalto generalmente se dice que está compuesto por asfaltenos y máltenos. Su composición química dependerá de su origen. Considerando el origen del asfalto se sabe que es un material de origen orgánico y no está compuesto de una sola especie química. La Tabla 1 presenta el análisis de elementos de algunos asfaltos [8].

Tabla 1 Composición química del asfalto

Elemento	Asfalto	
	B – 2959	B – 3602
	(México)	California
Carbono (%)	83.77	86.77
Hidrógeno (%)	9.91	10.94
Nitrógeno (%)	0.28	1.10
Azufre (%)	5.25	0.99
Oxígeno b (%)	0.77	0.20
Vanadio (%)	180.00	4.00
Níquel (%)	22.00	6.00

Fuente: Tomado y adaptado de [8].

Algunos autores como Carmen María Romero y Alberto Gómez han estudiado los elementos que conforman los asfaltos colombianos. En el desarrollo de su trabajo se muestra la manera en que varía los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno a medida que el asfalto se encuentra envejecido [9]. Los valores descritos son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2 Composición química de asfaltos colombianos

Muestra	Carbono (% p/p)	Hidrógeno (% p/p)	Nitrógeno (% p/p)	Azufre (% p/p)	Oxígeno (% p/p)
Asfalto fresco CIB	86.07	7.49	1.64	0.88	3.92
Asfalto envejecido	76.44	7.35	1.39	0.71	14.11

Fuente: Tomado y adaptado [9].

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Los grupos de compuestos químicos que conforman el asfalto se clasifican como, Saturados (S), Aromáticos (A), Resinas (R) y Asfáltenos (A) (Figura 1). Este grupo de compuestos en diferentes proporciones conforman el asfalto, este es un material viscoso utilizado como ligante para las mezclas asfálticas [10].

Figura 1 Composición SARA de los asfaltos



Fuente: Tomado y adaptado de. [8].

Es posible calcular el porcentaje de los compuestos Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos que componen el asfalto, por medio del ensayo SARA. Para esto se emplea una cromatografía líquida en columna, el cual se puede desarrollar en tres días. El método SARA incluye los pasos de digestión, filtración y fraccionamiento en columna. Autores como, Carmen María Romero et al. [9]. y Fredy Alberto Reyes et al. [10] obtuvieron valores SARA para diferentes asfaltos colombianos y para diferentes niveles de envejecimiento. Carmen María Romero et al. [9] presentaron los valores SARA para un asfalto con penetración 70 – 90 sin indicar el tiempo de envejecimiento (Tabla 3), mientras que Fredy Alberto Reyes et al. [10] presenta valores SARA para dos tipos de asfalto, 60/70 y 80/100 con tiempos de envejecimiento de 0, 1, 3, 6, 9 y 12 meses (Tabla 4).

Tabla 3 Análisis SARA de asfaltos

Muestra	Saturados (% m)	Aromáticos (% m)	Resinas (% m)	Asfaltenos (% m)
Asfalto fresco CIB	16.20	43.90	28.90	10.70
Asfalto envejecido	14.00	19.70	9.00	8.90

Fuente: Tomado y adaptado de [9]

Tabla 4 Fracciones correspondientes al asfalto 60/70

Asfalto 60/70	Fracción (%)				
	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	IC
0 mes	16.61±0.61	39.79±2.00	24.53±0.60	20.07±1.67	0.555±0.021

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

1 mes	16.20±0.70	39.70±1.98	24.42±0.59	20.48±1.57	0.560±0.032
3 meses	15.78±0.63	37.27±1.90	22.31±0.63	25.30±1.52	0.678±0.023
6 meses	14.98±0.65	35.00±1.87	21.70±0.67	28.60±1.46	0.764±0.024
9 meses	14.17±0.71	33.10±1.91	21.00±0.58	31.50±1.40	0.848±0.020
12 meses	13.60±0.68	31.20±1.83	20.40±0.59	34.20±1.42	0.938±0.020

Fuente: Tomado y adaptado de [10]

Bioligante

El termino biomasa hace referencia a la materia producida por organismos vivos ya sean animales o vegetales, en este sentido, la biomasa puede ser definida como la parte biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico. La biomasa constituye una fuente renovable de energía obtenida generalmente de resto de plantas, residuos de podas de árboles, excrementos de animales, o desechos y residuos de actividades industriales y agrícolas [11], [12]. La biomasa puede ser transformada mediante un proceso denominado pirolisis, el cual consiste en calentar la biomasa a temperaturas entre 200°C y 300°C (pirolisis rápida entre 500°C y 700°C) en ausencia de oxígeno impidiendo su adecuada combustión, lo que conlleva a una alteración química de la biomasa [12], [13], [14], [15]. Otro proceso comúnmente utilizado para la transformación de la biomasa es la licuefacción hidrotérmica (recomendable principalmente para biomásas con altos contenidos de agua) que se lleva a cabo a temperaturas entre 250°C y 374°C con presiones que van entre 4 MPa y 25 MPa [16], [17]. El resultado de la transformación de la biomasa (ya sea por pirolisis o licuefacción hidrotérmica) da como resultado nuevos materiales como los biocarbones (sólidos), bioaceites (líquidos), biogases (gas) y químicos industriales.

En general los bioaceites son materiales que varían su comportamiento de acuerdo con su fuente de biomasa, no obstante, existen algunas características que comparten los diferentes bioaceites como; altos contenidos de oxígeno (entre 35% y 40%), alta habilidad corrosiva (pH entre 2 y 3), estabilidad térmica pobre, alta viscosidad y bajo valor calorífico en comparación con aceites de motor [18], sin embargo, este material tiene el potencial de remplazar los combustibles fósiles debido a su poder de combustión, facilidad de almacenamiento y transporte, fácil degradación y menor emisión de compuestos nocivos [19].

Los bioacietes sometidos a procesos de destilación, extracción oxidación, y modificación polimérica dan paso a los bioligantes, los cuales pueden servir de modificadores, dilusores o sustitutos del asfalto derivado del petróleo [14], [20], tanto así, que algunas investigaciones adelantadas evidencian que los bioligantes y los asfaltos convencionales presentan componentes comunes como aromáticos, saturados, resinas y asfaltenos [16], [21], [22]. En cuanto a sus propiedades en la ingeniería de pavimentos, se ha evidenciado que los bioligantes tienen un buen comportamiento frente las

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

patologías más comunes, sin embargo, estas propiedades pueden variar dependiendo de la fuente de biomasa y los tratamientos termoquímicos a los cuales se somete este material hasta llegar a bioligantes [23], [24].

Un procedimiento ampliamente utilizado para tratar los bioaceites minimizando sus altos valores de ácidos permitiendo su adecuado desempeño como bioligantes, es la transesterificación o alcoholisis. Este proceso consiste en proporcionar la reacción de un éster de ácido carboxilo con alcohol (metanol o etanol) y opcionalmente un catalizador (Generalmente ácidos (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄, y ácido sulfúrico), álcalis (KOH, CH₃ONa, y NaOH), o enzimas (Lipasa)) convirtiéndolo en un éster de ácido carboxilo diferente [25], [26]. La transesterificación en presencia de un catalizador presenta el inconveniente de consumir bastante tiempo para que la reacción se genere adecuadamente, además de la necesidad de separar el aceite, alcohol, catalizador e impurezas. Por su parte, la transesterificación sin presencia de catalizador es más sencilla, sin embargo, requiere de altas temperaturas y presiones, lo que incrementa el costo haciéndola poco atractiva financieramente [27].

La transesterificación catalítica tiene diferentes factores que afectan su resultado como el tiempo (entre 70 y 100 min) y temperatura de reacción (entre 55°C y 70°C), concentración del catalizador (entre 0.4 g y 0.54 g) relación metanol o etanol aceite, entre otras [28]. El proceso de transesterificación culmina cuando se separa el éster en la parte de arriba y el glicerol en la parte de abajo [29].

Punto de ablandamiento

La norma INV E-712-13 define el punto de ablandamiento como la temperatura en grados Celsius en el instante que se produce contacto entre la masa bituminosa y la placa de referencia tal como se muestra en la Figura 2. De este modo, este ensayo pretende conocer la temperatura mínima a la cual el asfalto presenta ablandamiento y por lo tanto experimenta una disminución de su capacidad de soporte [30].



Figura 2 Ensayo de punto de ablandamiento

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Ductilidad

La ductilidad es una propiedad de los materiales asfálticos, es la distancia hasta la cual se puede elongar una probeta hasta que se alcanza el punto de rotura mediante el equipo que se presenta en la Figura 3 (INV E-702-13). Este ensayo consiste en la aplicación de una carga de tracción a un material asfáltico (emulsión asfáltica o asfalto), en condiciones de velocidad y temperatura previamente definidas, hasta que se presenta una rotura (INV E-702-13). Este ensayo es importante, dado que asfaltos dúctiles presentan mejores características aglomerantes, mientras que asfaltos con ductilidades muy elevadas son propensos a deformaciones [30].



Figura 3 Ensayo de Ductilidad de materiales asfálticos

Penetración

Este es un ensayo de consistencia del asfalto, que se realiza mediante la penetración vertical de una aguja en condiciones de carga, tiempo y temperatura definidas (INV E-706-13). Para la realización de este ensayo, se debe calentar el asfalto y dejar enfriar de manera controlada, después de esto, se realiza la penetración vertical con una aguja estandarizada, el resultado se debe expresar en décimas de milímetro (INV E-706-13), el equipo necesario para realizar este ensayo se presenta en la Figura 4. En Colombia, la clasificación de los asfaltos se presenta según su dureza, la cual está determinada según el grado de penetración que tenga el asfalto.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	



Figura 4 Equipo de penetración de materiales bituminosos

Viscosidad

Este ensayo se realiza en fluidos que presentan un comportamiento no newtoniano (i.e. fluidos cuya viscosidad varía con respecto a su temperatura), se realiza utilizando un viscosímetro rotacional (Figura 5) a una temperatura definida (ASTM D-4402). De acuerdo con la normatividad IDU 200-18, este ensayo se debe realizar a 60°C y 135°C. Este ensayo es indispensable, ya que previo al mezclado del asfalto con los agregados pétreos se debe determinar las temperaturas trabajo las cuales se definen teniendo en cuenta la viscosidad, de este modo, en las especificaciones técnicas se define que las viscosidades de 170 ± 20 cSt y 280 ± 30 cSt indican las temperaturas de compactación y mezclado respectivamente.



