

## EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES

Adriana Vargas-Nordbeck<sup>1</sup>, Fabricio Leiva-Villacorta<sup>2</sup>, José Pablo Aguiar-Moya<sup>3</sup>, Fabiola Miranda-Argüello<sup>4</sup>, Luis Guillermo Loría-Salazar<sup>5</sup>

<sup>1</sup>NCAT, Universidad de Auburn, Alabama, [vargaad@auburn.edu](mailto:vargaad@auburn.edu)

<sup>2</sup>NCAT, Universidad de Auburn, Alabama, [leivafa@auburn.edu](mailto:leivafa@auburn.edu)

<sup>3</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

<sup>4</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [fabiola.miranda@ucr.ac.cr](mailto:fabiola.miranda@ucr.ac.cr)

<sup>5</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

### Resumen

La susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas suele evaluarse mediante la comparación de resistencias entre especímenes secos y acondicionados, para las cuales se definen parámetros de aceptación. No obstante, existen criterios de desempeño más confiables que a su vez permiten predecir el comportamiento de la mezcla ante otros tipos de deterioros. El estudio se enfoca en la evaluación de este fenómeno mediante un análisis de componentes principales y conglomerados. Para esto, se diseñaron 12 mezclas con una misma fuente de agregados considerando tamaños máximos de 9.5 y 12.5 mm, utilizando asfalto original PG 70-22 y modificaciones con SBS, agentes antidesnudantes (antidesnudante líquido y cal hidratada) y sus combinaciones. Los resultados incluyen las razones entre especímenes secos y acondicionados de ensayos de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral, Módulo Dinámico y Flow Number. Las evaluaciones muestran que los componentes principales pueden utilizarse para estimar un rendimiento de las mezclas basado en las variables analizadas y a su vez justificar la variación en los resultados. Por su parte, el análisis de conglomerados permitió identificar características que afectan el desempeño de las mezclas, evidenciando el mejor rendimiento global para la combinación de mezclas con SBS y un aditivo mejorador de adherencia.

**Palabras Clave:** daño por humedad, componentes principales, conglomerados.

## 1 Introducción

El daño por humedad es un problema generalizado en pavimentos asfáltico que conlleva a la ocurrencia de fallas prematuras. Este tipo de daño puede ocurrir debido a una pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado, o a la difusión de humedad a través del mástic asfáltico, debilitando la estructura de la mezcla y haciéndola más susceptible a cargas cíclicas [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Agencias estatales de carreteras y expertos en asfaltos han dedicado numerosos esfuerzos durante décadas para desarrollar un método experimental en laboratorio capaz de predecir el desempeño de los pavimentos asfálticos ante el fenómeno de daño por humedad [7]. Actualmente existen muchos procedimientos que pueden ser utilizados para evaluar de manera cualitativa o cuantitativa la susceptibilidad al daño por humedad tanto en los materiales primarios (asfalto y agregados) como en la mezcla asfáltica. Sin embargo, tales métodos arrojan resultados con baja o nula correlación con los resultados de las evaluaciones en campo [8].

La metodología Superpave adoptó el método de ensayo AASHTO T283 [9], más conocido como el ensayo de Lottman Modificado, como requerimiento para la determinación de la susceptibilidad al daño por humedad, el cual a su vez corresponde al procedimiento de ensayo más utilizado para cuantificar este deterioro en mezclas asfálticas [7, 8]. No obstante, se trata de un procedimiento empírico desarrollado para condiciones que difieren significativamente a las condiciones de campo pues el protocolo de carga se basa en la aplicación de un esfuerzo estático, el cual es un parámetro que no es posible asociarlo directamente con el diseño del pavimentos para determinar si su desempeño en campo será aceptable. Por tanto, este criterio genera falsos positivos o negativos en la predicción del daño por humedad [7].

Los ensayos de desempeño han demostrado ser una alternativa eficiente para la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas [10, 11, 12, 13]. Al igual que para el ensayo AASHTO T283, la evaluación de la resistencia al daño por humedad se basa en la comparación de los resultados de los ensayos de Resistencia a la Tensión Diametral (RTD), Módulo Dinámico ( $E^*$ ) y Flow Number (FN) en especímenes acondicionados respecto a especímenes secos. Adicionalmente, la realización de múltiples ciclos de acondicionamiento permite obtener resultados que simulan de forma más precisa el desempeño en campo de los pavimentos asfálticos [13].

