

Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía del occidente de la sabana de Bogotá

JORGE ARTURO PINEDA-JAIMES¹
CAROL ANDREA MURILLO-FEO²
JULIO ESTEBAN COLMENARES³

RESUMEN

Se presentan los resultados de una investigación descriptiva que buscó establecer relaciones entre el tipo, la naturaleza y las características de varias patologías identificadas en estructuras de pavimento flexible y las especies vegetales presentes en inmediaciones de tres tramos viales deteriorados apoyados sobre subrasantes arcillosas, entre Siberia y Tenjo, al occidente de la sabana de Bogotá. Los materiales arcillosos presentan cambios volumétricos asociados a la acción de las raíces de las especies vegetales, las cuales han inducido pérdidas de agua e incrementos en la succión del agua intersticial presente en estos, lo que causa deformaciones irreversibles en las vías afectadas. Esta problemática ha generado la disminución de la capacidad de servicio de las vías, y se ha convertido en un factor negativo de alto impacto para el desarrollo de las comunidades de la zona en cuestión. Se realizó un levantamiento detallado de los tipos de patologías presentes empleando el manual de daños de la metodología PCI y, simultáneamente, se caracterizaron en detalle los árboles presentes, considerando su localización relativa con respecto a los tramos viales analizados. Se confeccionaron diagramas de frecuencia en los cuales se correlacionó el tipo, número y tamaño de las especies vegetales con el número y tipo de patologías, con el fin de realizar inferencias acerca de las tendencias identificadas. Se encontró que el número de daños presentes asociados a la acción de las especies vegetales guarda proporcionalidad con el tamaño de las especies y el consumo de agua de estas, independientemente del origen de los árboles identificados.

Palabras clave: desecación, especies vegetales, patologías, pavimentos flexibles, succión matricial.

¹ Docente investigador, Maestría en Infraestructura Vial, Universidad Santo Tomás, Bogotá. Docente asistente de cátedra, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: jpinedaj@unal.edu.co, jorgepineda@usantotomas.edu.co

² Docente asociada, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: camurillof@unal.edu.co

³ Docente titular, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: jecolmenaresm@unal.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 11 DE DICIEMBRE DE 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 30 DE MARZO DE 2015

Cómo citar este artículo: Pineda-Jaimes, J. A., Murillo-Feo, C. A., Colmenares, J. E. (2015). Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía del occidente de la sabana de Bogotá. *Epsilon*, (25), 39-68.

Characterization of Pathologies Associated with the Action of Plant Species in a Road West of the Sabana de Bogotá

ABSTRACT

This paper presents the results of a descriptive research seeking to establish links between the type, nature and characteristics of different pathologies identified in flexible pavement structures and plants species found in the immediate vicinity of three deteriorated road sections resting on clayey subgrades between Siberia and the Tenjo municipality, west of the *Sabana de Bogotá*. Clayey materials have volumetric changes associated with the actions of the roots of plant species, leading to water losses and increases in pore-water, causing irreversible deformations in the affected roads. This problem has decreased the service level of the roads, thus becoming a negative, high impact factor for the development of the communities in this area. A detailed survey of the types of pathologies present was made, using the PCI manual on damages. At the same time, the trees present were characterized in detail, considering their relative location with respect to the road sections analyzed. Frequency diagrams were prepared, correlating the type, number and size of plant species with the number and type of pathologies, in order to make inferences about the identified trends. It was found that the number of damages associated with the action of plant species is proportional to the size of the species and their water consumption, regardless of the origin of the identified trees.

Keywords: flexible pavements, drainage, plant species, pathologies, matrix suction.

Caracterização de patologias associadas à ação de espécies vegetais em uma estrada do ocidente da savana de Bogotá

RESUMO

Apresentam-se os resultados de uma pesquisa descritiva que procurou estabelecer relações entre o tipo, a natureza e as características de várias patologias identificadas em estruturas de pavimento flexível e as espécies vegetais presentes em imediações de três trechos rodoviários deteriorados apoiados sobre subleitos argilosos, entre Siberia e o município de Tenjo, no ocidente da savana de Bogotá. Os materiais argilosos apresentam mudanças volumétricas associadas à ação das raízes das espécies vegetais, as quais têm induzido perdas de água e aumentos na sucção da água intersticial presente nos mesmos; causando deformações irreversíveis nas rodovias e caminhos afetados. Esta problemática tem gerado a diminuição do nível de serviço das rodovias, transformando-se em um fator negativo de alto impacto para o desenvolvimento das comunidades da zona em questão. Realizou-se um levantamento detalhado dos tipos de patologias presentes empregando o manual de danos da metodologia PCI e, simultaneamente, se caracterizaram em detalhe as árvores presentes considerando sua localização relativa com respeito aos trechos viários analisados. Confeccionaram-se diagramas de frequência nos quais se correlacionou o tipo, número e tamanho das espécies vegetais com o número e tipo de patologias, a fim de realizar inferências acerca das tendências identificadas. Viu-se que o número de danos presentes associados à ação das espécies vegetais guarda proporcionalidade com o tamanho das espécies e o consumo de água das mesmas, independentemente da origem dos árvores identificados.

Palavras chave: pavimentos flexíveis, dessecação, espécies vegetais, patologias, sucção matricial.

Introducción

Este artículo estudia las patologías que se presentan en estructuras de pavimento flexible, apoyadas en subrasantes arcillosas, causadas específicamente por los procesos de equilibrio de humedad originados por el sistema radicular de especies vegetales y los consecuentes cambios volumétricos de estas arcillas. El tópico es relevante para la zona occidental de la sabana de Bogotá, debido a que la acción de la vegetación ha sido identificada por diferentes autores como una de las principales causas del deterioro de vías y estructuras livianas (Vesga, Caicedo y Mesa, 2002; Pineda, Colmenares, Martínez y Rodríguez, 2003; Rueda y Pineda, 2011; Rueda, 2012; Pineda-Jaimes et al., 2013), por su contribución con el desarrollo de deformaciones y agrietamientos causados por el fenómeno de desecación que tienen lugar en esa región.

