



## METODOS AVANZADOS DE ANALISIS DE CIENCIA DE LOS MATERIALES Y NANOMATERIALES UTILIZADOS EN LA MODIFICACION DE ASFALTOS

### ADVANCED METHODS IN MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGY APPLIED TO THE ASPHALT MODIFICATION PROCESS

**A. Quim. R.E. Villegas-Villegas<sup>1</sup>; Ing. L.G. Loria-Salazar, PhD<sup>2</sup>;  
Ing J.P. Aguiar-Moya, PhD<sup>3</sup>; Ing. J.P. Corrales-Azofeifa, MSc<sup>4</sup>; Ing. A. Navas-Carro,  
MSc<sup>5</sup>; Ing. W.D. Fernández-Gómez, MSc<sup>6</sup>;  
Ing. F.A. Reyes Lizcano, PhD<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. [rafael.villegas@ucr.ac.cr](mailto:rafael.villegas@ucr.ac.cr)

<sup>2</sup> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

<sup>3</sup> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. [jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

<sup>4</sup> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. [josepablo.corrales@ucr.ac.cr](mailto:josepablo.corrales@ucr.ac.cr)

<sup>5</sup> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. [alejandro.navas@ucr.ac.cr](mailto:alejandro.navas@ucr.ac.cr)

<sup>6</sup> Pontificia Universidad Javeriana, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. [fernandezw@javeriana.edu.co](mailto:fernandezw@javeriana.edu.co)

<sup>7</sup> Centro de Estudios de Carreteras, Transportes y Afines. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. [fredy.reyes@javeriana.edu.co](mailto:fredy.reyes@javeriana.edu.co)

#### ABSTRACT

*In this research project, polyethylene bags from banana plantations are used to modify an AC-30 binder (corresponding to a PG64-22). This residue was chosen to reduce the environmental impact of this crop and since it is a product without technical specs, it was carefully classified to decide on the feasibility of its use as a binder modifier. To accomplish this, the material was chemically evaluated with RAMAN spectroscopy; also, calorimetric tests were performed with DSC and TGA to determine its fusion and decomposition temperatures. By means of the FT-IR, it was determined that the bag initiates its degradation at 150°C and it is fully degraded at 450°C. The AFM corroborated an appropriate distribution of the modifier within the binder and also allowed to observe the modified binder's topography. IATROSCAN chromatography was used to evaluate the chemical composition of the original binder and Infrared spectroscopy was performed on both the original and modified binders to make evident the addition of the polymer to the binder. DSR was used to measure the binder performance through creep, multi stress creep recovery and fatigue and it was compared with the performance of binders mixed with other commercial modifiers. It was found that the deformation resistance increases by 50% at 250 load cycles in comparison to the original binder which makes it suitable for use on low volume roads. Also the addition of banana bags to the binder, contributes to the use of this solid waste at a rate of 4kg per cubic meter of binder and also the elimination toxic gases released to the atmosphere.*

#### RESUMEN

*En esta investigación se utiliza la bolsa de polietileno con la que se cubren los racimos de banano para modificar un bitumen AC-30 (con clasificación PG64-22). Este desecho se escogió para disminuir el impacto ecológico de este cultivo y al ser un producto sin ficha técnica, se decidió clasificar cuidadosamente para poder tomar decisiones en cuanto a la factibilidad de usarlo como modificante de bitumen. Para tales fines, el material fue evaluado químicamente con espectroscopia RAMAN, además, se le realizaron pruebas calorimétricas con el DSC y el TGA en donde se obtuvieron datos sobre su temperatura de fusión y descomposición. Con ayuda de la espectroscopia Infrarroja de gases (FT-IR), se determinó que la bolsa inicia su degradación a los 150°C y a los 450°C se degrada totalmente. La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) corroboró la distribución apropiada del modificante en el bitumen y también permitió observar la topografía del bitumen modificado. Se evaluó la composición química del bitumen original mediante*



*cromatografía IATROSCAN y se realizó espectroscopia infrarroja al bitumen original y al modificado con la bolsa de banano evidenciando la adición del polímero en el asfalto. Con el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) se midió el desempeño de los asfaltos mediante pruebas de creep, multi stress creep recovery y fatiga, comparándolo con otros asfaltos modificados con modificantes comerciales. Se encontró que el modificante reduce la deformación en un 50% a 250 ciclos de carga (respecto al asfalto original) y se considera apropiado para utilizarse en rutas secundarias. Además, la adición de la bolsa de banano al bitumen contribuye en el manejo del residuo sólido a razón de 4 kg por cada metro cúbico de bitumen, así como la eliminación de los gases tóxicos que se volatilizan a la atmósfera.*

**PALABRAS CLAVES:** asfaltos modificados, nanotecnología, reología, análisis químico, análisis calorimétrico, espectroscopia.