La realización de ensayos de desempeño como metodología de evaluación de daño por humedad permite a su vez estudiar el comportamiento del material mediante el análisis de parámetros de resistencia a la tensión, módulo dinámico y flow number. Para ello es posible recurrir a métodos estadísticos de análisis multivariante, tales como análisis de componentes principales y análisis de conglomerados (*clusters*), los cuales corresponden a herramientas prácticas de evaluación de desempeño de mezclas utilizando bases de datos robustas.

## 2 Objetivos

El objetivo del estudio consiste en desarrollar una evaluación exhaustiva de la susceptibilidad al daño por humedad de diferentes mezclas asfálticas mediante un análisis de componentes principales y conglomerados. Para ello se utilizará una base de datos que comprende resultados de ensayos de Resistencia a la Tensión Diametral, Módulo Dinámico y Flow Number para especímenes acondicionados y sin acondicionamiento.

## 3 Metodología

### 3.1 Diseño de mezcla

El proyecto abarca el diseño de 12 mezclas asfálticas a partir de una fuente de agregados para dos tamaños máximos nominal (TMN) de 9.5 y 12.5 mm y un asfalto base PG 70-22. Los tratamientos para cada tamaño comprenden una mezcla control, mezcla con asfalto modificado

con 2% de SBS, mezcla con asfalto modificado con 0.5% de antidesnudente líquido (ADL), mezcla con asfalto modificado mediante la combinación de 2% de SBS y 0.5% de ADL, mezcla con 1% de cal y mezcla modificada con la combinación de 2% de SBS y 1% de cal. Los porcentajes de SBS y ADL se dosifican sobre el peso total del ligante. La Tabla 1 presenta las configuraciones granulométricas de los agregados para los dos tamaños máximos utilizados y la Tabla 2 muestra los resultados de las propiedades volumétricas de las mezclas en estudio.

Tabla 1. Configuraciones granulométricas de los agregados

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	% Pasando TMN 9.5 mm	% Pasando TMN 9.5 mm
3/4"	19.0	100.0	100.0
1/2"	12.5	100.0	95.4
3/8"	9.5	95.0	78.3
Nº 4	4.75	60.0	43.3
Nº 8	2.38	40.0	28.9
Nº 16	1.18	25.0	20.0
Nº 30	0.6	17.0	14.8
Nº 50	0.3	10.0	10.9
Nº 100	0.15	7.0	8.0
Nº 200	0.075	5.0	5.8

Tabla 2. Propiedades volumétricas de las mezclas

Mezcla	% Asfalto PTM	% VMA	%VFA	Polvo/Asfalto
9.5 Control	6.5	15.5	73.7	1.0
9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
9.5 ADL	6.5	15.9	72.7	1.0
9.5 SBS + ADL	6.3	15.4	72.9	1.0
9.5 Cal	6.7	16.3	74.4	0.9
9.5 SBS + Cal	6.6	16.0	74.4	1.0
12.5 Control	7.0	15.8	74.5	1.1
12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
12.5 ADL	6.5	14.7	72.7	1.2
12.5 SBS + ADL	5.9	13.1	69.9	1.5
12.5 Cal	6.0	14.0	71.5	1.3
12.5 SBS + Cal	6.3	14.3	72.0	1.3

### 3.2 Procedimientos de laboratorio

Para cada una de las mezclas diseñadas se realizó el ensayo de RTD, E\* y FN tanto en especímenes secos (sin condicionamiento) y en especímenes acondicionados a 6 ciclos de hielo y deshielo (*freeze/thaw*) simulando condiciones agresivas en campo. Un ciclo de hielo y deshielo consiste en someter a un espécimen saturado en un rango de 70 a 80 % a un período de congelamiento de al menos 16 horas a -18 °C seguido por un período de 24 horas de sumersión en un baño de agua a 60 °C.

Los ensayos de E\* y FN fueron realizados de acuerdo a la norma AASHTO TP 79 [14]. El análisis desarrollado considera las mediciones de E\* a una temperatura de 20 °C y a una frecuencia de 10 Hz, asociado a condiciones típicas de operación del tránsito.

## 4 Análisis de resultados

### 4.1 Resistencia a la Tensión

La Figura 1 muestra los valores promedio de resistencia a la tensión obtenidos para todas las mezclas de análisis. En general las mezclas con contenidos de SBS desarrollan mayor resistencia a la tensión. Adicionalmente, se evidencia la necesidad de la incorporación de ADL o cal (agentes antidesnudantes) para evitar caídas abruptas de resistencia posterior a los 6 ciclos de acondicionamiento.