La problemática específica que se aborda en este trabajo corresponde al deterioro de estructuras de pavimento generado por las diferentes especies vegetales que se localizan en inmediaciones de un tramo vial de la carretera Siberia-Tenjo y sus relaciones de causalidad. De manera general, el proceso de deterioro es el siguiente: en periodos secos, las especies vegetales absorben el agua libre presente en el subsuelo arcilloso que conforma la subrasante, mediante su sistema radicular y la acción combinada de procesos de fotosíntesis y evapotranspiración; el suelo, a su vez, pierde volumen y se contrae, lo que origina en ciertos casos grietas que comprometen la continuidad del medio y que generan las patologías asociadas a la deformación excesiva de las capas granulares y el deterioro posterior de la carpeta asfáltica, con la consecuente disminución del servicio de las vías.

Aunque pueden producirse procesos de infiltración posteriores, las contracciones volumétricas asociadas a procesos de pérdida de agua que ya han tenido lugar son irreversibles y las expansiones volumétricas diferenciales (causadas por los procesos de ganancia de humedad estacionales) contribuyen a la continuación de los procesos de deterioro (Randrup, McPherson y Costello, 2001; Rueda y Pineda, 2011). En la figura 1 se presenta una de las patologías típicas asociadas a la problemática mencionada. Allí se evidencia un hundimiento apreciable de la superficie de rodadura, asociado a la presencia de especies arbóreas adyacentes a la vía.



Figura 1. Deterioros en superficie asociados a la acción de barreras vivas, vía Siberia-Tenjo

Nota: la línea punteada delimita el área afectada por una fisura longitudinal y una depresión causada por la acción de los árboles adyacentes a la vía.

Fuente: adaptado de Rueda y Pineda (2011).

Para este trabajo, se analizaron tres tramos de la carretera Siberia-Tenjo, en una longitud total acumulada de 2400 m. En esta carretera, la comunidad de la zona ha referenciado deterioros notables de la superficie de rodadura y drásticas disminuciones de la capacidad de servicio de las vías, a causa de la ausencia de obras de drenaje superficial y la acción de las raíces de los árboles.

En el desarrollo de este trabajo, se clasificó la vegetación existente alrededor de la estructura de pavimento, y se determinó el grado de afectación de esta cualificando y cuantificando las patologías presentes, mediante el manual de daños del sistema PCI (*Pavement Condition Index*), presentado en la literatura especializada. Algunos autores como Vesga, Caicedo y Mesa (2002) mencionan que las especies foráneas, no endémicas de la región, contribuyen a acentuar más el deterioro del tramo en cuestión debido a que tienen un mayor consumo de agua necesario para su supervivencia, lo que se manifiesta con la profundización del sistema radicular y el avance de las grietas en el subsuelo. Este aspecto trató de valorarse indirectamente a partir de la identificación de las especies y las inferencias con la magnitud de las deformaciones medidas en superficie.

Las observaciones se realizaron en tres tramos seleccionados en la vía Tenjo-Siberia, cuya elección radicó principalmente en la presencia de especies vegetales adyacentes a la carretera en distancias no mayores a 5 m desde el borde del pavimento de la vía, junto con la evidente presencia de deformaciones considerables de la

estructura de pavimento (Gomez y Pérez, 2012). La figura 2 presenta la localización de los tramos estudiados y la tabla 1 presenta las abscisas correspondientes, con el cero relativo a la salida de Tenjo en una estación de venta de combustible.

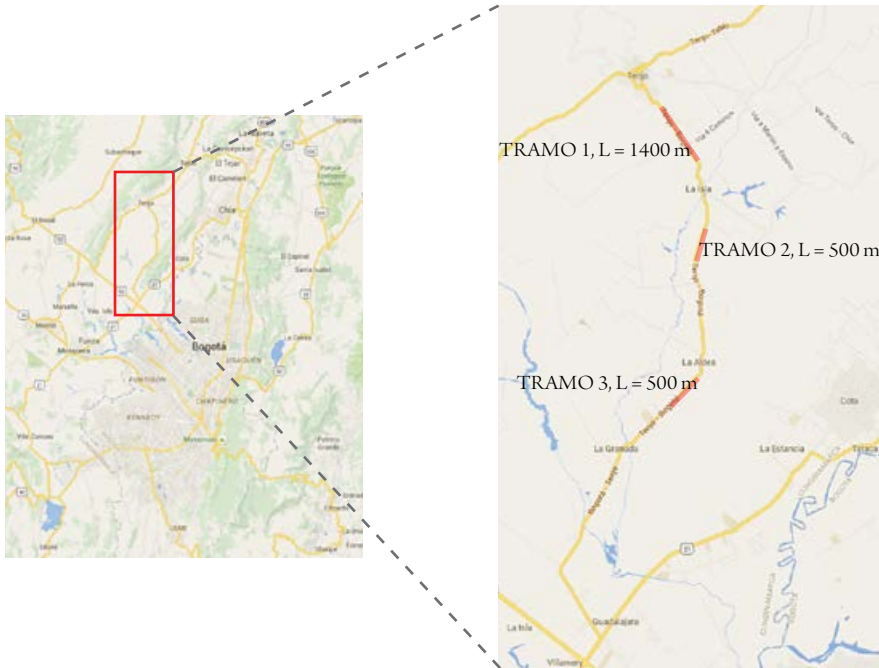


Figura 2. Localización de los tramos de la carretera Tenjo-Siberia, estudiados en este artículo (sin escala)

Fuente: Google Maps (2015).

Tabla 1. Localización y abscisas de los tramos estudiados, en el sentido Tenjo-Siberia

TRAMO	ABSCISAS	LONGITUD (M)
1	K 00+400-K 01+400	1400
2	K 05+200-K05+700	500
3	K 07+200-K07+700	500

Fuente: elaboración propia.