**KEYWORDS:** modified asphalts, nanotechnology, rheology, chemical analysis, calorimetric analysis, spectroscopy.

## INTRODUCCION

Costa Rica es un país con 52 000 Km<sup>2</sup> de extensión, durante el 2010 el área bananera de Costa Rica alcanzó 43,031 hectáreas en producción, (CORBANA 2011) y en el caso de Colombia en el año 2010 la superficie agrícola dedicada a la producción de banano fue 47.108 Ha (Ministerio de Agricultura de Colombia, 2011). En el ámbito mundial en el año 2009, el mayor productor de banano fue India, seguido de Filipinas, China, Ecuador, Brasil, Indonesia, Tanzania y Guatemala. Costa Rica ocupaba el noveno lugar en producción de banano del mundo con 2.365.470 MT, mientras que Colombia ocupaba el undécimo lugar con 2.020.390 MT [1]. Para obtener una mejor producción de la fruta los racimos se envuelven con una bolsa plástica de polietileno. Esta práctica hace que la fruta crezca en mejores condiciones para la venta, ya que la bolsa hace que la fruta mantenga una especie de microclima apto para protegerla del sol, los plaguicidas y los insectos que afectan la plantación.

La problemática es que este plástico no es biodegradable para disponerlo directamente al ambiente. Además, como las bolsas son impregnadas con Clorpirifos para proteger la fruta de los insectos se presenta una gran dificultad de reciclarse en aplicaciones para el consumo humano [2]. Se han realizado estudios en los cuales una hectárea sembrada de banano produce 1,5 toneladas de material no biodegradable convirtiéndose en una problemática tanto para la industria bananera como para el ambiente (CENIBANANO Colombia), ya que su disposición se realiza sin tratamiento previo en rellenos a cielo abierto, reducción química, reutilización, reciclaje o en el peor de los casos se realiza incineración [3].

El asfalto, que es el material que se pretende modificar posee una alta complejidad química. En la actualidad el modelo que mejor describe el comportamiento del asfalto es el modelo coloidal, en el cual las partículas sólidas (los asfaltenos) están dispersos en una matriz líquida aceitosa (los maltenos)[4]. La composición del bitumen se da en términos de las cantidades relativas de las cuatro fracciones de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Corbett[5] describió que los asfaltenos funcionan como espesantes, la fluidez está dada por los saturados y los aromáticos; las resinas proveen la ductilidad de los asfaltos y los saturados y los aromáticos en combinación con los asfaltenos producen las condiciones de flujo en el asfalto.

La metodología utilizada en el proceso de modificación, acá descrito, utiliza técnicas de análisis avanzadas, que son capaces de analizar incluso nanomateriales, por ejemplo, la microscopía de fuerza atómica que evidencia la forma en que se incorpora el modificante en la matriz asfáltica, dándonos información que hasta ahora es poco común hallar en estudios de este tipo.

## OBJETIVO

El primer paso de esta investigación es considerar las bolsas de polietileno que se utilizan para el cultivo del banano como un modificador de un bitumen convencional LPI-03 (AC-30). Este artículo discute las características del modificador y la posibilidad de reutilizarlo e incorporarlo en la generación de un nuevo material, así mismo los cambios que el modificador provee al bitumen en términos de desempeño como un material apto para la construcción de carreteras.



## CARACTERIZACIÓN AVANZADA DE MATERIALES

Los ensayos para la caracterización de los materiales se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LANAMME-UCR, Universidad de Costa Rica, en colaboración con LANOTEC y Laboratorio de Polímeros INA.

El asfalto utilizado fue un asfalto AC-30 proveniente de RECOPE, Costa Rica, el cual es comúnmente utilizado para la construcción de carreteras en Costa Rica. Las bolsas de polietileno de desecho se obtuvieron por cortesía de CORBANA Costa Rica.

El experimento consistió en preparar un bitumen modificado utilizando bolsas de banano. Las bolsas se recuperaron de la plantación y se llevaron al laboratorio donde se realizó un soplado con aire para retirar las partículas sólidas de la superficie, después se cortaron con una guillotina en cuadros de aproximadamente 4 cm de lado. En el proceso de modificación, se adicionó el polietileno con una dosificación del 3% en un sistema de agitación de bajo corte a 160°C por 2 horas.

### PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

En la modificación del asfalto modificado con bolsas de banano, se observa la presencia de insecticidas (por ejemplo, clorpirifos), el proceso de modificar el betún con este material es más complejo que con las bolsas de polietileno estándar.