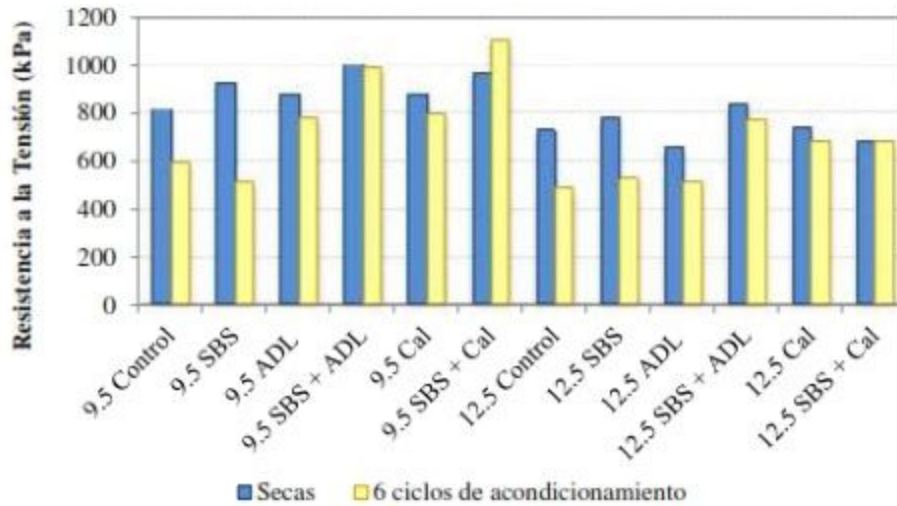


Figura 1 Resistencia a la Tensión Promedio

### 4.2 Módulo Dinámico

La Figura 2 muestra los módulos promedio de todas las muestras analizadas. Se observa una tendencia similar a la mostrada en la Figura 1. Sin embargo, en este caso las diferencias entre los módulos de especímenes secos y acondicionadores son menores, especialmente en mezclas que no incorporan agentes antidesnudantes.

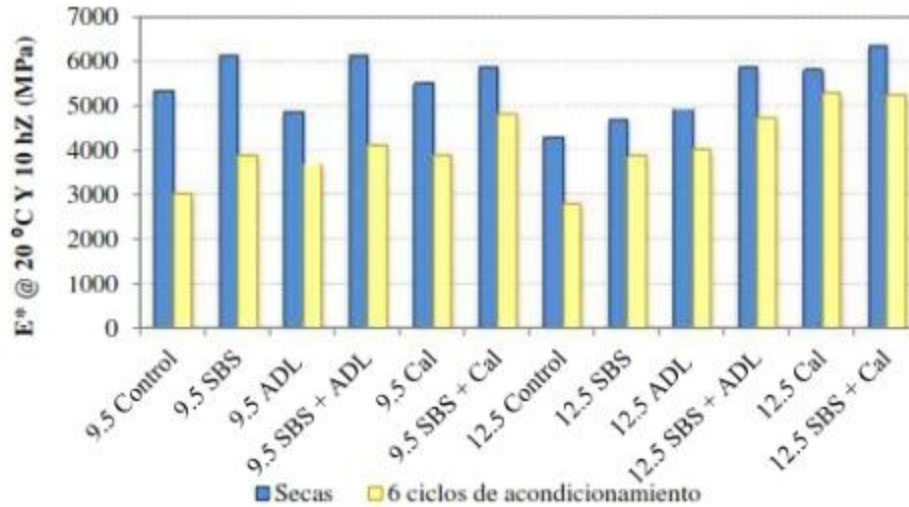


Figura 2 Módulo Dinámico Promedio a 20 °C y 1 Hz

#### 4.3 Flow Number

La Figura 3 presenta los resultados promedio de FN. Se identifica que las mezclas modificadas con SBS tienden a presentar una mayor resistencia a la deformación. No obstante, se requiere de la inclusión de agentes antidesnudantes para mantener un desempeño similar a los tratamientos sin acondicionamiento. Por otra parte, se identifica una mayor variabilidad de los resultados obtenidos de FN respecto a los ensayos de RTD y E\*.