Mecanismos de falla probables de la subrasante asociados a la acción de la vegetación

La naturaleza de los mecanismos de falla asociados a cambios volumétricos del subsuelo arcilloso del occidente de la sabana de Bogotá ha sido estudiada por diferentes autores, tales como Vesga, Caicedo y Mesa (2002), Pineda y Colmenares (2007) y Rueda (2012), entre otros. La distribución esquemática de las condiciones de equilibrio de contenido de agua causadas por las fallas se presenta en la figura 3, y una síntesis de los mecanismos de falla probables de la subrasante asociados a la acción de sistemas radiculares se presenta en la figura 4.

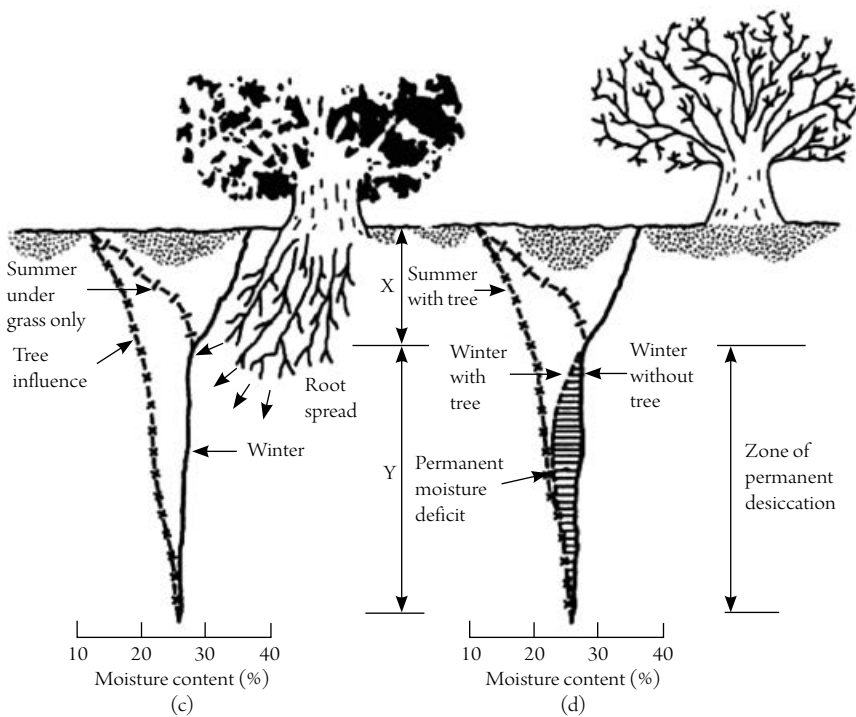


Figura 3. Influencia de las raíces de los árboles en el equilibrio de humedad de un suelo arcilloso

Nota: Se presentan las profundidades de cambio de humedad asociado a factores medioambientales (segmento X) y la profundidad en la cual se presenta déficit permanente de humedad (segmento Y)

Fuente: adaptado de Roberts, Jackson y Smith (2006).

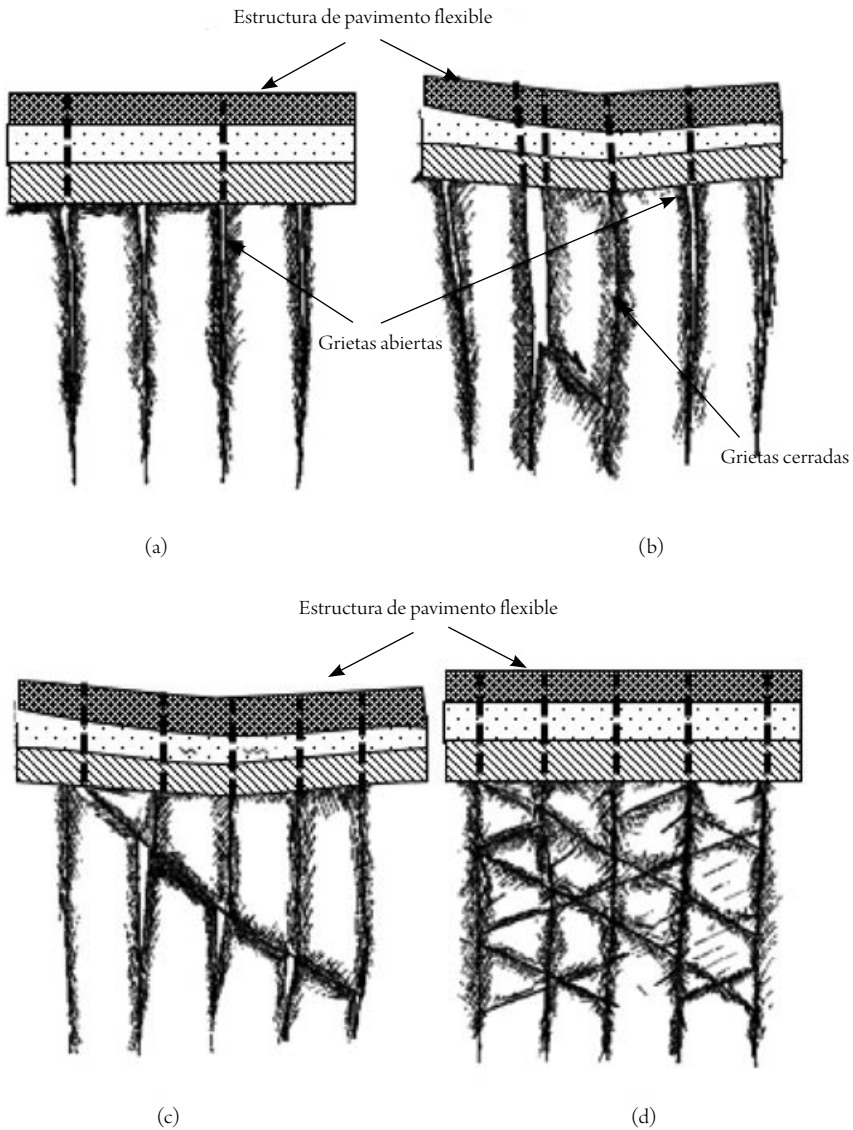


Figura 4. Mecanismos probables de falla en la subrasante arcillosa de la vía Siberia-Tenjo: a) condición inicial de fracturamiento de la subrasante y pérdida de continuidad, b) falla de una columna de suelo y deformación de la estructura de pavimento, c) falla por corte de varias columnas, deformación y ruptura de la estructura de pavimento, d) falla por corte de columnas intensamente fracturadas y ruptura del pavimento

Fuente: adaptado de Vesga, Caicedo y Mesa (2002).