Las dosis grandes de clorpirifos pueden ser altamente tóxicas para los seres humanos. En consecuencia, las bolsas que se recuperaron de las bananeras y fueron llevadas al laboratorio se soplaron inicialmente con aire para eliminar las partículas sólidas unidas a la superficie. Después de eliminar las partículas sólidas, las bolsas se lavaron tres veces con tetrahidrofuran inicialmente y luego acetona para eliminar la mayor cantidad de los compuestos orgánicos como sea posible de las bolsas tratadas. Después de cada ciclo de lavado las bolsas se dejan escurrir. Los compuestos orgánicos (clorpirifos) pueden ser recuperados del disolvente por destilación simple. Un paso adicional en el proceso de tratamiento es lavar las bolsas con jabón y agua para asegurar que los restos de tetrahidrofuran se eliminen de las bolsas.

Por último, las muestras de bolsa se cortaron con una guillotina en cuadrados cuyos lados miden aproximadamente 4 cm. El tamaño recomendado de las partículas se encontró por ensayo y error, ya que se observó que se utilizan partículas grandes, algunos de los polietilenos forman cápsulas que desarrollan una corteza exterior rígida que hace difícil el proceso de mezcla con el betún (Figura 1).



Figura 1. (a) Bolsa de banana procesada (b) Encapsulamiento del polietileno

## ESPECTROMETRÍA RAMAN

La espectrometría Raman es una técnica que se obtiene generalmente de una fuente láser. Los fotones emitidos por la fuente son absorbidos por la muestra y re-emitidos a frecuencias desplazadas de la frecuencia de la fuente original (efecto Raman). La espectrometría Raman es una técnica complementaria al análisis de Espectrometría Infrarroja (FTIR), a pesar de tener ventajas teóricas sobre la anterior como por ejemplo, la facilidad de identificar sustancias que en el FTIR son difíciles de captar y sin tratamiento previo de muestra, por lo que se escogió este método para identificar la composición química de la bolsa la cual no tenía ficha técnica. Un ejemplo de un Espectrómetro Raman con Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) se muestra en la Figura 2 y la información que se puede obtener de dicho equipo se presenta en la Figura 3.

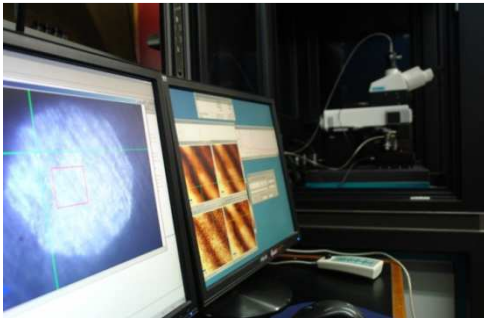


Figura 2. Espectrómetro Raman con Microscopio de Fuerza Atómica (Fuente: LanammeUCR)

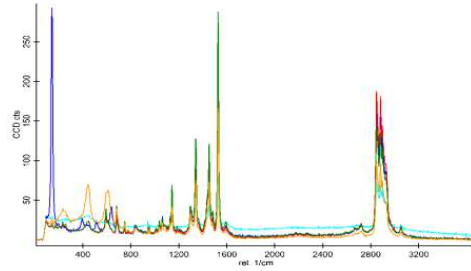


Figura 3. Espectro Raman del polímero la bolsa de banana.

En la Figura 3, se observa el espectro RAMAN típico para el grupo  $[-CH_2-CH_2-]_n$ , indicando que la bolsa es un polietileno de alta densidad. Este es el polímero más simple, las bandas más importantes son las ubicadas en el espectro a 1450  $1/cm$  y 2850-3000  $1/cm$  donde se encuentran las flexiones de los grupos  $-CH_2$  saturados a 1450  $1/cm$  y las tensiones  $-CH$  de los grupos  $-CH_2$  y  $-CH_3$  saturados a 2850-3000  $1/cm$ .

## ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

El Análisis Termogravimétrico (TGA) mide la cantidad (y tasa de cambio) en la pérdida de un material como función de temperatura, o tiempo, bajo condiciones controladas. En general, la técnica es utilizada para determinar la descomposición del material y para predecir su estabilidad térmica a temperaturas de servicio, en este caso a las temperaturas a las cuales se modifica el asfalto con la bolsa y a las temperaturas de mezclado en la planta. En la Figura 4 se muestra el equipo de TGA utilizado para realizar dicho análisis.