Figura 5 Viscosímetro rotacional

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Susceptibilidad al daño por humedad

Este ensayo se realiza con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta (RTI). Para la realización de este ensayo, se deben tener probetas de iguales dimensiones, dividiéndolas en 2 grupos: húmedas y secas. Las probetas húmedas habrán permanecido en baño maría durante 24 horas a 60°C y previo al ensayo de Resistencia a la tracción Indirecta, las muestras deben haber estado en baño maría a 25°C durante 1 hora. Las muestras secas se calientan a una temperatura de 25°C durante 20 minutos antes de realizar el ensayo de Resistencia a la tracción Indirecta (INV E-725-13).

Módulo complejo

El módulo de corte complejo es un ensayo que permite determinar las características viscoelásticas de los asfaltos siguiendo los procedimientos descritos en las normas ASTM, para lo cual, se utiliza un reómetro de corte dinámico (DSR) evaluando las muestras en forma cíclica a diferentes frecuencias y temperaturas, así el módulo de corte complejo (G^*) es la medida de la resistencia total de la deformación ante cargas repetidas [17], [27], o en otras palabras, es la medida de la rigidez del material [4]. Con la medida del módulo, también se obtienen diferentes parámetros como el ángulo de fase (δ), el cual es la diferencia entre el momento de aplicación de la carga y su respuesta a deformación, permitiendo indicar la respuesta elástica de los materiales durante un proceso de corte, de este modo entre mayor sea el ángulo de fase (90°) el material presentara un comportamiento principalmente viscoso, por el contrario, si el ángulo de fase es menor (0°) el comportamiento del material será puramente elástico [4], [17], [27], [28].

Es importante aclarar que la respuesta tanto del módulo complejo de corte como del ángulo de fase dependen en gran medida de la temperatura y frecuencia del ensayo, de este modo, a medida que la temperatura aumenta, el ángulo de fase aumenta y el módulo de corte complejo disminuye, del mismo modo, cuando aumenta la frecuencia, el módulo aumenta y el ángulo de fase disminuye [4], [29], [30].

Por separados el módulo complejo de corte y el ángulo de fase proporcionan información importante de la mezcla, sin embargo, la comparación de estos parámetros mediante algunas relaciones proporciona información complementaria que ayuda a predecir su respuesta ante diferentes fenómenos. La relación $G^*/\sin\delta$ presenta un factor que tiene una fuerte correlación con la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas ya que permite evaluar la deformación irre recuperable del asfalto ante procesos cíclicos de carga [4], [29], por esta razón, la ASTM D7175 indica que la relación $G^*/\sin\delta$ debe ser mayor a 1kPa para prevenir el ahuellamiento [17], [28]. Otra relación evaluada es $G^*\sin\delta$ la cual representa un factor que a menudo es asociado con el comportamiento a fatiga del asfalto a temperaturas intermedias, de esta forma, valores reducidos de este factor, presentan mejores comportamientos a fatiga en comparación con valores altos, de este modo, 5.00 kPa se presenta como el valor máximo que puede tomar el factor $G^*\sin\delta$ para que el asfalto sea resistente a fatiga [10], [31].

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

5. ANTECEDENTES

En los últimos años ha venido tomando fuerza el enfoque ambiental y sostenible para la elaboración de diferentes obras civiles. Los pavimentos no han sido ajenos a esta tendencia por lo que se ha desarrollado un enfoque de vías verdes con sus componente ambientales (selección adecuada de locaciones, diseño paisajístico, emisiones de gases, manejo de residuos y preservación de agua entre otros), sociales (acceso a las comunidades, bienestar y seguridad, intercambio de conocimientos) y económicos (análisis de costos iniciales y ciclo de vida de los proyectos)[31] [32], [33].

En línea con lo anterior, se ha prestado especial atención en buscar alternativas a los asfaltos utilizados convencionalmente para la construcción de carreteras ya que son materiales derivados de la refinación del petróleo, que a su vez es un recurso no renovable [13], [21]. En Colombia, las reservas probadas de petróleo entre el periodo de 2022 y 2023 han disminuido[34] a la vez que se ha visto una disminución de su producción entre el año 2015 y 2023 [7]. En este sentido, se han realizado aproximaciones para el uso de bioligantes como remplazo o modificación de los asfaltos [14], [23], [35]. Este material se origina a partir de la biomasa que generalmente es obtenida de diferentes residuos, ya sean vegetales o animales, la cual se transforma en bioaceites hasta llegar al bioligante.[20].

El uso de bioligantes supone una ventaja desde el punto de vista ambiental al dar un manejo adecuado a estos residuos a la vez que se reduce el uso de materiales no renovables[36]. En el componente económico, se debe tener en cuenta que actualmente el petróleo presenta los altos costos[37] (por encima de 70USD [38]) que a su vez impacta el precio del asfalto. En contrapartida, los bioligantes pueden llegar a costar menos que un asfalto convencional, por lo que su uso puede suponer una ventaja económica [14], [20], [23], [39].

De acuerdo con lo anterior, es posible determinar que existen diferentes tipos de bioligantes según su procedencia (biomasa), por lo tanto, cada tipo puede tener características diferentes, un ejemplo de esto se presenta en la siguiente tabla donde se muestran los componentes químicos de cada tipo de bioligante.

Tabla 5 Componentes SARA de bioligantes

Componente	Asfalto blando	Fuentes de Bioligante		
		Fibras de madera	Residuos porcinos	Residuo de aceite de cocina
Saturados	8.6	0.0	2.48	15
Aromáticos	41.3	33.2	1.67	36
Resinas	25.1	64.3	45.87	21
Asfáltenos	20.5	2.5	43.39	1

Fuente: Tomado y adaptado de [21] [22] [16]

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

A continuación, se presentan algunas investigaciones adelantadas con cada uno de los tipos de bioligantes:

Bioligantes a partir de fibras de maderas

Las fibras de madera pueden convertirse en biomasa y posteriormente en bioligantes, He et al. [13], compara la modificación de asfaltos con bioligantes generados a partir de biomasa de madera de pino (PBM), sauce (WBM) y álamo (OBM) identificando que a medida que aumenta la concentración de bioligantes la penetración (Figura 6 a), ductilidad y ángulo de fase disminuyen mientras que el punto de ablandamiento (Figura 6 b), módulo complejo y la relación del módulo complejo y el ángulo de fase aumentan, de este modo se concluye que la adición de bioligantes mejora la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas a la vez que disminuye la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas. Los efectos encontrados en el estudio tienen mayores impactos con la biomasa a partir de madera de pino, seguido por la de sauce y álamo.

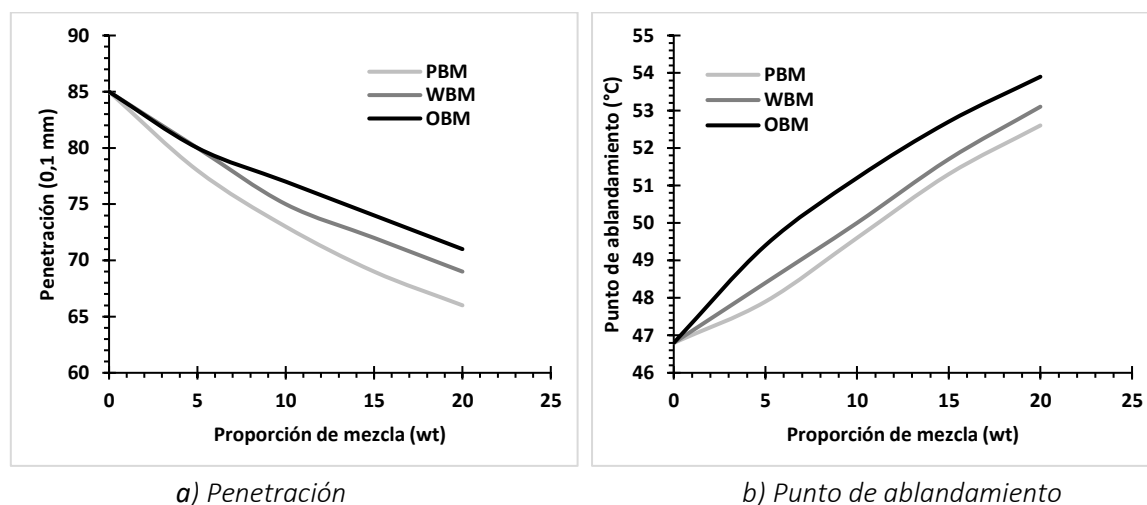


Figura 6 Comportamiento a penetración y punto de ablandamiento del asfalto en función de la cantidad de biomasa

Fuente: Tomado y adaptado de [13]

Hill et al. [39] evaluó la inclusión de 5% de bioligante (rastrojo de maíz (CS), pellets de miscanthus (MP) y pellets de madera (WP)) como rejuvenecedores de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de RAP (0%, 15% y 45%). Del estudio se evidencia un efecto de ablandamiento del asfalto, disminuyendo su viscosidad (Figura 7a), teniendo mayor efecto los pellets de miscanthus y menor el rastrojo de maíz, de otra parte, la rigidez decrece para el rastrojo de maíz y pellets de madera mientras aumenta para el pellet de miscanthus. De esta forma, se evidencia que la utilización de estos bioligantes mejora la

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

resistencia a fracturación a bajas temperaturas (*Figura 7b*), lo cual alivia el efecto negativo producido por el RAP.