En la figura 3 se observa que las raíces imponen en el subsuelo arcilloso un estado de desecación permanente con aumentos en la succión del agua de poros. En la figura 4, los mecanismos de falla probables han sido planteados conceptualmente a partir de las referencias mencionadas y de acuerdo con observaciones recientes en campo en escenarios similares, lo que involucra el desarrollo de grietas de tensión semiverticales asociadas al aumento de la succión por acción de las raíces (véase, por ejemplo, Gómez y Pérez, 2012; Roberts, Jackson y Smith, 2006). Los mecanismos de falla presentan las siguientes características generales:

- La estructura de pavimento presenta deformaciones considerables en forma de hundimientos de la capa de rodadura localizados en inmediaciones de árboles y arbustos. Se presentan también grietas longitudinales en superficie y patrones de media luna.
- La pérdida de continuidad del subsuelo asociado a la generación de grietas semiverticales empieza a desarrollarse tan pronto se llega a las arcillas y están presentes, en profundidad, hasta el nivel freático. Vesga, Caicedo y Mesa (2002) mencionan la formación de columnas de suelo de diferentes secciones transversales y profundidades. Estas columnas de suelo tendrían una forma en planta casi hexagonal, cuyo conjunto daría la apariencia de un “panal de abejas”.
- Las columnas de material arcilloso son muy susceptibles de fallar incluso bajo su propio peso, mediante las siguientes formas: falla por corte, fallas por pandeo de columnas de suelo muy esbeltas, fallas concomitantes asociadas al hecho hipotético de que las columnas se van recostando unas con otras y se cierran las grietas generadas previamente, pero se genera un hundimiento en la superficie del terreno. Estos mecanismos controlan la aparición de deformaciones irreversibles en las vías.

Cerca del nivel freático, las raíces presentes no necesitan generar succión para la extracción de agua, debido a la alta disponibilidad del líquido en los poros del suelo, y además, por otra parte, las raíces necesitan de oxígeno libre para sobrevivir, de tal modo que en los suelos saturados el sistema radicular de las especies no podría sobrevivir, a menos que su crecimiento se realice por grietas previamente formadas. Algunas curvas de retención de agua elaboradas recientemente en materiales arcillosos extraídos del subsuelo de la vía (Cabana y García, 2014; Pineda y García, 2014) muestran que estos permanecen saturados hasta succiones variables entre 150 y 600 kPa (magnitudes de referencia del valor de entrada de aire [VEA]); estos serían los límites para los cuales se produciría el crecimiento de las raíces en el me-

dio. Estos valores fueron similares a los establecidos para otras arcillas superficiales de origen lacustre (Pineda y Colmenares, 2007).

La succión matricial generada en un principio en las capas orgánicas superficiales cercanas a la estructura de pavimento por las raíces de las especies vegetales presentes produce las primeras grietas en la arcilla subyacente. Las raíces que se alojan dentro de las grietas formadas generan gradualmente incrementos en la succión matricial del agua de poros del esqueleto mineral que ocasionan contracciones volumétricas y agrietamientos mayores en profundidad en la subrasante, hasta alcanzar el nivel freático, debajo de la cual ya no se pueden formar las grietas por la baja resistencia a la tracción de la arcilla normalmente consolidada del depósito. En los materiales arcillosos más superficiales, la succión matricial debida a la acción de las raíces puede llegar a niveles muy altos por encima del VEA, sobre todo en las épocas secas, lo que agudiza la persistencia de las grietas en la subrasante y el consecuente daño en las vías.

Metodología empleada para la caracterización de patologías asociadas a la acción de la vegetación

Los mecanismos de falla asociados al agrietamiento de la subrasante, causados por los cambios volumétricos inducidos por la acción de las raíces, se ven reflejados en las deformaciones irreversibles de la estructura del pavimento, las cuales se manifiestan en fisuras y deformaciones prominentes en la carpeta asfáltica. Las patologías que se pueden relacionar con la acción de especies vegetales se presentan a continuación en las tablas 2 y 3; se relacionan los daños causados por mecanismos de degradación secundaria de las capas asfálticas que, presumiblemente, guardan causalidad con el desarrollo inicial de las deformaciones irreversibles de la estructura de pavimento causadas por el comportamiento de la subrasante.

Dichos mecanismos no se pueden relacionar directamente con la acción de especies vegetales, pero pueden visualizarse como una consecuencia del deterioro previo del pavimento y su capacidad estructural, causado por las contracciones volumétricas y el agrietamiento producido en el material de apoyo de la vía. El aspecto de las patologías y daños secundarios mencionados puede consultarse en el manual de daños del método PCI. En este trabajo, aunque se realizó el levantamiento de los daños de acuerdo con esta metodología, no se realizó la estimación de la severidad.

Tabla 2. Tipos de patologías asociadas al colapso de la subrasante por agrietamiento de esta

TIPO DE FALLA	NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA EN PLANTA
Fisuras longitudinales	FL	<p>Las grietas o fisuras longitudinales son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción y pueden ser causadas por:</p> <ol style="list-style-type: none"> Una junta de carril del pavimento pobremente construida. Contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas (inferiores a 2°C), o al endurecimiento del asfalto durante la construcción, o al ciclo diario de temperatura. Inestabilidad de la subrasante. 	
Fisuras en media luna	FML	<p>Son fisuras con curvatura que separan zonas de niveles diferentes en un tramo vial. Se asocian a la ausencia de confinamiento de la vía y a procesos de inestabilidad de la subrasante.</p>	
Hundimientos o depresiones	HUN	<p>Son áreas localizadas de la superficie del pavimento con niveles visiblemente más bajos que el pavimento a su alrededor. En múltiples ocasiones, las depresiones suaves solo son visibles después de la lluvia, cuando el agua almacenada forma un "baño de pájaros" (<i>bird bath</i>). En el pavimento seco, las depresiones pueden ubicarse gracias a las manchas causadas por el agua almacenada. Las depresiones son formadas por el asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta de las capas granulares.</p>	

TIPO DE FALLA	NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA EN PLANTA
Fisuras en bloques	FBL	Las grietas o fisuras en bloque son discontinuidades interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Las grietas en bloque se originan principalmente por el envejecimiento del asfalto y por la aparición de deformaciones excesivas de la subrasante, en lugares en donde la condición de envejecimiento del asfalto puede ocasionar esta patología.	<p>El diagrama muestra una sección transversal de un pavimento con una línea central (CL) y una línea de fisuras en bloques (FBL). Se ven bloques de pavimento separados por grietas interconectadas. Una flecha indica la presencia de árboles.</p>

Fuente: adaptada de Gómez y Pérez (2012).