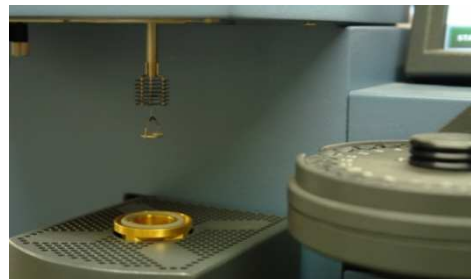


Figura 4. Equipo para Análisis Termogravimétrico (Fuente: LanammeUCR)

Se realizó un ensayo de termo gravimetría para medir los efectos de la degradación del material por calor. Los análisis obtenidos con el TGA realizado a una temperatura de 25 a 800°C muestran que el material inicia su degradación hacia los 150°C, entre esta temperatura y los 325°C se observó la pérdida de un 6.6% de algún material, que pudiesen ser productos adheridos en el proceso de exposición de la bolsa en la plantación, clorados u órgano clorados como cloropirifos, que son compuestos que restringen otro tipo de reciclaje del material. En los 450°C se presentó la degradación total, la figura 5 presenta la



curva de degradación de la muestra, la cual sigue la misma tendencia de los polietilenos evaluados con esta técnica.

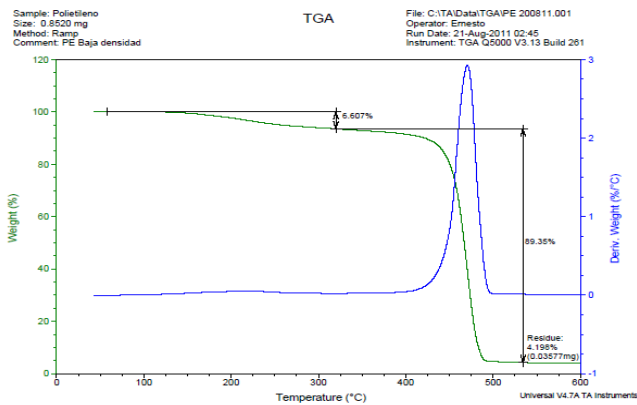


Figura 5. Análisis TGA de Bolsa de banano

### ANÁLISIS INFRARROJA DE GASES FT-IR

Con el fin de identificar el material degradado entre los 150 y 325°C en el análisis TGA, se realizó un ensayo de TGA acoplado a un Espectrómetro de gases FT-IR, con el cual se analizaron los gases producto de la degradación del polietileno. La figura 6 muestra el espectro FT-IR para el grupo  $[-CH_2-CH_2-]$  y  $CH_3$ , que son los grupos funcionales más sencillos. Las bandas más importantes son las ubicadas en el espectro a 1000  $1/cm$  y 2850-3000  $1/cm$  donde se encuentran las flexiones de los grupos  $-CH_2$  saturados a 1000  $1/cm$  y las tensiones  $-CH$  de los grupos  $-CH_2$  y  $-CH_3$  saturados a 2850-3000  $1/cm$  (figura 6). Como resultado de la descomposición, el espectro se identifica con algunos grupos clorados y clorosulfonados, los cuales también se adhieren en el proceso de fumigación de la plantación, que son los que se emiten al ambiente cuando se realiza la incineración de los polietilenos, evidenciando la presencia de insecticidas en el producto.

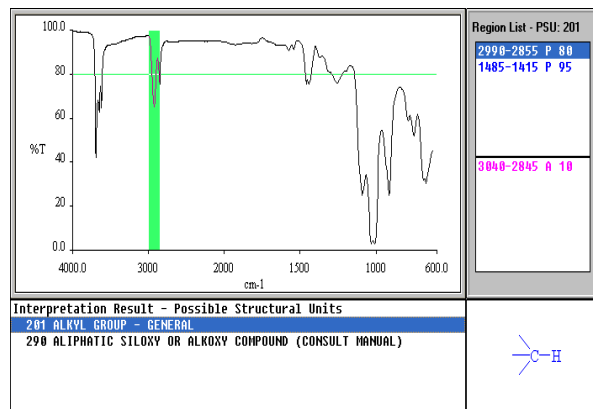


Figura 6. Espectros de los gases producidos por la descomposición de la bolsa de banano.

### BARRIDO CALORIMÉTRICO POR ESCANEEO DIFERENCIAL (DSC)

Este análisis se usa comúnmente en la determinación de las transiciones térmicas de primer orden (fusión y cristalización) y de segundo orden (transición vítrea), las cuales son de especial interés en el caso de modificantes para asfaltos [5,6].