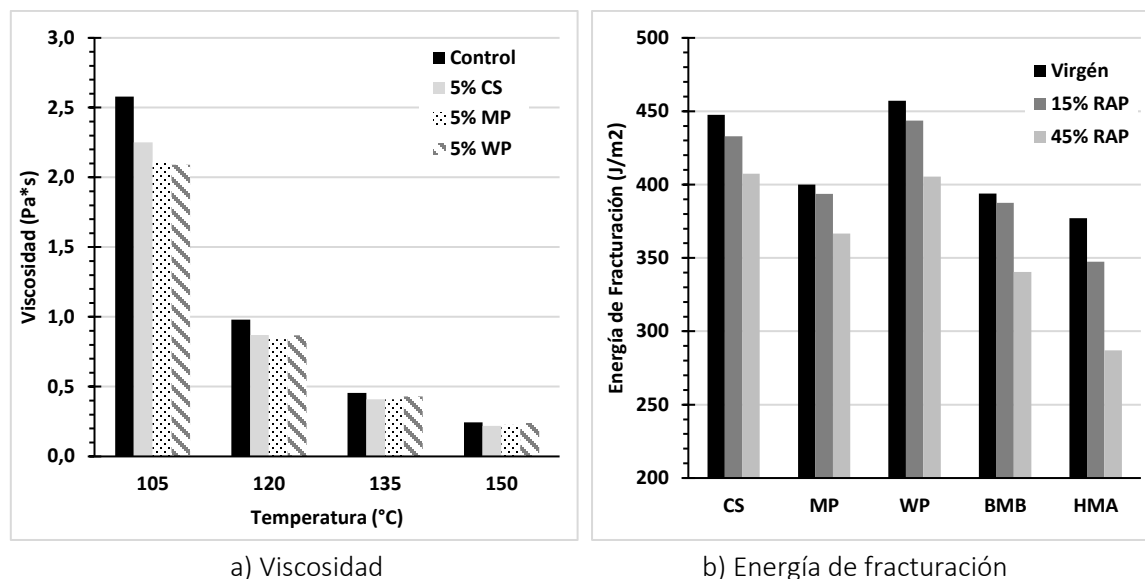


Figura 7 Comportamiento del asfalto en función del tipo de biomasa de fibras de madera

Fuente: Tomado y adaptado de [39]

Bioligantes obtenidos de la descomposición de residuos de madera en proporciones de 10%, 15% y 20% son involucrados en asfaltos envejecidos mediante RTFO (Horno rotatorio de película delgada -por sus siglas en inglés- que permite el envejecimiento a corto plazo del asfalto) y PAV (Cámara de envejecimiento por presión -por sus siglas en inglés- que permite el envejecimiento a largo plazo) como rejuvenecedores, uno de los principales problemas asociados al envejecimiento del asfalto es la oxidación y evaporación de algunos componentes livianos, causando aumento en la viscosidad, ángulo de fase e índice de ahuellamiento a la vez que disminuye la resistencia a fatiga haciendo el asfalto más propenso a sufrir de agrietamiento debido a la pérdida de flexibilidad. El resultado del estudio demuestra que los bioligantes contienen altas tasas de componentes livianos como el fenol, naftaleno, entre otros, lo cual compensa químicamente la pérdida de componentes livianos producto de la oxidación y evaporación del asfalto. De este modo, la inclusión de bioligantes aumenta el ángulo de fase y el índice de fatiga mejorando el comportamiento del asfalto a bajas temperaturas, mientras que disminuye la viscosidad e índice de ahuellamiento permitiendo la recuperación parcial de los asfaltos envejecidos [40].

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Biologante a partir de residuos

Dentro de la utilización de biologantes, es común la utilización de residuos de aceite de cocina desechados en unidades residenciales, restaurantes o fábricas de frituras, debido a su fácil acceso dentro de una ciudad. Gökalp y V. E. Uz [41] utilizaron residuo de aceites vegetales para reducir el envejecimiento del asfalto a corto y largo plazo, encontrando que la adición de aceite ablanda el asfalto, ayudando a mantener la penetración, bajar el punto de ablandamiento y reducir la viscosidad después de envejecido el asfalto, no obstante, la adición excesiva de aceite puede tener efectos negativos en la mezcla. Del estudio experimental, se evidencio que una dosificación de 6% de residuo de aceite de cocina vegetal ayuda a contrarrestar los efectos negativos del envejecimiento a corto plazo, mientras que un 7% puede ayudar a mitigar los efectos negativos del envejecimiento a largo plazo como se muestra en la Figura 8.

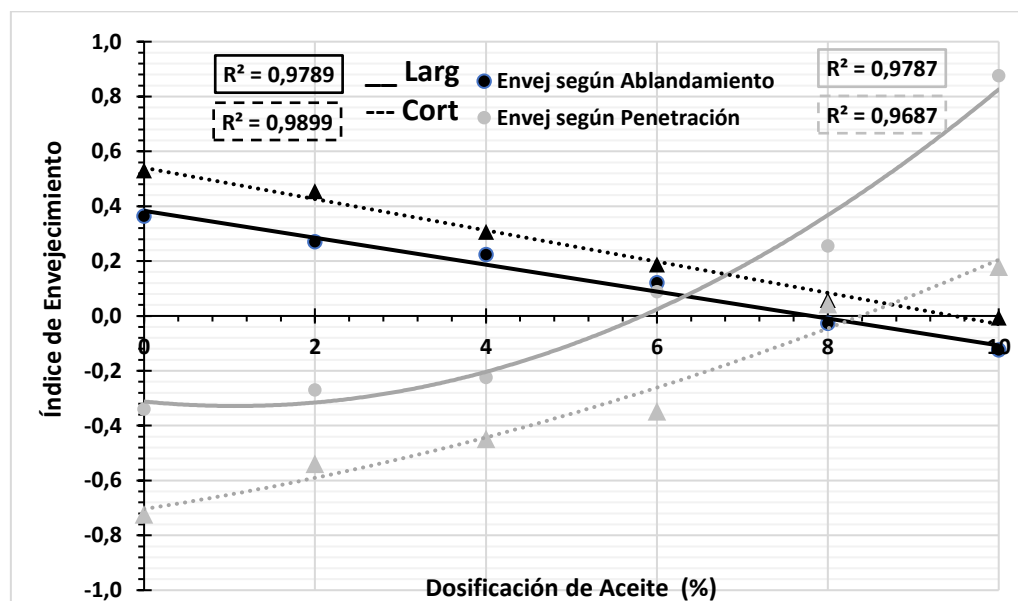


Figura 8 Índice de envejecimiento del asfalto en función de la cantidad de aceite
Fuente: Tomado y adaptado de [41]

Al Omari et al. [36] llevaron a cabo un estudio donde se adicionaron 1,2,4,6 y 8% de residuo de aceite vegetal de cocina recolectado de edificaciones residenciales efectuando un proceso de limpieza basado en remover las partículas sólidas del aceite pasándolo por el tamiz No. 200, como resultado, a medida que aumenta el contenido de residuo de aceite vegetal la penetración aumenta (de 70 10/mm con 0% aceite a 150 10/mm con la adición de 8% de aceite), la ductilidad aumenta (de 100cm con 0% aceite a 140 cm con 8% de aceite), la resistencia a la fatiga a bajas y medias temperaturas aumenta mientras que el punto de ablandamiento disminuye (de 55°C con 0% aceite a 44°C con 8% aceite), la gravedad específica disminuye, la viscosidad rotación disminuye y la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas disminuye.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

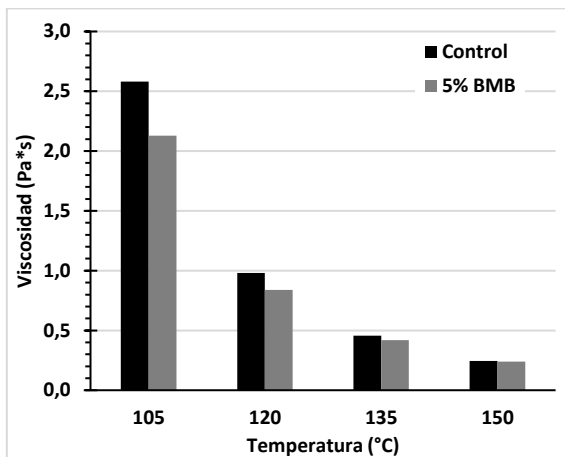
Sun et al. [21], investigaron la adición de residuos de aceite de cocina en proporciones de 0,2,4,6 y 8% para modificar el asfalto, encontrando que con el aumento en la cantidad de bioligante la penetración, ductilidad y ángulo de fase aumentan, mientras que el punto de ablandamiento, viscosidad, rigidez y módulo complejo disminuyen, esto indica que el aumento en proporción de bioligante disminuye la resistencia a la deformación recuperable, es decir tiene efectos negativos en el ahuellamiento a altas temperaturas a la vez que presenta un efecto positivo en la resistencia a fisuración térmica a bajas temperaturas.

Azahar et al. [29], adelantaron una investigación con residuos de aceite de cocina, donde se evaluó la eficiencia de realizar un tratamiento químico al aceite previo a su incorporación como modificador de un asfalto, así, posterior a un diseño con 5,10,15 y 20% de aceite, se encontró el óptimo en 5% de aceite tratado y 5% de aceite no tratado. Como resultado la mezcla asfáltica con aceite tratado presenta mejores resultados en cuanto a vacíos, estabilidad, relación estabilidad flujo, módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta, seguida por la mezcla sin aceite y por último la muestra con aceite No tratado, de otra parte, el flujo y creep a altas temperaturas presentan efectos negativos con la adición de aceite tratado y no tratado.

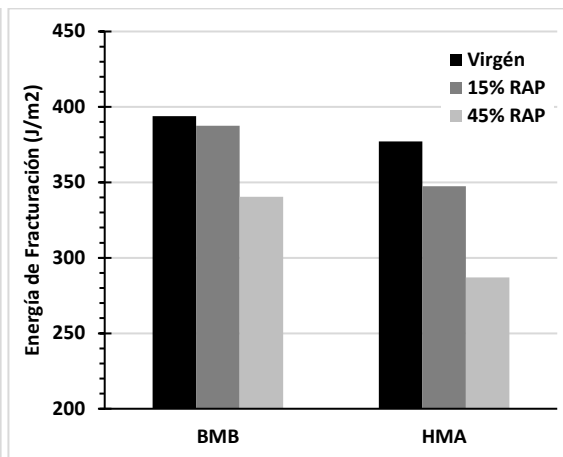
Bioligantes a partir de residuos animales.

Fini et al. [16], evaluaron el efecto que tiene el remplazo de un asfalto convencional por un bioligante producto de estiércol porcino en proporciones de 2, 5 y 10% en peso, este estudio indica que con el aumento de bioligante disminuye la viscosidad, rigidez, módulo complejo, temperatura de fisuración y resistencia al ahuellamiento. Es decir que el bioligante mejora las características asociadas a bajas temperaturas mientras que afecta negativamente las características asociadas a altas temperaturas, de este modo, este bioligante es un buen candidato para ser utilizado con RAP.