Tabla 3. Daños causados por degradación secundaria de la carpeta asfáltica en zonas afectadas por desecación de la estructura de pavimento

TIPO DE FALLA	NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
Piel de cocodrilo	PC	Es una serie de grietas interconectadas cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo acción repetida de las cargas de tránsito, o la aparición de deformaciones excesivas de las capas granulares de la estructura de pavimento. El agrietamiento se inicia en el fondo de la capa asfáltica (o base estabilizada), donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión son mayores bajo la carga de una rueda.
Descascaramientos	DC	Es la manifestación física de la ruptura de la carpeta asfáltica originada por una depresión en la superficie de las huellas de las ruedas, o por el deterioro de áreas del pavimento previamente afectadas por fisuras, grietas o depresiones causadas por inestabilidad de la subrasante, entre otros factores. Puede presentarse el levantamiento del pavimento a lo largo de los lados del ahuellamiento o zona deprimida, pero, en muchos casos, este solo es visible después de la lluvia, cuando las huellas estén llenas de agua.

Fuente: adaptado ASTM D-6433 (2011).

Para la caracterización de las patologías presentadas en las tablas 2 y 3, se realizó un ejercicio de toma de datos en campo, lo cual permitió destacar los siguientes aspectos, en concordancia con la metodología PCI (según la norma ASTM D-6433-11), que es muy utilizada en el medio local para el diagnóstico de vías en operación y que, para este caso, fue tomada como referencia para la recolección de los datos:

1. El tipo de patología o daño en la carpeta asfáltica
2. En longitudes representativas de 100 m en cada tramo, se referenció el número de patologías o daños y el área afectada por cada daño
3. El carril en donde se encuentra la patología.
4. Las dimensiones de largo, ancho y profundo de las patologías.
5. Número, tipo y características de tamaño de las especies vegetales presentes

Distribución de las patologías y daños presentes en los tramos viales

De acuerdo con Rueda (2012), el espesor de las capas granulares de la estructura de pavimento en la vía Siberia-Tenjo puede oscilar entre 0,60 y 0,80 m. En este trabajo, el espesor real de las capas granulares no fue establecido en los tramos estudiados, aunque se realizó un trabajo de campo exhaustivo en el reconocimiento de daños en la superficie de rodadura de la vía. En la tabla 4 se presenta el inventario de las patologías asociadas al comportamiento volumétrico de la subrasante en cada tramo estudiado, cada uno de ellos dividido en longitudes representativas de 100 m. En la tabla 5 se presenta el inventario de los daños secundarios asociados a procesos de deterioro de la carpeta asfáltica. Se incluyen, así mismo, las áreas dañadas, considerando un área de referencia de 550 m², calculada a partir del ancho promedio de la vía y la longitud representativa. En las tablas 4 y 5 se presentan el número de daños identificados.

Tabla 4. Patologías detectadas en los tramos estudiados, asociadas al comportamiento volumétrico de la subrasante, en la vía Tenjo-Siberia

TRA- MO	PATOLOGÍAS POR INESTABILIDAD DE LA SUBRASANTE									
	ABSCISA		FL	FML		HUN		FBL		
	INICIO	FINAL	CAN- TIDAD	ÁREA (M ²)	CAN- TIDAD	ÁREA (M ²)	CAN- TIDAD	ÁREA (M ²)	CAN- TIDAD	ÁREA (M ²)
1	K0+400	K0+500	2	13,44	0	54,5	1	280,4	2	121,3
1	K0+500	K0+600	3	240,30	1	120,3	0	0	2	120,3
1	K0+600	K0+700	3	220,10	0	0,0	2	100,1	3	180,7
1	K0+700	K0+800	1	10,10	1	230,1	1	120,3	2	80,4
1	K0+800	K0+900	3	212,30	0	0,0	0	0	3	99,3
1	K0+900	K1+000	5	364,50	0	0,0	2	113,6	0	0,0

PATOLOGÍAS POR INESTABILIDAD DE LA SUBRASANTE										
TRA-MO	ABSCISA		CAN-TIDAD	ÁREA (M ²)	CAN-TIDAD	ÁREA (M ²)	HUN		FBL	
	INICIO	FINAL					CAN-TIDAD	ÁREA (M ²)	CAN-TIDAD	ÁREA (M ²)
1	K1+000	K1+100	2	150,30	2	190,2	1	101,2	2	59,8
1	K1+100	K1+200	2	160,30	2	256,3	1	63,4	1	40,1
1	K1+200	K1+300	3	280,10	0	184,5	0	0,0	1	35,2
1	K1+300	K1+400	0	0,00	0	0,0	3	345,3	2	130,6
2	K5+200	K5+300	1	80,20	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2	K5+300	K5+400	0	0,00	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2	K5+400	K5+500	1	56,90	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2	K5+500	K5+600	1	90,10	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2	K5+600	K5+700	1	88,20	0	0,0	0	0,0	0	0,0
3	K7+200	K7+300	1	150,20	1	83,2	1	98,2	1	101,3
3	K7+300	K7+400	1	123,60	1	70,3	1	154,8	1	140,6
3	K7+400	K7+500	1	112,30	0	0,0	1	99,1	1	134,5
3	K7+500	K7+600	1	180,10	1	69,3	1	112,4	0	0,0
3	K7+600	K7+700	1	112,90	0	0,0	1	40,3	1	235,8