La Figura 7 muestra el equipo que se utilizó para realizar dicho análisis y la Figura 8 muestra los resultados de dicho análisis. En la Figura 8 se muestra el análisis de Diferencial Scanner Calorimétrico (DSC) desde 25°C hasta 200°C. Se observó que el material que compone la bolsa es un polietileno de alta densidad, ya que su punto de fusión se encuentra entre los 120-136°C, aunque al principio se pensó que era de baja densidad. Se puede observar que el polímero presenta un punto de fusión, puesto que es un polímero con un alto grado de cristalinidad y con una estructura que presenta simetría, por lo que a partir de esa temperatura el material es trabajable a las condiciones de incorporación en el asfalto.



Figura 7. Equipo para Barrido Calorimétrico por Escaneo Diferencial

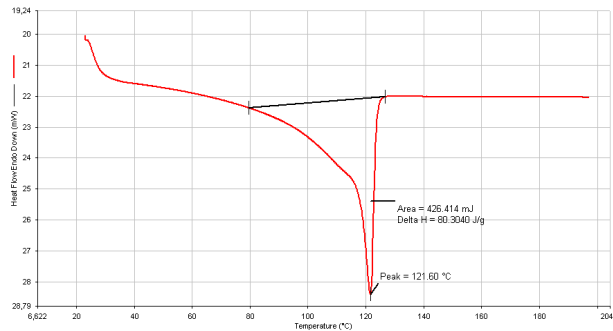


Figura 8. Análisis DSC de polímero SBS

### CROMATOGRAFÍA IATROSCAN

El equipo de cromatografía Iatroscan, permite realizar análisis SARA (Saturados-Aromáticos-Resinas-Asfaltenos). Este análisis permite determinar cuál es el porcentaje de los cuatro componentes del asfalto. Esto es de gran importancia, pues los distintos componentes determinan el comportamiento del asfalto: los Asfaltenos actúan como espesante, la fluidez se obtiene de los Saturados y los Aromáticos, las Resinas proveen la ductilidad al asfalto. Los Saturados y los Aromáticos, en conjunto con los Asfaltenos, facilitan el flujo del asfalto [7]. El análisis SARA se realizó con el equipo mostrado en la Figura 9.

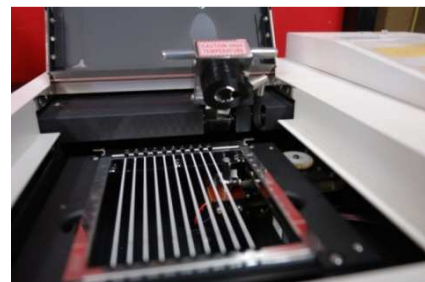


Figura 9. Equipo para Cromatografía Iatroscan (Fuente: LanammeUCR)

Los resultados de cromatografía Iatroscan indicaron que el asfalto AC-30 de RECOPE está compuesto por: Saturados 5,4%, Aromáticos 35,3%, Resinas 41,4% y Asfaltenos 17,9%.

### MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) es un método de muy alta resolución, el cual permite medir en el orden de nanómetros, lo cual es varios órdenes de magnitud superior (aproximadamente 1.000) a los microscopios de difracción óptica. El equipo que se utilizó para realizar el análisis AFM es el mismo que se presentó en la Figura 2. La Figura 10 muestra información sobre la topografía y la rugosidad de muestras del asfalto AC-30 sin modificar y modificado con bolsa de banana.

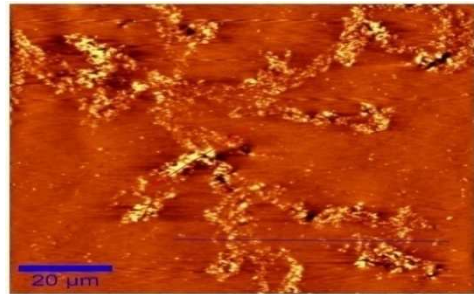
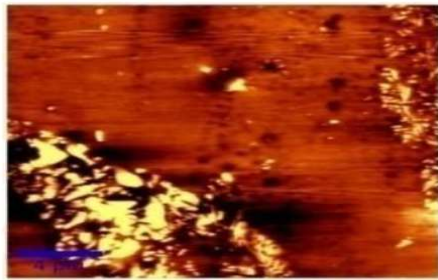


Figura 10. Topografía AFM AC-30 con bolsa de banano

### REÓMETRO DINÁMICO DE CORTANTE (DSR)

En la tabla 1 se observa y se compara el incremento en la viscosidad del asfalto AC-30 utilizado en esta investigación y las viscosidades del mismo asfalto modificado con bolsa de banano y otros polímeros comerciales, modificados y estudiados en LanammeUCR.

Tabla 1. Comparación de viscosidades de los asfaltos.