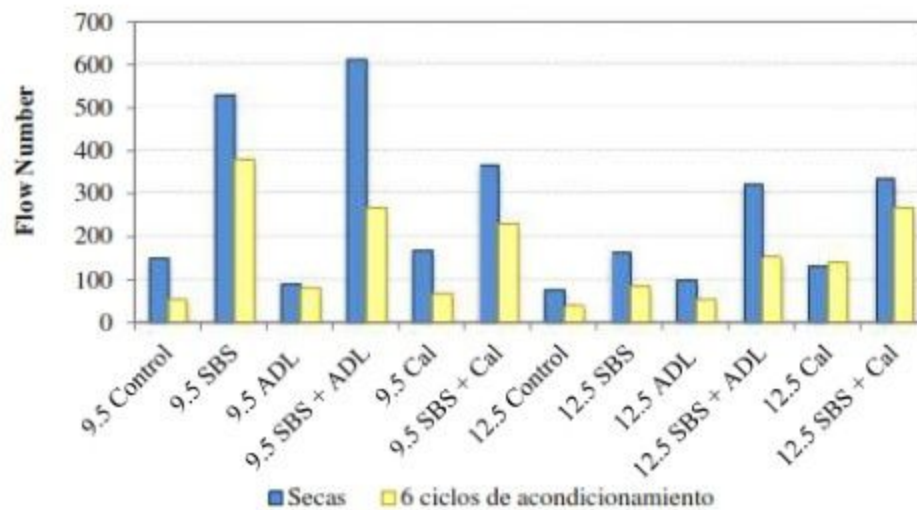


Figura 3 Flow Number Promedio

La Figura 4 resume las razones entre especímenes acondicionados y especímenes secos para los tres ensayos de desempeño. Los resultados son altamente variables y definen diferentes razones de aceptación o rechazo de mezclas en función de tipo de ensayo. En general, es posible observar un incremento en la resistencia a la humedad mediante la inclusión de agentes antidesnudantes. Por otra parte, los resultados mostrados corresponden a relaciones y por tanto

no consideran los resultados específicos de las propiedades evaluadas, los cuales inciden directamente en el desempeño de la mezcla. A modo de ejemplo, la razón obtenida en el ensayo de FN para la mezcla 9.5 ADL es de 0.91, lo cual implica que el material no se deteriora significativamente posterior a los 6 ciclos de acondicionamiento. No obstante, el resultado puntual de FN para ambas condiciones (seco y acondicionado) se encuentra por debajo de 100 ciclos para la falla, lo cual implica que dicha mezcla presenta una alta susceptibilidad a la deformación en comparación con las otras mezclas del estudio.

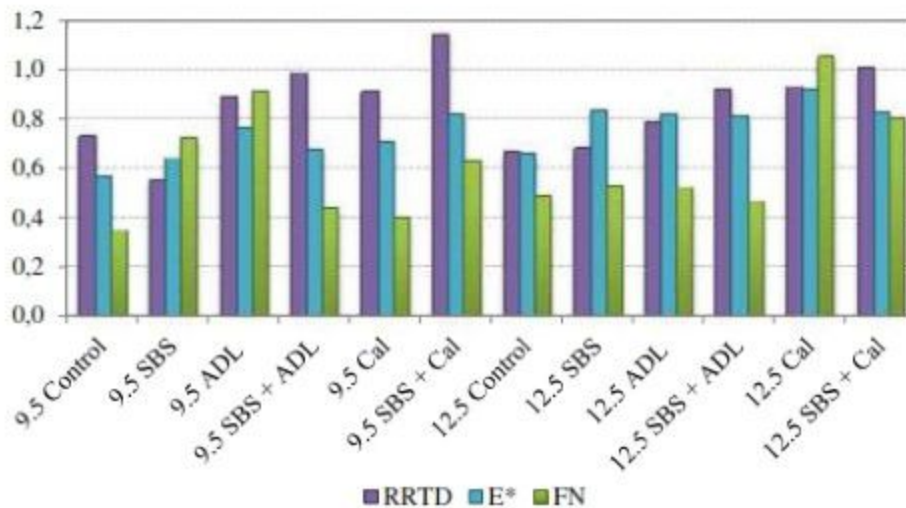


Figura 4 Razones entre especímenes secos y especímenes acondicionados

El análisis de componentes principales y de conglomerados permite integrar los resultados para generar una evaluación exhaustiva e identificar grupos de mezclas basados en su desempeño medido en laboratorio, de modo que sea posible seleccionar una mezcla en función de los requerimientos del proyecto.

#### 4.4 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es un procedimiento que busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados, convirtiendo un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas componentes principales [15]. El ACP busca reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos y mejorar la interpretación de los mismos.

En el presente estudio se incluyeron seis variables por cada tipo de mezcla, a saber: RTD secos y acondicionados ( $RTD_{seco}$ ,  $RTD_{acond}$ ), MD secos y acondicionados ( $E^*_{seco}$ ,  $E^*_{acond}$ ) y FN secos y acondicionados ( $FN_{seco}$ ,  $FN_{acond}$ ). La Tabla 3 presenta los valores característicos y la variación de la proporción explicada mediante componentes principales. El valor característico manifiesta la varianza estimada del respectivo componente principal. Se observa que los primeros tres componentes representan el 95.6% de la variación, por tanto, la evaluación considerará únicamente a estos tres componentes.