Hill et al. [39], en la investigación mencionada previamente, también incorporó bioligantes producidos a base de estiércol porcino (BMB) en 5% y 10% como rejuvenecedor para mezclas con RAP (0%, 15% y 45%), encontrando que la rigidez decrece con la inclusión de bioligante aliviando los efectos negativos del RAP (*Figura 9*), adicional a esto, se evidencio que la inclusión de este bioligante puede disminuir las temperaturas de producción, mejorar la respuesta a bajas temperaturas a la vez que ahorra costos al ser más económico el bioasfalto que el asfalto convencional.



a) Viscosidad



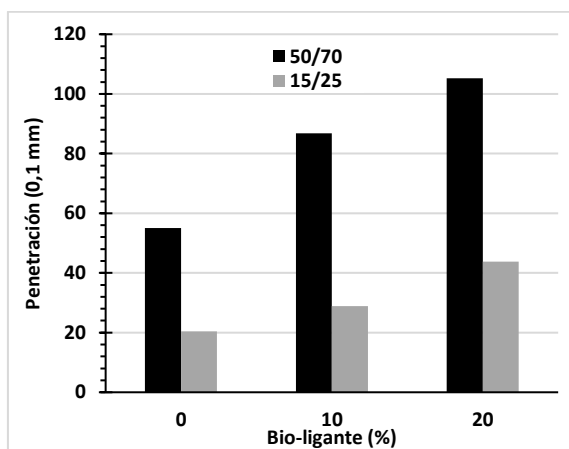
b) Energía de fracturación

Figura 9 Comportamiento del asfalto en función del tipo de biomasa de residuos de animales

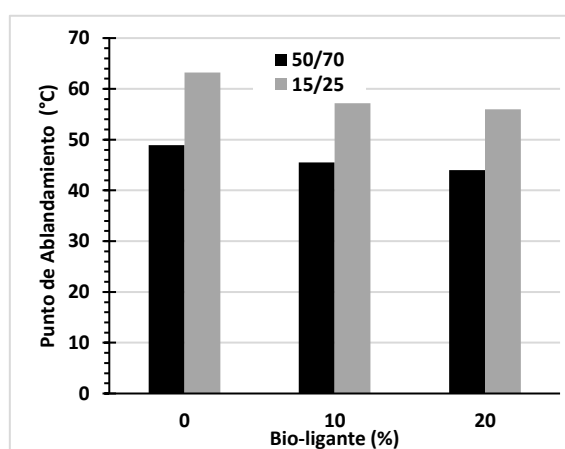
Fuente: Tomado y adaptado de [39]

Gasia et al. [42], adelantaron una investigación adicionando 0%, 10% y 20% de bioligante a partir de estiércol porcino a dos tipos de asfaltos convencionales, encontrando que con el aumento de bioligante la penetración aumenta, mientras que el punto de ablandamiento, punto de llama y viscosidad disminuyen (c) **Viscosidad**

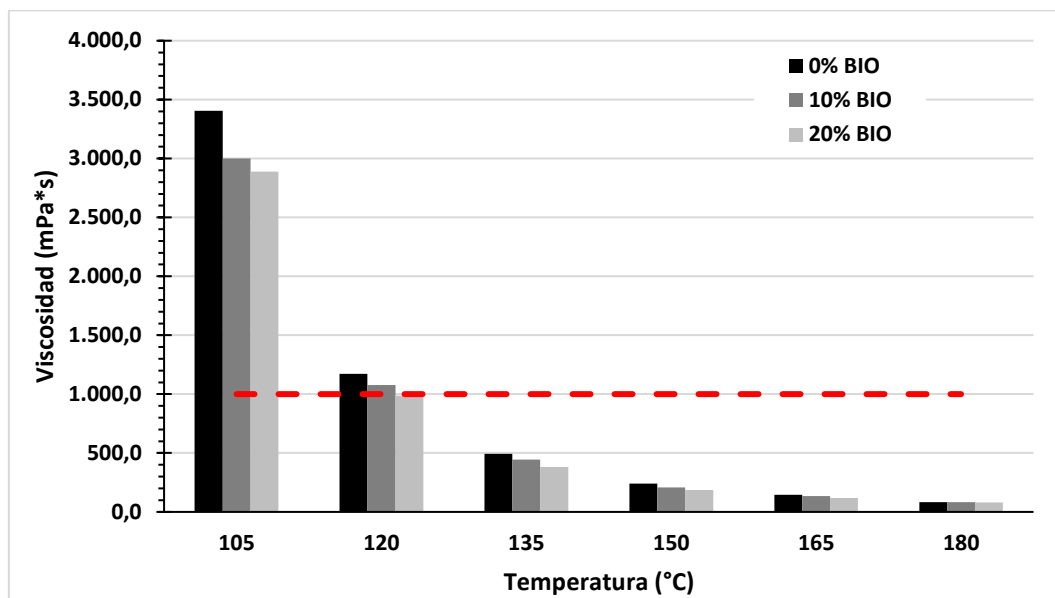
Figura 10). Así mismo, adelantó ensayos UCL demostrando que el porcentaje de pérdidas aumenta con la adición de bioligante, mostrando que a bajas temperaturas la mezcla es más frágil y a altas temperaturas, está presente mayor inconsistencia. Por último, dentro de la investigación se evaluó la lixiviación de la mezcla con bioligantes, encontrando que está no presenta ningún problema ambiental.



a) Penetración



b) Punto de ablandamiento



c) Viscosidad

Figura 10 Comportamiento a penetración y punto de ablandamiento del asfalto en función de la adición de bioligante

Fuente: Tomado y adaptado de [42]

Oldham [43] en su tesis doctoral, evalúa la adición de bioligante producto de estiércol porcino al asfalto convencional para la fabricación de mezclas asfálticas con RAP, de este modo, encontró que con la adición de bioligantes la viscosidad disminuye, a la vez que mejora la resistencia a la fracturación especialmente en presencia de RAP.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

6. METODOLOGIA

Los métodos empleados para la elaboración del presente proyecto de investigación se presentan en la siguiente figura:

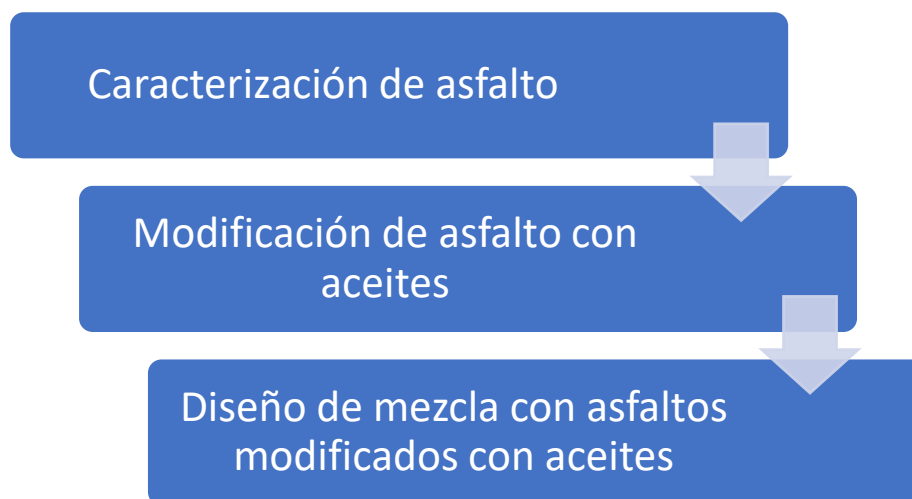


Figura 11 Métodos para la investigación

El presente proyecto de investigación pretende identificar los posibles beneficios y limitaciones de utilizar bioasfaltos dentro de mezclas asfálticas en caliente. Para este fin, se utiliza como insumo el residuo de la quema de aceites vegetales en la cocción de alimentos el cual servirá de modificador al asfalto. El aceite a utilizar debe estar libre de partículas en suspensión, para lo cual se utiliza una malla fina o tamiz capaz de retener las partículas sólidas a la vez que permite el flujo del líquido como se muestra en la Figura 12.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	



Figura 12 Proceso de filtrado del aceite de cocina

Eliminados los contaminantes del aceite, se procede a determinar su densidad con ayuda de un recipiente de volumen estándar y una balanza. En simultaneo se realiza la caracterización del asfalto virgen mediante pruebas de viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, ductilidad y punto de inflamación y combustión.

Caracterizado el aceite y el asfalto se debe realizar una modificación al asfalto por vía húmeda como se muestra en la Figura 13, teniendo en cuenta el plan experimental donde se definen tres contenidos diferentes de aceite: AR2%, AR4% y AR6%, donde la sigla AR hace referencia a el asfalto modificado con inclusión de aceite y el numero acompañante es el porcentaje de aceite adicionado, de este modo un AR2% corresponde a una modificación de 98% asfalto + 2% de aceite.

Para garantizar una modificación homogénea con resultados representativos, se define un procedimiento que parte de elevar la temperatura del asfalto a 100°C para alcanzar una consistencia líquida que permita imponer una agitación mecánica a la vez que se introduce el aceite previamente dosificado en peso. Esta agitación mecánica se mantiene a revoluciones constantes durante un periodo de 10 minutos para garantizar un correcto mezclado. Posterior a la modificación del asfalto, se realiza una caracterización de este material identificando su viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración y ductilidad.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
MOVILIDAD
Unidad Administrativa Especial de
Rehabilitación y Mantenimiento Vial

FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES

CÓDIGO: DMIC-FM-002

VERSIÓN: 1

FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023



Figura 13 Proceso para modificar el asfalto adicionándole aceite de cocina reusado

Caracterizado el asfalto modificado se procede con su utilización dentro de una mezcla asfáltica, para esto se realiza un diseño de mezcla el cual permite identificar el comportamiento del conjunto agregados pétreos con asfalto modificado. Los resultados obtenidos son analizados y comparados frente a la bibliografía y las especificaciones vigentes del IDU en materia de mezclas asfálticas.

7. DESARROLLO DEL PROYECTO

Como se menciona en el plan experimental, dentro del presente proyecto se realizó la caracterización del asfalto virgen (Patrón) así como del asfalto modificado con las diferentes dosificaciones de aceite (AR2%, AR4% y AR6%), adicionalmente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

a los requisitos solicitados en la especificación IDU ET-200-18 para un asfalto AC14, los cuales se representan con líneas rojas discontinuas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los asfaltos.