Bitumen type	Viscosity (Poises)
LPI-03 (AC-30)	2854
SBR(A)	4312
Banana Bag	5039
SDR(B)	5698
SBR(C)	5542
SBS(A)	8054
SBS(B)	6069

Sin embargo, la clasificación del asfalto según su grado de penetración, o por viscosidad, brinda información limitada de la respuesta del material bajo condiciones muy específicas y no necesariamente representativas de las condiciones a las que se someterá en campo. Esto es aún más crítico en el caso de asfaltos modificados. De tal forma, es importante realizar ensayos adicionales que permitan caracterizar desde un punto de vista reológico el desempeño esperado del material.

La Tabla 2 muestra los indicadores de desempeño definidos por Superpave® para los asfaltos.



Tabla 2. Comparación de PG de los asfaltos

<b>G*/seno &gt; 1 kPa, Original Bitumen</b>			
Test Temperature	64 °C	70 °C	76 °C
AC-30	1.78	0.89	0.47
SBR(A)	2.79	1.42	0.75
Banana Bag	3.11	1.53	0.80
SBR(B)	3.72	1.97	1.06
SBR(C)	3.00	1.52	0.81
SBS(A)	5.39	2.72	1.44
SBS(B)	3.60	2.04	1.20
<b>G*/seno ≥ 2.2 kPa, RTFO-aged Bitumen</b>			
Test Temperature	64 °C	70 °C	76 °C
AC-30	5.97	2.94	1.47
SBR(A)	9.74	4.92	2.55
Banana Bags	11.31	5.55	2.77
SBR(B)	-	-	-
SBR(C)	9.23	4.87	2.60
SBS(A)	18.80	10.02	5.24
SBS(B)	13.84	8.13	4.89
<b>G*/seno ≤ 5 MPa, PAV+RTFO-aged Bitumen</b>			
Test Temperature	Intermediate Temp. (°C)		MPa
AC-30	22		4.14
SBR(A)	22		4.60
Banana Bags	22		4.14
SBR(B)	-		-
SBR(C)	13		4.20
SBS(A)	25		4.06
SBS(B)	22		4.89

Por tanto, el desempeño del asfalto modificado también se evaluó por medio del ensayo de creep repetitivo. Los resultados de dicho análisis se muestran en la Figura 11 e indican que la capacidad de resistir la deformación plástica se incrementa considerablemente al adicionar los diferentes polímeros, evidenciando la mejora a la deformación permanente del asfalto con la bolsa de banano.

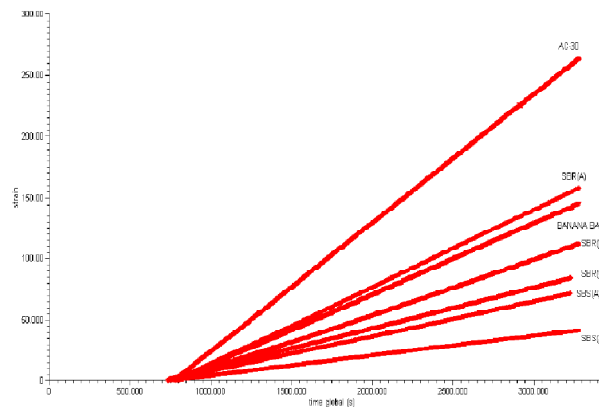


Figura 11. Comparación de creep repetitivo para diferentes asfaltos sin modificados.

Adicionalmente, se realizó el ensayo de Multiple Stress CreepRecovery o MSCR (según su denominación en inglés). Este ensayo se realiza bajo condiciones de envejecimiento en el RTFO. Los resultados de dicho análisis se presentan en la Tabla 2 e indican que al adicionar el polímero se pasa de un asfalto que no clasifica según el método (muy bajo volumen vehicular), a un asfalto capaz de soportar tráfico pesado [8].





Tabla 3. Especificaciones y análisis de resultados según MSCR

Polymer	$J_{NR@3.2KPa}$	$\frac{(J_{NR@3.2KPa} - J_{NR@0.1KPa})}{J_{NR@0.1KPa}}$	Condition
LPI-03 (AC-30)	7.344	0.22	NA
SBR (A)	3.896	0.32	Standard Traffic
BANANA BAG	3.180	0.26	Standard Traffic
SBR (C)	3.284	0.37	Standard Traffic
SBS (A)	1.575	0.26	High Traffic
SBS (B)	0.510	0.33	Very High Traffic

El análisis de fatiga se realizó a 22°C usando una frecuencia angular de 10 rad/s, en el modo de esfuerzo controlado (10%). Se encontró que la energía disipada del material modificado parece ser más estable que la del material virgen. Aunque al principio de la vida útil del material modificado se muestra menor energía disipada; después de 12.000 ciclos de la energía disipada, tanto para el virgen y el betún modificado esta es casi igual (Figura 12). Esto indica que a largo plazo, la resistencia a la fatiga de los materiales debe ser bastante similar. Esto es consistente con la información que se obtuvo de las muestras envejecidas en RTFO+PAV (Tabla 2) que indica que el  $G^* \cdot \sin(\delta)$  para ambos materiales son similares y por ende el rendimiento a fatiga también debe ser similar para ambos materiales.