Tabla 5. Inventario de daños detectados en los tramos estudiados, por deterioro secundario de la carpeta asfáltica, en la vía Tenjo-Siberia

DAÑOS SECUNDARIOS POR DETERIORO DE LA CARPETA ASFÁLTICA						
TRAMO	ABSCISA		PC		DC	
	INICIO	FINAL	CANTIDAD	ÁREA (M ²)	CANTIDAD	ÁREA (M ²)
1	K0+400	K0+500	2	65,40	1	12,3
1	K0+500	K0+600	1	65,30	1	2,3
1	K0+600	K0+700	1	45,30	1	2,8
1	K0+700	K0+800	1	87,30	1	3,5
1	K0+800	K0+900	3	223,45	0	0,0
1	K0+900	K1+000	1	62,30	0	0,0
1	K1+000	K1+100	1	40,40	0	0,0
1	K1+100	K1+200	1	22,40	0	0,0

Continúa

DAÑOS SECUNDARIOS POR DETERIORO DE LA CARPETA ASFÁLTICA						
TRAMO	ABSCISA		PC		DC	
	INICIO	FINAL	CANTIDAD	ÁREA (M ²)	CANTIDAD	ÁREA (M ²)
1	K1+200	K1+300	1	32,10	1	12,1
1	K1+300	K1+400	1	70,20	0	0,0
2	K5+200	K5+300	1	208,20	0	0,0
2	K5+300	K5+400	0	0,00	0	0,0
2	K5+400	K5+500	2	250,10	0	0,0
2	K5+500	K5+600	1	34,30	0	0,0
2	K5+600	K5+700	0	0,00	0	0,0
3	K7+200	K7+300	1	100,50	1	2,8
3	K7+300	K7+400	1	52,30	1	6,5
3	K7+400	K7+500	1	198,74	0	0,0
3	K7+500	K7+600	1	183,40	1	3,2
3	K7+600	K7+700	1	127,80	0	0,0

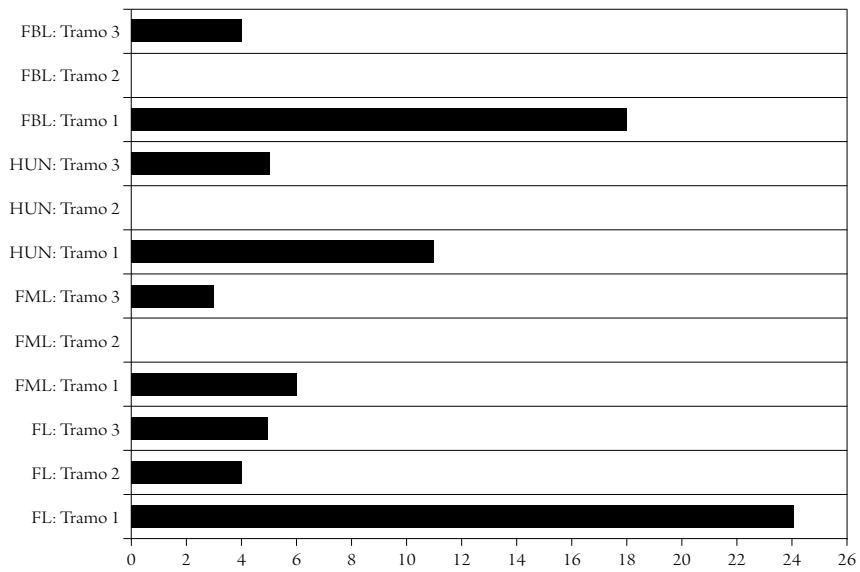


Figura 5. Frecuencias de las patologías asociadas al comportamiento volumétrico de la subrasante en los tramos estudiados en la vía Tenjo-Siberia

Fuente: elaboración propia.

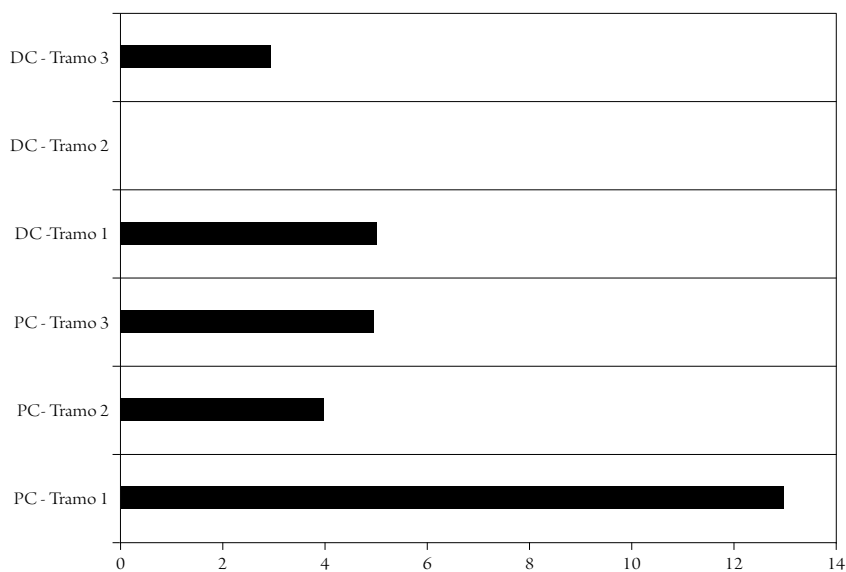


Figura 6. Frecuencias de daños secundarios de la carpeta asfáltica en los tramos estudiados en la vía Tenjo-Siberia

Fuente: elaboración propia.