Tabla 3. Descomposición de la varianza

Componente principal	Valor Característico	Proporción	Acumulado
1	3.649	0.608	0.608
2	1.229	0.205	0.813
3	0.860	0.143	0.956
4	0.131	0.022	0.978
5	0.089	0.015	0.993
6	0.042	0.007	1.000

La Tabla 4 muestra los coeficientes de los tres componentes principales. Se puede observar que el primer componente (PC1) posee una alta correlación con las variables  $E^*_{seco}$  y  $FN_{seco}$ . El segundo componente (PC2) correlaciona prioritariamente con  $RTD_{seco}$  y  $E^*_{acond}$ . Y finalmente el tercer componente (PC3) se encuentra correlacionado con mayor fuerza con la variable  $RTD_{acond}$ . El signo positivo del coeficiente indica que el componente principal aumenta conforme la variable aumenta, mientras que el signo negativo indica que componente principal aumenta conforme la variable se reduce.

Tabla 4. Coeficientes de Componentes Principales

Variable	PC1	PC2	PC3
1 - $RTD_{seco}$	0.352	0.645	0.025
2 - $RTD_{acond}$	0.352	0.330	0.676
3 - $E^*_{seco}$	0.471	-0.285	-0.019
4 - $E^*_{acond}$	0.310	-0.600	0.456
5 - $FN_{seco}$	0.473	0.099	-0.380
2 - $FN_{acond}$	0.458	-0.153	-0.435

Los puntajes asociados a los componentes principales para cada mezcla asfáltica son calculados a partir de la siguiente expresión.

$$Y_i = a_{1i} X_1 + a_{2i} X_2 + a_{3i} X_3 + a_{4i} X_4 + a_{5i} X_5 + a_{6i} X_6 \quad (1)$$

Donde:

$Y_i$  = i – ésimo componente principal ( $i = 1, 2, 3$ )

$X_p$  = variable ( $p = 1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$ )

$a_{ip}$  = coeficientes de combinaciones lineales de la Tabla 4

Por ejemplo, la puntuación obtenida para el primer componente principal está dada por:

$$Y_1 = 0.352 RTD_{seco} + 0.352 RTD_{acond} + 0.471 E^*_{seco} + 0.310 E^*_{acond} + 0.473 FN_{seco} + 0.458 FN_{acond} \quad (2)$$

El rendimiento general  $Y$  puede ser calculado como la ponderación del valor utilizando las proporciones de la Tabla 3, según se muestra a continuación:

$$Y_1 = 0.608 Y_1 + 0.205 Y_2 + 0.143 Y_3 \quad (3)$$

En la Tabla 5 se presentan las puntuaciones de los componentes principales y sus rendimientos. A modo general se observa que las mezclas modificadas con SBS exhiben un mejor desempeño (altos valores de  $Y$ ), especialmente si se incluye un agente antidesnudante.

Tabla 5. Puntaciones y Rendimiento de los Componentes Principales

Mezcla	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y
9.5 Control	-1.416	0.757	-0.396	-0.762
9.5 SBS	2.045	-0.017	-2.266	0.916
9.5 ADL	-1.016	1.040	0.685	-0.307
9.5 SBS + ADL	2.971	1.270	-0.207	2.037
9.5 Cal	-0.312	0.698	0.721	0.057
9.5 SBS + Cal	2.368	0.760	1.255	1.775
12.5 Control	-2.997	0.662	-0.665	-1.782
12.5 SBS	-1.641	0.004	-0.271	-1.036
12.5 ADL	-2.110	-0.905	-0.015	-1.470
12.5 SBS + ADL	0.878	-0.374	0.437	0.520
12.5 Cal	0.011	-1.628	0.906	-0.198
12.5 SBS + Cal	1.219	-2.267	-0.185	0.250

#### 4.5 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados consiste en el agrupamiento de objetos en clases con características homogéneas a nivel de grupo y heterogéneos entre ellos [15]. Existen múltiples métodos para cuantificar la similitud entre objetos, así como algoritmos para la selección de objetos dentro de grupos. En el presente análisis se utilizó como medida de similitud la Distancia Euclidiana y el Método de Ward para la creación de los grupos. Se seleccionó un máximo de tres conglomerados de modo que exista más de un objeto de cada grupo.