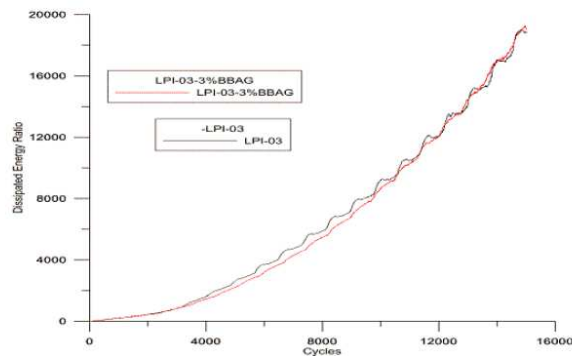


Figura 12. Energía disipada por el asfalto virgen y modificado con bolsa de banano bajo condiciones de fatiga.

## ESPECTROMETRÍA INFRARROJA DE TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

El resultado de someter la muestra a radiación infrarroja, es que alguna de la energía es absorbida por la muestra mientras que otra parte es transmitida. Por tanto, el espectro resultante, representa la absorción y transmisión molecular de la muestra y puede ser considerada como una huella digital de la misma [9]. La importancia de esto radica en que ningún par de estructuras moleculares únicas pueden producir el mismo espectro, por lo que la técnica se puede utilizar para caracterizar e identificar distintos tipos de ligantes asfálticos y modificantes de los mismos.

Adicionalmente, FTIR permite no solo identificar, sino verificar la calidad de la muestra, puesto que el espectro resultante se compara contra espectros de muestras con propiedades definidas y conocidas. El equipo se muestra en la Figura 13 y el espectro FTIR de un ligante asfáltico, y del ligante asfáltico modificado con SBS se presenta en la Figura 14.



Figura 13. Equipo para Espectrometría Infrarroja

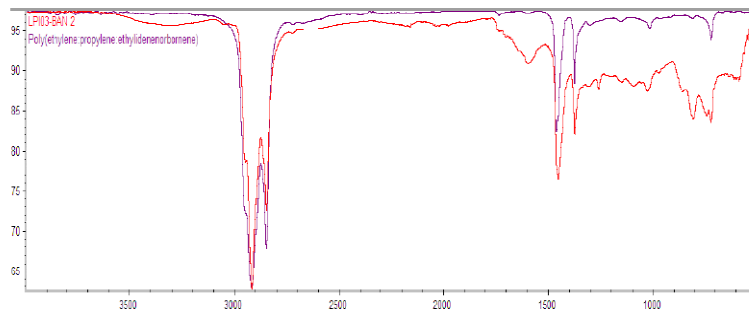


Figura 14. Espectro Infrarrojo (FTIR) para ligante asfáltico con SBS

Curiosamente, en comparación con el asfalto no modificado (Figura 14), cuando este se modifica con bolsa de banana, se observan incrementos en la intensidad de la banda  $2851-2920\text{cm}^{-1}$  de  $\text{CH}_2$ . Sin embargo, cuando los resultados se comparan con el análisis de la reología, es evidente que la viscosidad del asfalto original y modificado es significativamente diferente (77% de aumento en la viscosidad a  $60^\circ\text{C}$ ). Este hallazgo puede, en parte, atribuirse al cambio en la intensidad de  $1600\text{cm}^{-1}$  medio  $\text{C}=\text{C}$  de anillos alifáticos altamente sustituidos presentes como resinas y asfaltenos, y por consiguiente se espera que un aumento de estos componentes, esté asociado con un aumento en la respuesta viscoelástica del ligante.

## CONCLUSIONES

La bolsa de banana es un material que puede ser usado como modificador de asfalto ya que aumenta el grado de PG en  $6^\circ\text{C}$ , y reduce la deformación permanente hasta 50% en condiciones normales de tráfico de carga. Basado en lo anterior, los asfaltos modificados se pueden utilizar en las carreteras de bajo volumen o caminos sin excesivo tráfico de vehículos pesados.