El primer parámetro medido es la viscosidad, la cual es particularmente importante en asfaltos ya que permite identificar temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas. En las figuras Figura 14, Figura 15 y Figura 16, se muestran como varía la viscosidad en función de la adición de aceite, tanto así que observando la viscosidad a 60°C (Figura 14) se logra identificar que con la adición de 2% de aceite, se reduce la viscosidad a más de la mitad, lo cual indica que el aceite mejora la trabajabilidad del asfalto, disminuyendo su resistencia a fluir.

Si bien es cierto que una menor viscosidad es buena en términos de trabajabilidad, no se debe perder de vista que un asfalto con una viscosidad muy baja, no tendrá las competencias necesarias para realizar una correcta cobertura y ligado de los agregados. Para identificar los valores deseados de viscosidad el IDU estipula unos requisitos de viscosidad para el asfalto AC14, los cuales al ser comparados con los resultados experimentales indican que la adición de aceite genera que no se cumplan estos requisitos, lo cual puede ser perjudicial para el comportamiento de la mezcla asfáltica.

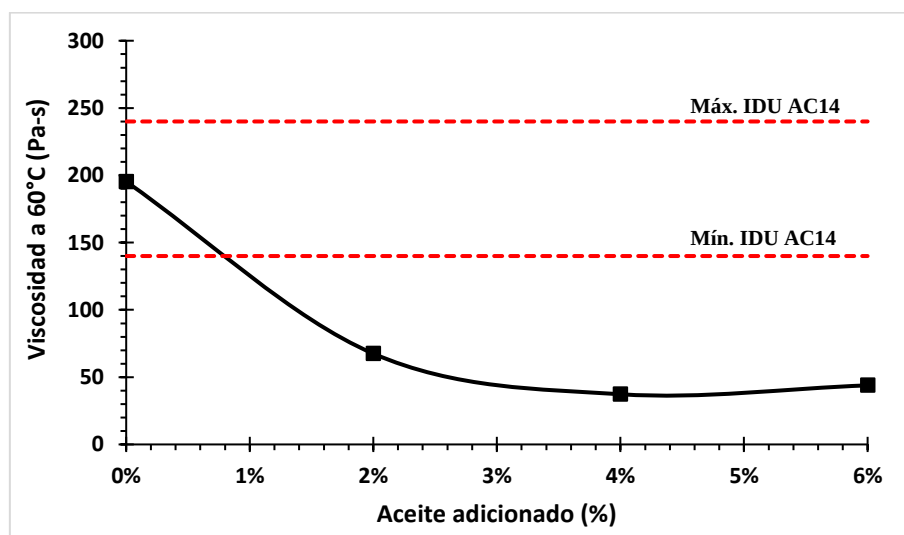


Figura 14 Viscosidad a 60°C del asfalto en función del aceite adicionado

La viscosidad medida a 135°C representada en la Figura 15 muestra un comportamiento ligeramente diferente a la viscosidad a 60°C, donde con la adición de 2% y 4% de aceite se evidencia un leve aumento de la viscosidad seguida de una caída abrupta cuando se alcanza el 6% de aceite. La comparación de los valores experimentales obtenidos con el valor mínimo solicitado por el IDU demuestra que el asfalto

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

virgen o muestra patrón y los asfaltos modificados AR2% y AR4% cumplen con la especificación, mientras que el asfalto AR6% no cumple este requisito.

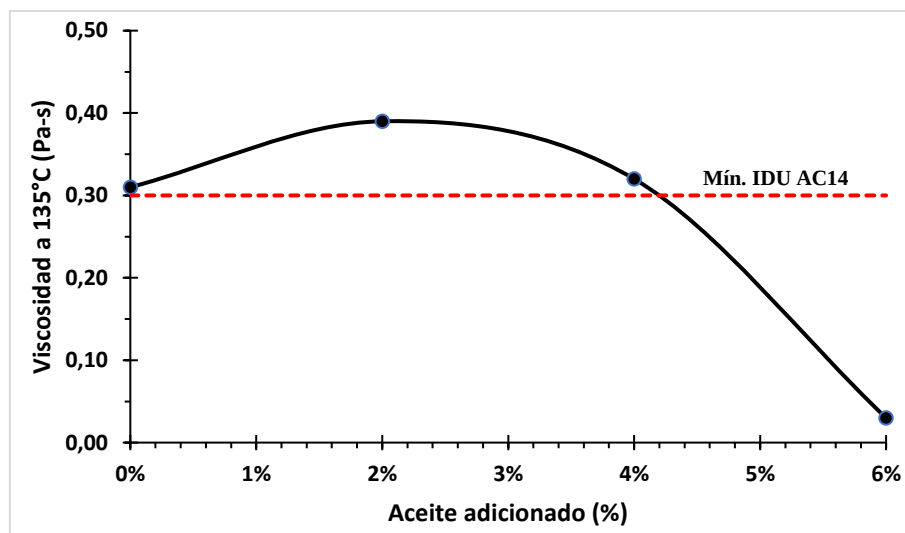
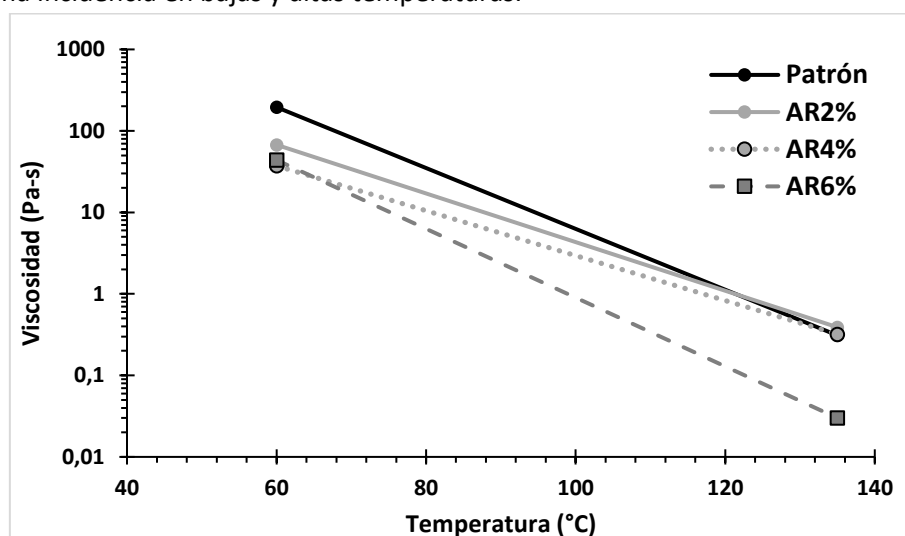


Figura 15 Viscosidad a 135°C del asfalto en función del aceite adicionado

En la figura Figura 16 se presenta la unión de los resultados de viscosidad a 60°C y 135°C para las diferentes mezclas evaluadas, con el fin de identificar el cambio de viscosidad con respecto a la temperatura. Para esta validación, se toma como referencia la muestra patrón identificando que las muestras AR2% y AR4% presentan variaciones importantes de viscosidad a bajas temperaturas, pero a medida que se incrementa la temperatura este efecto es menos notorio. Por su parte, la muestra AR6% presenta una pendiente similar a la mezcla patrón, indicando que la adición de esta cantidad de aceite tiene la misma incidencia en bajas y altas temperaturas.



	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Figura 16 Viscosidad del asfalto en función del aceite adicionado

El siguiente parámetro a tener en cuenta es la penetración de los asfaltos, este parámetro indica el grado de dureza de los asfaltos, en la Figura 17 se presentan los resultados obtenidos acompañados del valor mínimo solicitado en la IDU ET-200-18. De la Figura 17 se puede identificar que la adición de aceite aumenta la penetración del asfalto, lo cual quiere decir que la aguja del penetrómetro es capaz de penetrar una mayor distancia debido a que el asfalto es más blando.

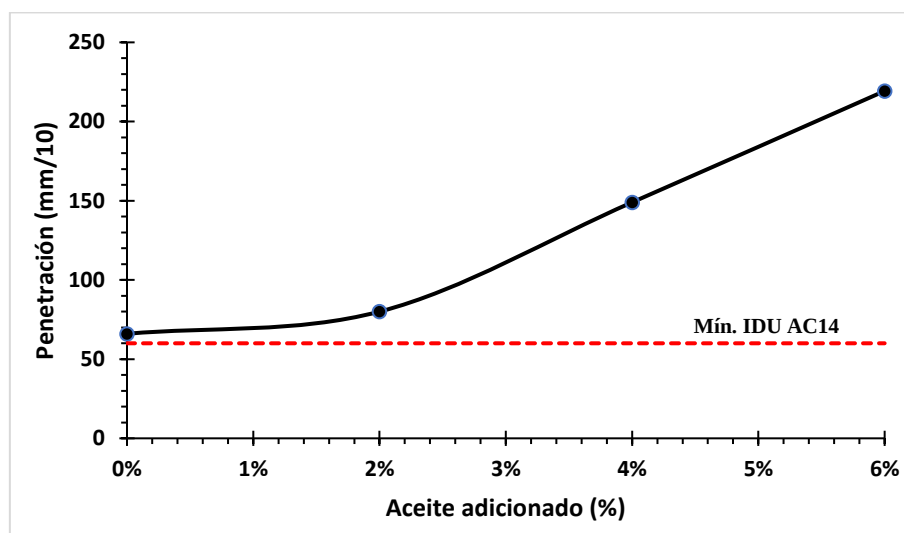


Figura 17 Penetración del asfalto en función del aceite adicionado

El aumento en la penetración del asfalto por la acción del aceite ayuda a cumplir de mejor manera el requisito del IDU ya que este solo solicita un valor mínimo sin acotar un máximo, no obstante, se debe tener en cuenta que un asfalto muy blando puede tener problemas de deformación plástica.