La Tabla 6 muestra las asignaciones de las mezclas en conglomerados, así como su clasificación de acuerdo al análisis de componentes principales. Los resultados obtenidos producto del análisis de conglomerados son consistentes respecto al análisis de componentes principales. El dendograma mostrado en la

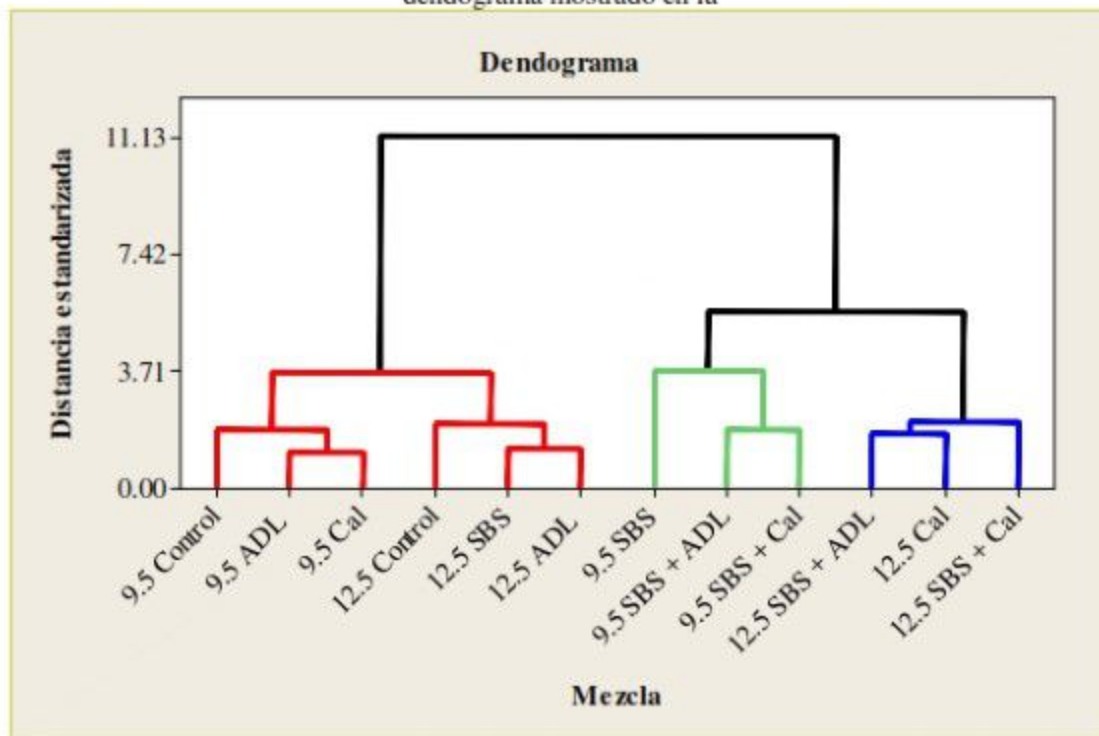


Figura 5 representa visualmente cómo las mezclas fueron combinadas utilizando las mismas variables que las consideradas en el análisis de componentes principales.



Tabla 6. Clasificaciones de mezclas y distribución de conglomerados

Mezcla	Clasificación	Conglomerado
9.5 Control	1	2
9.5 SBS	2	2
9.5 ADL	3	2
9.5 SBS + ADL	4	3
9.5 Cal	5	3
9.5 SBS + Cal	6	1
12.5 Control	7	3
12.5 SBS	8	1
12.5 ADL	9	1
12.5 SBS + ADL	10	1
12.5 Cal	11	1
12.5 SBS + Cal	12	1