En consecuencia, el documento muestra un método eficaz de no sólo mejorar el rendimiento del ligante, pero lo más importante es que tiene un efecto positivo sobre el medio ambiente. El uso de las bolsas en las carreteras en lugar del vertido del material en pozos abiertos o incineración, puede resultar en una disposición de aproximadamente 4 kg de material por metro cúbico de asfalto y la ganancia ambiental de la recuperación o eliminación de los gases tóxicos, y por consiguiente el daño a la capa de ozono y la lluvia ácida que puede producir, así como evitar la expulsión a la atmósfera de estos gases como resultado de la incineración del mismo o a las fuentes hídricas, como resultado del arrastre por la lluvia de estos insecticidas.

Las nuevas técnicas instrumentales proveen una herramienta muy poderosa para la caracterización físico-química de los materiales, identificando las propiedades de los materiales de partida (en este caso polietileno y asfalto). De igual manera permite evidenciar los cambios ocurridos en el asfalto modificado con el polímero y su interpretación ayuda a clarificar si existe una mejora significativa en las propiedades requeridas del material.

Adicionalmente, los análisis térmicos (TGA y DSC) ayudan a comparar cuáles son los polímeros que se pueden comportar mejor durante su incorporación al asfalto, y proveen información de cuál será su desempeño en servicio.

En el caso del presente estudio, se observó que el polietileno incrementó el grado PG en  $12^\circ\text{C}$ , y desde el punto de vista de resistencia al ahuecamiento, elevó las posibilidades de uso del asfalto sin modificar, de aplicaciones únicamente para caminos de bajo volumen (con pocos vehículos pesados), al de un asfalto capaz de soportar tráfico más pesado. No obstante, es importante para diversos proyectos, verificar la resistencia del asfalto a la fatiga, aunque dadas las propiedades del polímero se espera que dicho asfalto modificado también presente un incremento en su resistencia a la flexo-tracción.



En general, la principal característica que se busca del asfalto modificado, es su desempeño y su trabajabilidad a las condiciones de diseño. La metodología de análisis utilizada va en función no solo de un mejor proceso productivo de los asfaltos modificados, sino que da una explicación exhaustiva a los parámetros reológicos obtenidos, los cuales permiten predecir cómo se comportará el asfalto modificado bajo sus distintas condiciones de servicio en campo.

Este desarrollo empleado, busca disminuir el uso de técnicas y ensayos empíricos con las cuales los asfaltos modificados se han caracterizado históricamente, tratando de cuantificar y evidenciar el comportamiento de los materiales de forma reproducible, con base en las propiedades intrínsecas de los mismos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo del Laboratorio Nacional de Nanotecnología (Lanotec) de Costa Rica, el Laboratorio de Polímeros del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), y del Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ) de la Universidad de Costa Rica (UCR). También nos gustaría agradecer la revisión y las observaciones formuladas por Dr. Leslie Pineda Cedeño, Químico. Por último, damos las gracias al Ing. Roy Barrantes, Ing. Ellen Rodríguez y Jorge Salazar, Químico, por sus aportes.

### Referencias

1. McGennis, R.B.; Shuler, S.; Bahia, H.U. *Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-94-069. Washington, D.C., 1994.
2. McGennis, R.B.; Anderson, R.M.; Kennedy, T.W.; Solaimanian, M. *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-95-003. Washington, D.C., 1995.
3. West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A.; Casola, J.R. *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Board NHCPR Report 648. Washington, D.C., 2010.
4. Kuptsov, A.H. (1994). *Applications of Fourier Transform Raman Spectroscopy in Forensic Science*. Journal of Forensic Sciences, JFSCA, Vol. 39, No. 2, pp. 305-318, Marzo 1994.
5. Elseifi, M.; Mohammad, L.N.; Glover, I.; Negulescu, I.I.; Daly, W.H.; Abadie, C. *Relationship between Molecular Compositions and Rheological Properties of Neat Asphalt Binder at Low and Intermediate Temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 1288-1294, Diciembre 2010.
6. Daly, W.H.; Negulescu, I.I.; Glover, I. *A Comparative Analysis Of Modified Binders: Original Asphalts And Materials Extracted From Existing Pavements*. Federal Highway Administration Report No. FHWA/LA.10/462. Baton Rouge, LA, 2010.
7. Corbett, L.W. *Relationship between composition and physical properties of asphalt*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, pp. 481-491. 1970.
8. Mooney, K. *Current Status for Multiple Stress Creep Recovery*. North East Asphalt User / Producer Group Annual Meeting. Atlantic City, NJ, 2008.
9. Wei, J.B.; Shull, J.C.; Lee, Y.J.; Hawley, M.C. *Characterization of Asphalt Binders Based on Chemical and Physical Properties*. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, Vol. 3, No. 1, pp. 33-58, 1996.