Caracterización de la vegetación presente en los tramos de vía analizados

En los tres tramos evaluados en la vía Tenjo-Siberia, y en la zona en la cual se localiza la vía, se encuentran varias especies de vegetación, algunas nativas y otras foráneas, localizadas en los costados de la carretera. Las especies nativas son aquellas cuya procedencia es del lugar donde se encuentran, en este caso la zona occidental de la sabana de Bogotá, como lo son el nogal (*Juglans neotropica*), el arrayán (*Myrcianthes leucoxylla*), el cucharo (*Myrsine guianensis*), el tibar (*Escallonia paniculata*) y otras (tabla 6). La vegetación foránea es aquella que proviene de afuera de la zona en la que se encuentra, representada en especies como lo son el eucalipto (*Eucalyptus cinerea*, *Eucalyptus globulus*), la acacia japonesa (*Acacia melanoxylon*), la acacia mimosa (*Acacia dealbata*), el pino (*Pinus patula*), el ciprés (*Cupressus lusitanica*), el sauco (*Sambucus nigra*) y el urapán (*Fraxinus chinensis*) (tabla 7).

Para la caracterización de la distribución espacial de las especies presentes, y su relación con los daños del pavimento, se emplearon las denominaciones cualitativas

de índole forestal presentadas por Mahecha, Duarte y Rodríguez (2010), en las cuales se referencian el tamaño máximo que puede alcanzar una especie determinada y la distribución de las raíces en su edad adulta, tal y como se presenta en las tablas 6 y 7. El término *raíces superficiales* se refiere a sistemas radiculares cuya profundidad no supera 1,0 m bajo el borde inferior del tronco visible en contacto con la superficie del terreno; de forma similar, las *raíces profundas* corresponden a aquellas que superan dicha profundidad.

Tabla 6. Características de las especies nativas de la zona

ESPECIES NATIVAS		
NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	DESCRIPCIÓN
Alcaparro	(<i>Senna viarum</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.
Aliso	(<i>Alnus acuminata</i>)	Árbol mediano. Raíces superficiales, raíces secundarias muy ramificadas.
Arboloco	(<i>Smallanthus pyramidalis</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales, raíces secundarias muy ramificadas.
Arrayán	(<i>Myrcianthes leucoxylla</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.
Cedro	(<i>Cedrela montana</i>)	Árbol grande. Raíz pivotante y secundarias superficiales.
Chuque, garrocho	(<i>Viburnum triphyllum</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales, abundantes.
Cordoncillo	(<i>Piper bogotense</i>)	Árbol pequeño. Raíces pivotantes y secundarias superficiales.
Corono	(<i>Xylosma spiculifera</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.
Cucharo	(<i>Myrsine guianensis</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.
Duraznillo	(<i>Abatia parviflora</i>)	Árbol mediano. Raíces superficiales.
Mano de oso	(<i>Oreopanax floribundus</i>)	Árbol mediano. Raíces superficiales.
Nogal	(<i>Juglans neotropica</i>)	Árbol grande. Raíces superficiales, raíces secundarias poco ramificadas.
Salvio negro	(<i>Varronia cylindrostachya</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.
Tíbar	(<i>Escallonia paniculata</i>)	Árbol mediano. Raíz profunda.
Trompeto	(<i>Bocconia frutescens</i>)	Árbol pequeño. Raíz pivotante, superficial.
Tuno esmeraldo	(<i>Miconia squamulosa</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales.

Fuente: Mahecha, Duarte y Rodríguez (2010).

Para analizar el eventual consumo de agua de las especies, factor preponderante en el desarrollo de las patologías asociadas a inestabilidad de la estructura de pavimento por cambios volumétricos de la subrasante, la principal característica considerada fue el tamaño, de acuerdo con las denominaciones presentadas en las tablas 8 y 9.

Tabla 7. Características de las especies foráneas de la zona

ESPECIES FORÁNEAS		
NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	DESCRIPCIÓN
Acacia japonesa	(<i>Acacia melanoxylon</i>)	Árbol grande. Raíces superficiales, raíces secundarias muy ramificadas. El árbol es susceptible al volcamiento y al desgarre de ramas.
Acacia mimosa, acacia negra	(<i>Acacia dealbata</i>)	Árbol grande. Raíces superficiales, raíces secundarias muy ramificadas. El árbol es susceptible al volcamiento y al desgarre de ramas.
Cerezo criollo	(<i>Prunus serotina</i>)	Árbol mediano. Raíces superficiales e intrusivas.
Ciprés	(<i>Cupressus lusitanica</i>)	Árbol grande. Raíces profundas, pivotantes.
Eucalipto	(<i>Eucalyptus cinerea</i>)	Árbol mediano. Raíz principal pivotante y superficial, raíces secundarias poco ramificadas.
Eucalipto	(<i>Eucalyptus globulus</i>)	Árbol grande. Raíz principal pivotante y raíces secundarias superficiales.
Pino pátula	(<i>Pinus patula</i>)	Árbol grande. Raíz principal pivotante y superficial, raíces secundarias poco ramificadas.
Sauco	(<i>Sambucus nigra</i>)	Árbol pequeño. Raíces superficiales, raíces secundarias muy ramificadas.
Urapán	(<i>Fraxinus chinensis</i>)	Árbol grande. Raíz pivotante, secundarias superficiales, poco ramificadas, abundantes.

Fuente: Mahecha, Duarte y Rodríguez (2010).

Los árboles se dividieron en tres categorías que tienen en cuenta su altura real y el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) medidos en campo, como se presenta a continuación en la tabla 8. El (DAP) corresponde al diámetro del tronco a una altura de 1,3 m sobre el nivel del terreno. El inventario de especies vegetales incluyó el conteo de árboles localizados a una distancia de hasta 5 m medidos a partir del borde de la carretera (Gómez y Pérez, 2012).

Tabla 8. Categorización de la vegetación en los tramos de vía estudiados

CATEGORÍA	ALTURA	DAP
Categoría 1 Árboles grandes	Más de 20 m de alto	Más de 0,50 m
Categoría 2 Árboles medianos	Entre 10 y 20 m de alto	Entre 0,20 y 0,50 m
Categoría 3 Árboles pequeños	Entre 2 y 10 m de alto	Entre 0,025 y 0,20 m

Fuente: elaboración propia.