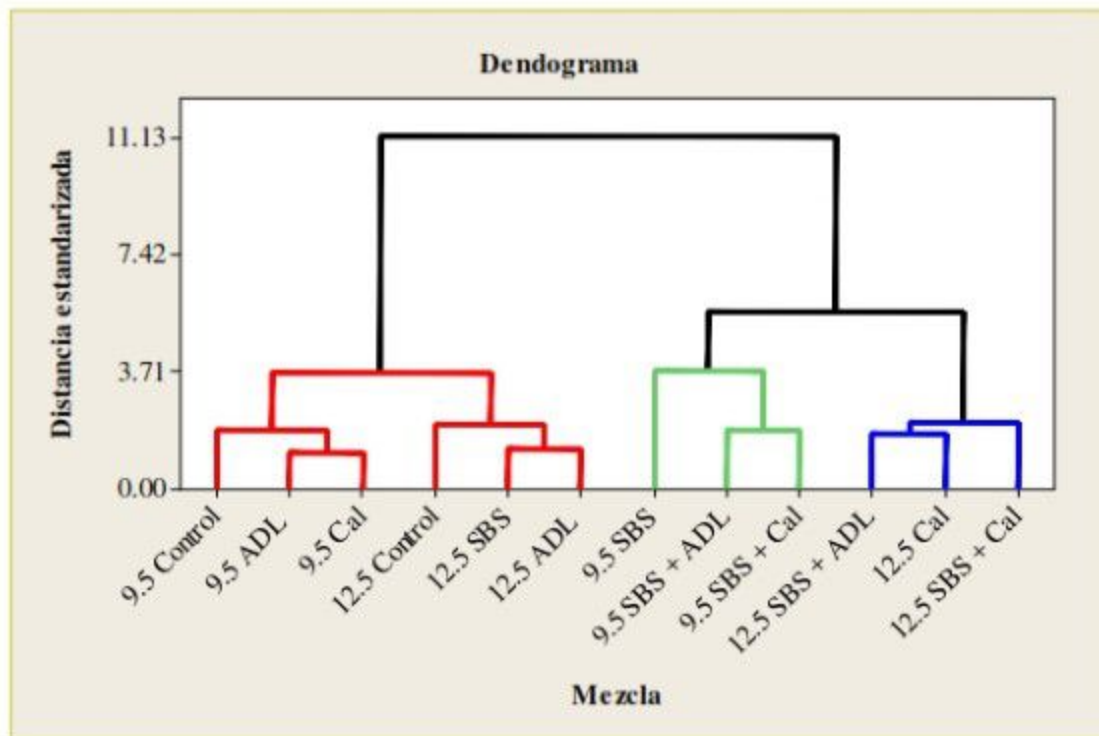


Figura 5 Dendrograma de desempeño de las mezclas

El resumen de las propiedades de cada uno de los conglomerados se presenta en la Tabla 7 y Tabla 8. El primer conglomerado contiene valores intermedios de RTD en condición seca, pero presenta las mayores reducciones para este parámetro posterior al acondicionamiento. Adicionalmente incluye las menores magnitudes de  $E^*$  y FN en ambas condiciones (seco y acondicionado). Por tanto, las mezclas contenidas en este grupo pueden ser clasificadas como de bajo desempeño. Dentro de este conglomerado se agrupan las mezclas control de ambos tamaños nominales, una mezcla con asfalto modificado con SBS y cerca de la mitad corresponden a mezclas con algún agente antidesnudante. Este primer grupo no incluye mezclas que combinan SBS con agentes antidesnudantes.

El segundo conglomerado presenta los mayores resultados de RTD y FN. A pesar que presenta también el mayor valor de  $E^*$ , incluye a su vez la mayor caída de  $E^*$  posterior al acondicionamiento. Este grupo contiene únicamente mezclas de TMN de 9.5 mm, incluyendo la mezcla con SBS y la combinación de SBS con cal y SBS con ADL. Este conglomerado es considerado como el de mejor desempeño.

Finalmente, el tercer conglomerado presenta valores intermedios de los ensayos de desempeño en la condición seca, no obstante contiene la menor afectación a dichas variables posterior al acondicionamiento. Este grupo contiene únicamente mezclas de TMN de 12.5 mm, incluyendo la mezcla con cal y la combinación de SBS con cal y SBS con ADL. Con base en los resultados anteriores se clasifican como mezclas con desempeño intermedio.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los conglomerados

Variable	Conglomerado 1, n=6		Conglomerado 2, n=3		Conglomerado 3, n=3	
	Promedio	Des. Est	Promedio	Des. Est	Promedio	Des. Est
RTD <sub>seco</sub>	787.0	86.8	963.4	39.0	750.3	81.0
RTD <sub>acond</sub>	614.5	138.2	865.7	314.6	701.1	61.9
$E^*$ <sub>seco</sub>	4915.2	448.1	6030.0	138.6	5990.8	303.6
$E^*$ <sub>acond</sub>	3538.5	509.1	4273.4	473.4	5084.9	323.6
FN <sub>seco</sub>	122.3	40.1	501.3	125.0	261.0	113.6
FN <sub>acond</sub>	61.1	18.2	291.4	78.9	183.4	70.3

Tabla 8. Características de las mezclas de cada conglomerado

Característica de la mezcla	Conglomerado 1	Conglomerado 2	Conglomerado 3
TMN	9.5 mm y 12.5 mm	9.5 mm	12.5 mm
Asfalto	Original y Modificado con SBS	Modificado con SBS	Original y Modificado con SBS
Agentes antidesnudantes adicionados	Ninguno, ADL y cal	Ninguno, ADL y cal	ADL y cal
Combina polímero con agentes antidesnudantes	No	Sí	Sí