El ensayo de punto de ablandamiento permite identificar la temperatura a la cual el asfalto alcanza un punto de plasticidad en el cual no es capaz de soportar la carga impuesta por las esferas del ensayo, en este sentido, entre mayor sea el punto de ablandamiento el asfalto tendrá la capacidad de soportar mayores temperaturas antes de perder su capacidad de soporte. En la Figura 18 se muestra los resultados obtenidos, donde es posible evidenciar que la adición de aceite disminuye la temperatura a la cual el asfalto pierde soporte, haciendo que este sea más propenso a sufrir deformaciones en su vida útil.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

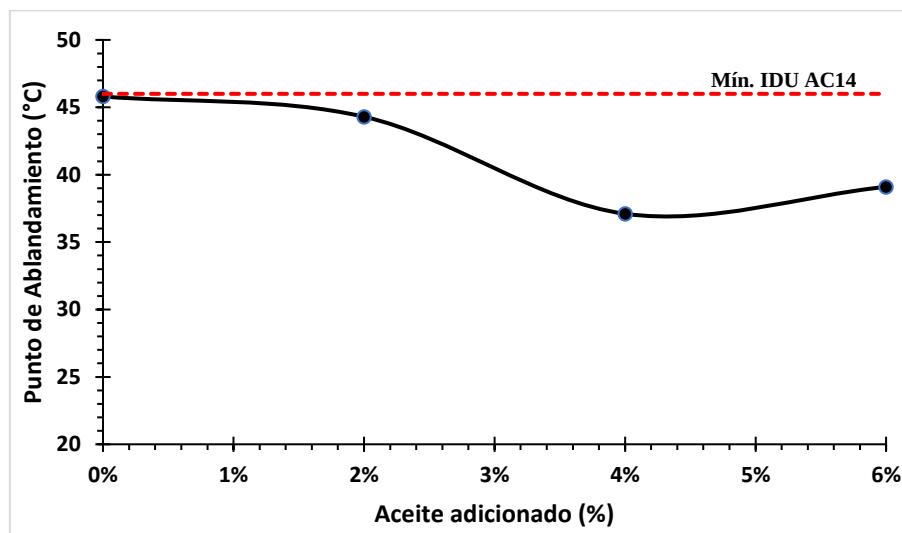


Figura 18 Punto de ablandamiento del asfalto en función del aceite adicionado

De acuerdo con la figura anterior, es posible evidenciar que el asfalto patrón se encuentra en el límite del cumplimiento de la especificación, esto hace que una ligera modificación del punto de ablandamiento por la acción del aceite lleve el asfalto a un resultado desfavorable de este requisito, lo cual es lo que sucede con el AR2%, mientras que el AR4% y AR6% presentan diferencias más marcadas de punto de ablandamiento haciendo que este lejos de cumplir con la especificación.

El ensayo de ductilidad en asfalto representa la capacidad que tiene este material de estirarse sin llegar a romperse, en este sentido, se realizan ensayos para determinar este parámetro, sin embargo, después de un valor de estiramiento el resultado se reporta como >100cm. Teniendo en cuenta este efecto, para todos los tipos de asfalto evaluados se alcanza un valor de >100cm, lo cual impide realizar una comparación objetiva de los asfaltos en este aspecto.

Vale la pena aclarar que los resultados de asfaltos aquí expuestos fueron tomados con una sola muestra por ensayo, es decir que no es posible hacer un análisis estadístico, no obstante, se plantea de esta forma ya que los valores encontrados se encuentran en línea con lo reportado en la literatura.

Con los resultados obtenidos de los asfaltos, es posible identificar que modificar el asfalto incluyendo aceite tiende a ablandarlo, lo cual puede tomarse como un efecto no deseable. Con el fin de comprobar el posible impacto de estos asfaltos modificados en una mezcla asfáltica, se toma el asfalto que alcanza mejores características en su etapa de caracterización (AR2%) para realizar un diseño de mezcla siguiendo la metodología Marshall. El diseño propuesto evalúa 6 contenidos de asfalto partiendo desde 4.5% y aumentando 0.5% de asfalto en cada bachada hasta llegar a 7.0%.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Como primer paso se realizan un ensayo de viscosidad al asfalto modificado tomando valores a diferentes temperaturas para lograr construir la curva de viscosidad en función de la temperatura la cual sirve de insumo esencial para la definición de la temperatura de compactación y mezclado.

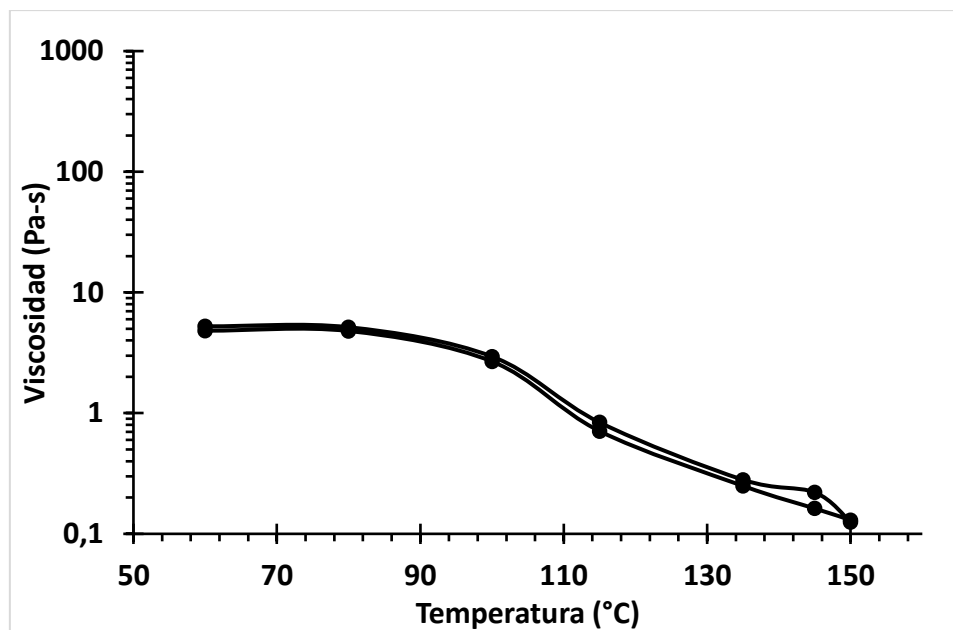


Figura 19 Viscosidad del asfalto modificado con 2% de aceite

De la gráfica anterior se puede ver que los límites de viscosidad para el asfalto modificado a la temperatura de 60°C no son adecuados, encontrándose por debajo de lo solicitado en las especificaciones IDU, sin embargo, para la temperatura de 135°C el asfalto modificado se encuentra sobre el límite de cumplimiento de este parámetro.

Para realizar el diseño de mezcla se evalúa la densidad de las mezclas como se muestra en la Figura 20, donde se puede ver que conforme aumenta el contenido de asfalto la densidad aumenta, sin llegar a un pico máximo.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

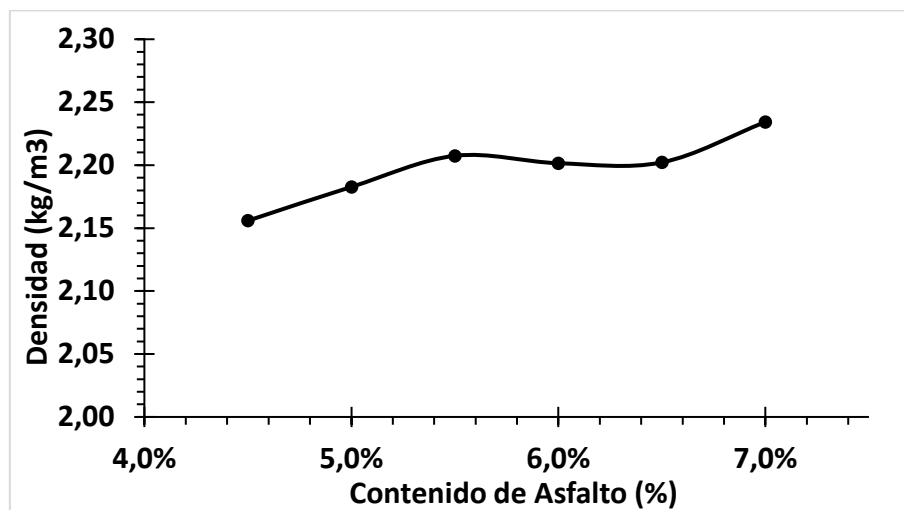


Figura 20 Densidad diseño Marshall con asfalto AR2%

La prueba de estabilidad encargada de medir la resistencia de las mezclas muestra un comportamiento similar al encontrado en los resultados de densidad, donde se evidencia un crecimiento de este parámetro conforme aumenta el contenido de asfalto. La estabilidad cuenta con un requisito de calidad estipulado en la IDU ET-620-18 el cual está en función del nivel de tránsito, de este modo para efectos del proyecto, se estipula un T3 con el cual se evaluarán los resultados.

De acuerdo con el nivel de tránsito y los resultados obtenidos se genera la Figura 21, donde es posible identificar que para contenidos de asfalto superiores a 6.0% el requisito de estabilidad estipulado por la especificación se satisface sin problema.

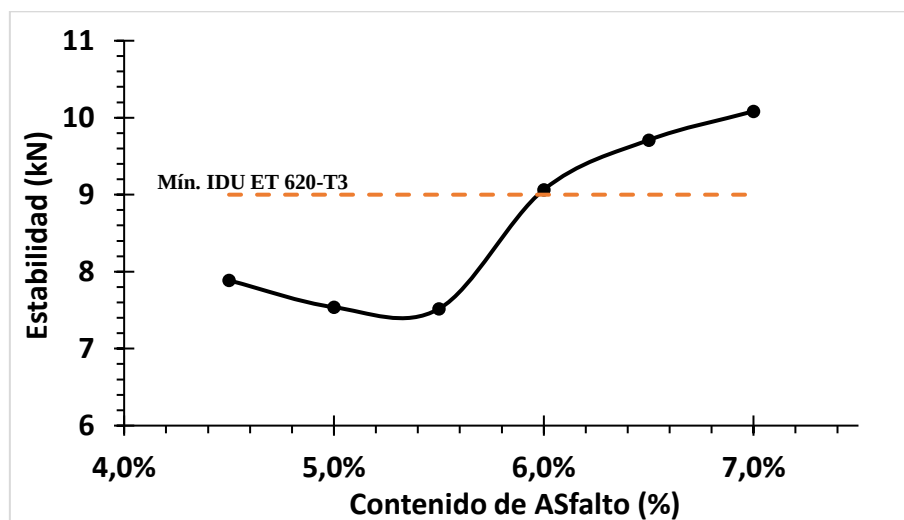


Figura 21 Estabilidad diseño Marshall con asfalto AR2%

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

El flujo o la medida de deformación de la mezcla ante una carga monotónica (Figura 22), muestra un comportamiento anormal, al experimentar una caída en 5% de asfalto seguida de un aumento en la muestra de 5.5% de contenido de asfalto. No obstante, posterior a este punto, se puede evidenciar una tendencia que indica que en 7.0% se alcanza el mejor valor de flujo. En este punto vale la pena destacar que todos los porcentajes de asfalto evaluados cumplen los requerimientos de la especificación IDU.