## 5 Conclusiones

El objetivo del estudio consistió en desarrollar una evaluación exhaustiva del desempeño al daño por humedad en mezclas asfálticas mediante herramientas de análisis multivariable. Con base en los resultados mostrados anteriormente, se presentan las siguientes conclusiones:

Los protocolos de ensayo basados en la comparación del desempeño en especímenes secos y acondicionados pueden ser utilizados para definir criterios de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas asociadas al fenómeno de daño por humedad. No obstante, deben definirse diferentes razones en función del ensayo utilizado.

El análisis de componentes principales indicó que tres componentes principales (combinaciones lineales de variables) explican más del 95 % de la variación en los resultados. El primer componente principal, el cual comprende aproximadamente al 61 % de la variación, presenta una alta correlación con las variables de  $E^*$ <sub>seco</sub>, FN<sub>seco</sub> y FN<sub>acond</sub>.

El rendimiento del desempeño de cada una de las mezclas puede ser obtenido como una ponderación utilizando los componentes principales seleccionados. Estas puntuaciones indican una clasificación de la mezcla en términos de desempeño con base en las seis variables diferentes de análisis.

El análisis de conglomerados identificó tres grupos de mezclas de acuerdo a su desempeño. Los grupos 2 y 3 considerados como de alto y medio desempeño, respectivamente, incluyen

mezclas modificadas con SBS y/o agentes antidesnudantes. Las mezclas que contienen SBS y agentes antidesnudantes fueron clasificadas como mezclas de alto desempeño.

En general, las mezclas incluidas en el conglomerado de mejor desempeño comprenden los mayores promedios de las variables consideradas (a excepción del valor de  $E^*_{acond}$ ). Sin embargo, este grupo no comprende necesariamente las mejores relaciones entre especímenes acondicionados respecto a especímenes secos.

## 6 Recomendaciones

La evaluación realizada en el presente estudio basado en técnicas de análisis multivariante corresponde a un buen criterio para la clasificación de mezclas de acuerdo a su desempeño. Las mezclas utilizadas comprenden dos configuraciones granulométricas, cada una de ellas con seis variaciones de asfalto, y por tanto con propiedades volumétricas similares. Por tanto, el presente análisis puede ser ampliado mediante la incorporación de mayor cantidad de mezclas con diferentes materiales y granulometrías, de modo que sea posible incorporar propiedades volumétricas como variables que influyen en el desempeño de la mezcla. Adicionalmente se recomienda validar la información presentada mediante la verificación del desempeño en campo.

## 7 Referencias

- [1] Hicks, R. G. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1991.
- [2] Hicks, R. Gray, Santucci, L. y Aschenbrener, T. *Introduction and Seminar Objectives*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [3] Lu, Q. y Harvey, J.T. *Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods*. Research Report No. UCPRC-RR-2005-15, University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley, 2005.
- [4] Little, D. N. y Jones, D. R. *Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [5] Howard, I. L., Gallivan, V. y Huber, G. *Workshop Introduction*. Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198. 2012.
- [6] Aguiar, J.P., Salazar, J., Baldi A., Leiva F., y Loria L. *Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures with the Use of Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 21505, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2015, pp. 57-65.
- [7] Solaimanian, M., Harvey J., Tahmoressi, M. y Tandon V. *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [8] Hand, A. *Testing for Moisture Damage in the Laboratory*. Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198. 2012.
- [9] AASHTO T 283. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [10] Solaimanian, M., Bonaquist, R. y Tandon, V. *Improved Conditioning and Testing Procedures for HMA Moisture Susceptibility*. NCHRP Report 589, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
- [11] Solaimanian, M., Fedor, D., Bonaquist, R., Soltani, A., y Tandon V. Simple Performance Test for Moisture Damage Prediction in Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, 2006, pp. 345-380.
- [12] Nadkarni, A. A., Kaloush, K. E., Zeiada, W.A. y Biligiri K. P. Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2127, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2009, pp. 29-35.
- [13] Vargas, A., Leiva F., Aguiar J. P. y Loria L. G.. Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple Performance Tests. In *Transportation Research Record: Journal of*

*the Transportation Research Board*, No. 2575, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2016, pp. 70-78. DOI: 10.3141/2575-08.

[14] AASHTO TP 79. *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[15] Johnson, R. A. y Wichern D. W. *Applied multivariate statistical analysis*. Essex: Pearson Education Limited, 2014.