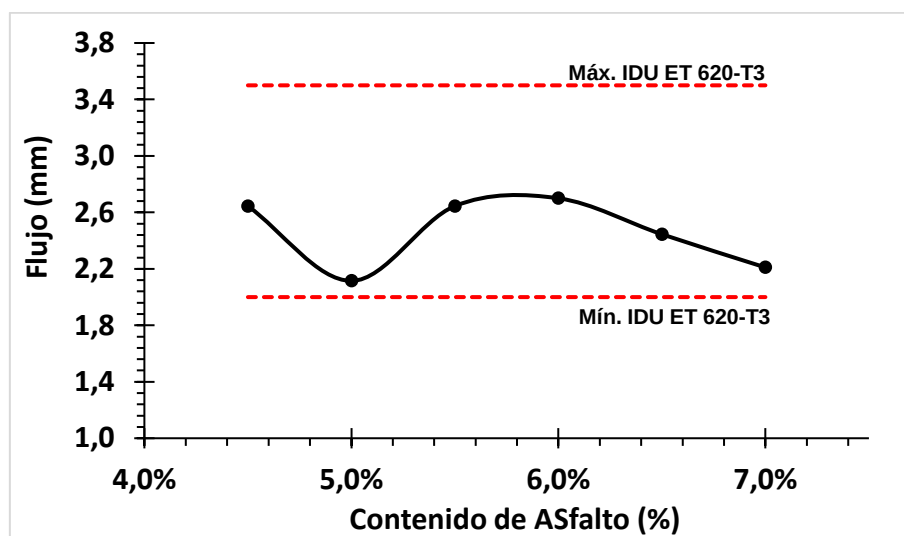


Figura 22 Flujo diseño Marshall con asfalto AR2%

Referente a la validación solicitada por la especificación entre la relación estabilidad y flujo, en la Figura 23 se puede ver que Todos los contenidos de asfalto menos el 5.5% cumplen con este requisito, no obstante, el mayor valor de esta relación se alcanza con el 7.0% de asfalto.

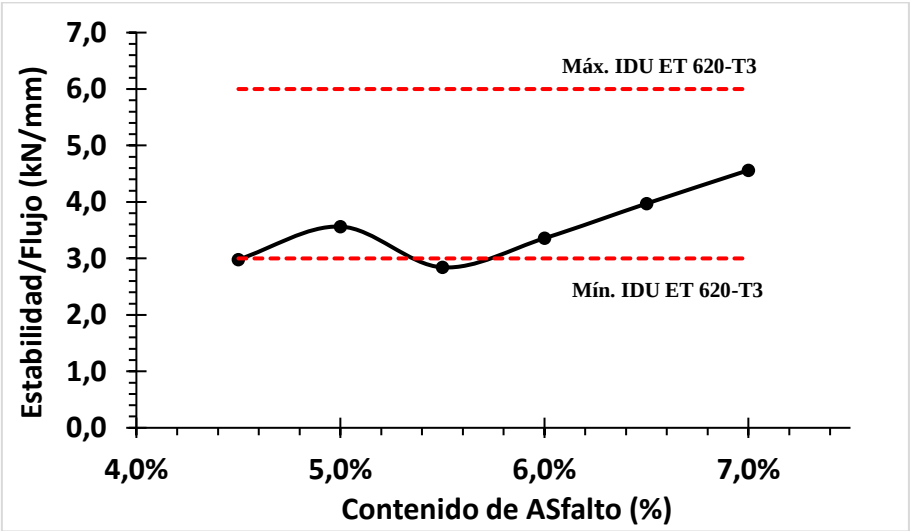


Figura 23 Relación estabilidad - flujo diseño Marshall con asfalto AR2%

En la Figura 24 se muestra la verificación el contenido de vacíos con aire dentro de la mezcla, donde se evidencian valores atípicos en la muestra aumentando el contenido de vacíos de las muestras de 4.5% y 5.0% contenido de asfalto, seguido de un descenso de los vacíos en la muestra con 5.5% de asfalto. De otra parte, se evalúan los requisitos de la especificación IDU, donde se evidencia que únicamente las muestras de 6.5% y 7.0% cumplen con dicha especificación.

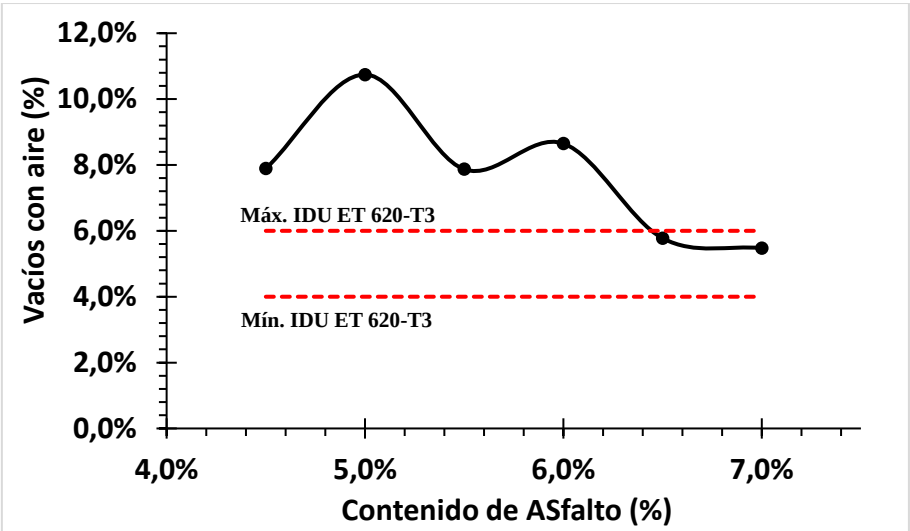


Figura 24 Vacíos diseño Marshall con asfalto AR2%

Como resultado del diseño Marshall, es posible identificar que las muestras con altos contenidos de asfalto (superior a 6.5%) son las únicas que cumple con todos los requisitos estipulados por el IDU, por

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vía	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

esta razón se podría pensar que el contenido de asfalto es superior a 6.5%, no obstante, es difícil establecer con precisión el contenido óptimo de asfalto, toda vez que las tendencias de las curvas de estabilidad y densidad finalizan con pendientes positivas, lo cual indica que porcentajes superiores de asfalto podrían mostrar mejores comportamientos, esta hipótesis se confirma con las curvas de flujo y porcentaje de vacíos que muestran pendientes negativas en su final indicando que pueden alcanzar valores menores si se adiciona más asfalto.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

8. CONCLUSIONES

De la presente investigación se pueden obtener las siguientes conclusiones.

1. La adición de aceite de cocina reutilizado para modificar asfalto presenta una alteración importante en las propiedades de este, disminuyendo la viscosidad y el punto de ablandamiento, mientras que aumenta la penetración. Esto indica que la incorporación de aceite de cocina genera ablandamiento en los asfaltos.
2. A bajas temperaturas la viscosidad reportada en AR2% presenta una variación importante frente a la muestra patrón, sin embargo, la viscosidad entre AR2%, AR4% y AR6% no presenta variaciones significativas. En contraste, a temperaturas de 135°C no se ve una alteración mayor de la viscosidad entre la muestra patrón y AR2%, mientras que entre AR4% y AR6% se evidencia una fuerte disminución de la viscosidad.
3. La penetración del asfalto se presenta relativamente constante entre la muestra patrón y AR2%, después de este punto la penetración aumenta linealmente con el aumento del contenido de aceite.
4. Las mezclas asfálticas con porcentajes de asfalto inferiores a 6% no cumplen con los requisitos mínimos de estabilidad para un nivel de tránsito T3, mientras que, contenidos inferiores a 6.5% presentan vacíos superiores a lo exigido por las especificaciones IDU.
5. La tendencia de las curvas de estabilidad, densidad y flujo suponen que los contenidos de asfalto (AR2%) evaluados no corresponden al óptimo, toda vez que no se encuentra un pico máximo (densidad y estabilidad), indicando que el contenido óptimo de asfalto puede estar por encima de 7%.
6. El contenido mínimo de asfalto (AR2%) que satisface los requisitos del diseño Marshall es del orden de 6.5%, lo cual es un contenido elevado, por lo tanto, no se considera viable la aplicación de este tipo de bioasfalto en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

9. RECOMENDACIONES

Del desarrollo experimental realizado, se pueden obtener las siguientes recomendaciones:

1. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de este proyecto de investigación, es posible concluir que el aceite de cocina recuperado y filtrado no es un buen modificador de asfaltos, no obstante, según la literatura consultada, este aceite al ser transformado químicamente en biodiesel puede tener resultados positivos al combinarse con asfalto virgen. En este orden de ideas, se recomienda realizar una investigación para determinar las características de un asfalto modificado con Biodiesel.
2. Existen diferentes fuentes de biomasa, por lo tanto, para tener un espectro completo de la respuesta de los bioasfaltos, es pertinente evaluar diferentes biomateriales, teniendo en cuenta que, por limitaciones de la capacidad instalada del laboratorio de la UMV, se debe intentar adquirir estos productos en un estado avanzado de transformación.

Esta investigación involucra el aceite de cocina reutilizado como aditivo al asfalto virgen, lo cual hace que se ablande, bajo esta premisa, se puede evaluar el comportamiento que alcanza este tipo de aceite en mezclas con inclusión de fresado determinando si el aceite permite un mejor mezclado del asfalto residual con el asfalto virgen.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

10. GLOSARIO

Asfalto: Mineral negro producto de la destilación del petróleo.

Bioaceites: Líquido viscoso producto de la transformación de la biomasa.

Bioasfaltos: Mezcla de bioligantes con agregados pétreos para formar mezclas asfálticas.

Bioligantes: Líquido producto de la transformación de bioaceites que presenta características similares al asfalto.

Biomasa: Materia producida por organismos vivos

Licuación hidrotérmica: Calentamiento de masa en presencia de altas presiones

Pirolisis: Calentamiento de masa sin presencia de oxígeno.

RAP: Pavimento asfáltico reciclado.

Transesterificación: Proceso en el cual reacciona un éster ácido carboxílico con alcohol y opcionalmente un catalizador. Este proceso también es llamado alcoholisis.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Miluska.Jara, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 27 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [2] Yinuo, «UN 2023 SDG Summit», United Nations Sustainable Development. Accedido: 27 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/05/un-2023-sdg-summit/>
- [3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-Minambiente, Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible-FCDS, y WWF-Colombia, «Lineamientos de Infraestructura Verde Vial para Colombia (LIVV)», Bogotá D.C., jul. 2020.
- [4] «Estadísticas sobre producción de crudo | Crudo | Enerdata». Accedido: 25 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://datos.enerdata.net/petroleo-crudo/datos-produccion-energia-mundial.html>
- [5] Datosmacro, «Colombia - Producción de petróleo». [En línea]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/petroleo/produccion/colombia>
- [6] R. Galvis, «Una visión sobre el procesamiento del material RAP para su reutilización en planta», 2021.
- [7] DANE, «Indicador de Mezcla Asfáltica (IMA)», Bogotá D.C., sep. 2024.
- [8] J. C. Petersen, «Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art», *Transp. Res. Rec.*.
- [9] C. M. Romero y A. Gómez, «Propiedades físicas y químicas de asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfaltenos», *REV. ACAD. COLOMB. CIENC*, vol. XXVI, n.º 98, 2002.
- [10] F. A. Reyes, C. E. Daza, y H. A. Rondón, «DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES SARA DE ASFALTOS COLOMBIANOS ENVEJECIDOS AL MEDIO AMBIENTE EMPLEANDO CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA EN COLUMNA».
- [11] «Biomasa | Idae». Accedido: 6 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/biomasa>
- [12] «Biomass Energy». Accedido: 22 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://education.nationalgeographic.org/resource/biomass-energy>
- [13] M. He, C. Tu, D. W. Cao, y Y. J. Chen, «Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, n.º 7, pp. 792-800, jul. 2019, doi: 10.1080/10298436.2017.1347434.
- [14] J. Peralta, «Development of an Innovative Bio-Binder Using Asphalt-Rubber Technology», *Vol No.*
- [15] X. Hu y M. Gholizadeh, «Progress of the applications of bio-oil», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, p. 110124, dic. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110124.
- [16] E. H. Fini, I. L. Al-Qadi, Z. You, B. Zada, y J. Mills-Beale, «Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 13, n.º 6, pp. 515-522, dic. 2012, doi: 10.1080/10298436.2011.596937.
- [17] A. Mathanker, S. Das, D. Pudasainee, M. Khan, A. Kumar, y R. Gupta, «A Review of Hydrothermal Liquefaction of Biomass for Biofuels Production with a Special Focus on the Effect of Process

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

- Parameters, Co-Solvents, and Extraction Solvents», *Energies*, vol. 14, n.º 16, p. 4916, ago. 2021, doi: 10.3390/en14164916.
- [18] H. Chen, «Lignocellulose biorefinery product engineering», en *Lignocellulose Biorefinery Engineering*, Elsevier, 2015, pp. 125-165. doi: 10.1016/B978-0-08-100135-6.00005-3.
- [19] M. K. Lam, C. G. Khoo, y K. T. Lee, «Scale-up and commercialization of algal cultivation and biofuels production», en *Biofuels from Algae*, Elsevier, 2019, pp. 475-506. doi: 10.1016/B978-0-444-64192-2.00019-6.
- [20] Z. Zhang, Y. Fang, J. Yang, y X. Li, «A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance», *J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed.*, vol. 9, n.º 2, pp. 151-166, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jtte.2022.01.003.
- [21] Z. Sun, J. Yi, Y. Huang, D. Feng, y C. Guo, «Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil», *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 496-504, ene. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.173.
- [22] L. P. Ingrassia, X. Lu, G. Ferrotti, y F. Canestrari, «Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements», *J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed.*, vol. 7, n.º 2, pp. 192-204, abr. 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2019.04.003.
- [23] R. Mamat, M. R. Hainin, N. Abdul Hassan, N. A. Abdul Rahman, M. N. M. Warid, y M. K. Idham, «A REVIEW OF PERFORMANCE ASPHALT MIXTURES USING BIO-BINDER AS ALTERNATIVE BINDER», *J. Teknol.*, vol. 77, n.º 23, dic. 2015, doi: 10.11113/jt.v77.6681.
- [24] A. Weir *et al.*, «Renewable binders from waste biomass for road construction: A review on thermochemical conversion technologies and current developments», *Constr. Build. Mater.*, vol. 330, p. 127076, may 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127076.
- [25] M. A. Quader y S. Ahmed, «Bioenergy With Carbon Capture and Storage (BECCS)», en *Clean Energy for Sustainable Development*, Elsevier, 2017, pp. 91-140. doi: 10.1016/B978-0-12-805423-9.00004-1.
- [26] C. N. Reddy *et al.*, «Chapter 29 - Techno-economic and environmental impact analysis of biofuels produced from microalgal biomass», en *Biofuels and Bioenergy*, B. Gurunathan y R. Sahadevan, Eds., Elsevier, 2022, pp. 687-712. doi: 10.1016/B978-0-323-90040-9.00006-0.
- [27] G. Baskar, G. Kalavathy, R. Aiswarya, y I. Abarnaebenezer Selvakumari, «Advances in bio-oil extraction from nonedible oil seeds and algal biomass», en *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, Elsevier, 2019, pp. 187-210. doi: 10.1016/B978-0-08-102728-8.00007-3.
- [28] H. Venkatesan, J. J. Godwin, y S. Sivamani, «Data set for extraction and transesterification of bio-oil from *Stoechospermum marginatum*, a brown marine algae», *Data Brief*, vol. 14, pp. 623-628, oct. 2017, doi: 10.1016/j.dib.2017.08.031.
- [29] W. N. A. W. Azahar, R. P. Jaya, M. R. Hainin, M. Bujang, y N. Ngadi, «Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil», *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 653-663, sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.048.
- [30] J. Salazar Delgado, «Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano», *Métodos y Materiales*, vol. Volumen 1, n.º Año 1, pp. 25-38, diciembre de 2011.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

- [31] E. Gaudenzi, F. Canestrari, X. Lu, y F. Cardone, «Performance Assessment of Asphalt Mixture Produced with a Bio-Based Binder», *Materials*, vol. 14, n.º 4, p. 918, feb. 2021, doi: 10.3390/ma14040918.
- [32] P. Wu, B. Xia, X. Zhao, y J. Pienaar, «Defining Green Road Infrastructure Projects—A Critical Review», en *Proceedings of the 19th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, L. Shen, K. Ye, y C. Mao, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 125-134. doi: 10.1007/978-3-662-46994-1_11.
- [33] A. D. Limantara *et al.*, «Comparative Study Of Bio-Asphalt, Coconut Shell Distillation TAR, And Plastic Road In Terms Of Construction, Economical, And Regulatory Aspects», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1364, p. 012058, dic. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012058.
- [34] M. de, «Agencia Nacional de Hidrocarburos Vicepresidencia de Operaciones, Regalías y Participaciones Gerencia de Reservas y Operaciones».
- [35] A. M. Al-Sabaei, M. B. Napiah, M. H. Sutanto, W. S. Alaloul, y A. Usman, «A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions», *J. Clean. Prod.*, vol. 249, p. 119357, mar. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119357.
- [36] A. A. Al-Omari, T. S. Khedaywi, y M. A. Khasawneh, «Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications», *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 11, n.º 1, pp. 68-76, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.09.004.
- [37] J. Gao, H. Wang, Z. You, M. Mohd Hasan, Y. Lei, y M. Irfan, «Rheological Behavior and Sensitivity of Wood-Derived Bio-Oil Modified Asphalt Binders», *Appl. Sci.*, vol. 8, n.º 6, p. 919, jun. 2018, doi: 10.3390/app8060919.
- [38] «Precio del petróleo Brent | Cotización del Brent - Investing.com», Investing.com Español. Accedido: 22 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.investing.com/commodities/brent-oil>
- [39] B. Hill, D. Oldham, B. Behnia, E. H. Fini, W. G. Buttlar, y H. Reis, «Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 19, n.º 4, pp. 362-369, abr. 2018, doi: 10.1080/10298436.2016.1175563.
- [40] R. Zhang, Z. You, H. Wang, X. Chen, C. Si, y C. Peng, «Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt», *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 568-575, nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201.
- [41] İ. Gökalp y V. E. Uz, «Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in bitumen: Zero tolerance aging approach», *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116695, dic. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116695.
- [42] J. Gasia, T. López-Montero, L. Vidal, R. Miró, C. Bengoa, y A. H. Martínez, «Characterization of Asphalt Binders Modified with Bio-Binder from Swine Manure», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 20, p. 11412, oct. 2023, doi: 10.3390/app132011412.
- [43] D. Oldham, «A Multiscale Investigation on the Underlying Mechanisms of Bio-Oil from Swine Manure on the Rejuvenation and Aging Resistivity of Recycled Asphalt Pavement», DOCTOR OF PHILOSOPHY, North Carolina A&T State University, Greensboro, North Carolina, 2021.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

CONTROL DE GESTIÓN				
GESTIÓN	NOMBRE	CARGO / ROL	DEPENDENCIA	FIRMA
Elaboró:	Jorge Alberto Ascencio Castañeda	Contratista	GDCI	
Revisó:	Franceth Justine Eduardo Castellanos Ballesteros	Profesional especializado grado 05	GDCI	
Revisó:	Humberto Ramírez Gómez	Contratista	DG	
Aprobó:	Camilo Enrique Marrugo Martínez	Gerente GDCI-	GDCI	

CONTROL DE MODIFICACIONES			
VERSIÓN	SECCIÓN MODIFICADA	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
1	Creación del documento	09-12-2024	N/A
2			
N			