El consumo de agua de las especies vegetales no está del todo medido, debido a que no existen estudios muy detallados en los que se pueda relacionar el consumo exacto con el tamaño y la especie. Sin embargo, existen algunos estudios como el de Wullschleger y colaboradores (2014) que permiten hacer una aproximación en cuanto al consumo de agua de la vegetación en función del tamaño de la especie, como se presenta en la tabla 9. Los umbrales de consumo de agua presentados se utilizarán posteriormente en el planteamiento de inferencias entre los daños y la vegetación presente.

Tabla 9. Consumo de agua esperado de las especies vegetales presentes, de acuerdo con la categorización definida en este trabajo

CATEGORÍA	CONSUMO DE AGUA (LITROS/DÍA)
Categoría 1 Árboles grandes	300-500
Categoría 2 Árboles medianos	100-300
Categoría 3 Árboles pequeños	10-100

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las tablas 10, 11 y 12 se presentan las frecuencias de distribución de las especies vegetales presentes en los tramos estudiados, incluyendo las especies que se localizan en los dos costados de la vía. En el tramo 1, las especies predominantes son la acacia japonesa, el ciprés, el eucalipto *globulus* y el eucalipto *cinerea*. El porcentaje de especies respecto a su tamaño se presenta en la figura 7, en la que se muestra que el 91 % de las especies corresponden a especies grandes y medianas. En el tramo 2 predominan las especies acacia japonesa y arrayán, con un 79 % correspondiente a tamaños de árboles pequeños (figura 8), y en el tramo 3 predominan las especies acacia japonesa, acacia mimosa y las dos especies de eucaliptos, de manera similar al tramo 1, con un 80 % de árboles grandes (figura 9).

Tabla 10. Distribución de especies vegetales en el tramo 1

TRAMO	ABSCISA	ESPECIES VEGETALES PRESENTES																							
		ACACIA JAPONESA		ACACIA MIMOSA		CIPRÉS		EUCALIPTO GLOBULUS		EUCALIPTO CINEREA		PINO PATULA		SAUCO		URAPÁN									
		G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P						
1	K0+400	3	5	1	2	1	7	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1							
1	K0+500	4					2	3		2		3			4			2							
1	K0+600			1				1				3			2			3							
1	K0+700	4							4									2							
1	K0+800				10							2						1							
1	K0+900	5					2																		
1	K1+000							3		3															
1	K1+100	2					2					2						2							
1	K1+200	2			4																				
1	K1+300	2						2										2							
Totales		9	16	10	8	2	0	3	11	0	11	0	0	9	6	0	11	6	0	7	1	0	10	3	1

G: árbol grande, M: árbol mediano, P: árbol pequeño. En las casillas se anota el número de especímenes presentes longitudes de 100 m.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Distribución de especies vegetales en el tramo 2

TRAMO	INICIO	FINAL	ACACIA JAPONESA		ARRAYÁN		CIPRÉS		CEDRO		EUCALIPTO CINEREA		PINO PATULA		SAUCO		URAPÁN									
			G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P						
2	K5+200	K5+300	5																							
2	K5+300	K5+400	8																							
2	K5+400	K5+500			1								1				1									
2	K5+500	K5+600	4		2		2		3		1		1		1		1									
2	K5+600	K5+700	10		12				1						1		1									
Totales			0	4	23	0	2	15	0	2	1	0	2	4	0	1	1	0	1	5	0	1	2	0	1	2

G: árbol grande, M: árbol mediano, P: árbol pequeño. En las casillas se anota el número de especímenes presentes longitudes de 100 m.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Distribución de especies vegetales en el tramo 3

TRAMO	INICIO	FINAL	ESPECIES VEGETALES PRESENTES																							
			ACACIA JAPONESA		ACACIA MIMOSA		CIPRÉS		EUCALIPTO GLOBULUS		EUCALIPTO CINEREA		PINO PATULA		SAUCO		URAPÁN									
	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P	G	M	P								
3	K7+200	K7+300	4		1																					
3	K7+300	K7+400					3												1							
3	K7+400	K7+500	1	1		2				2									2							
3	K7+500	K7+600		4					2										2							
3	K7+600	K7+700	1			1		1		2									2							
Totales			6	0	0	5	1	0	2	1	0	5	1	0	4	2	0	3	1	0	4	0	0	3	2	0

G: árbol grande, M: árbol mediano, P: árbol pequeño. En las casillas se anota el número de especímenes presentes longitudes de 100 m.
Fuente: elaboración propia.

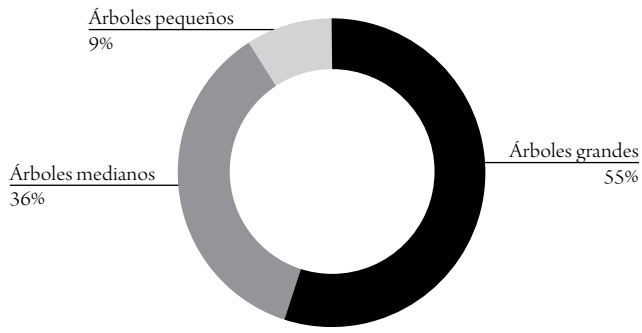


Figura 7. Porcentajes de distribución de tamaños de las especies vegetales en el tramo 1, vía Tenjo-Siberia

Fuente: elaboración propia.

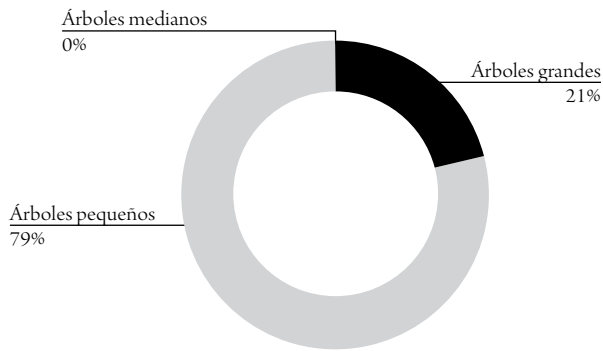


Figura 8. Porcentajes de distribución de tamaños de las especies vegetales en el tramo 1, vía Tenjo-Siberia

Fuente: elaboración propia.

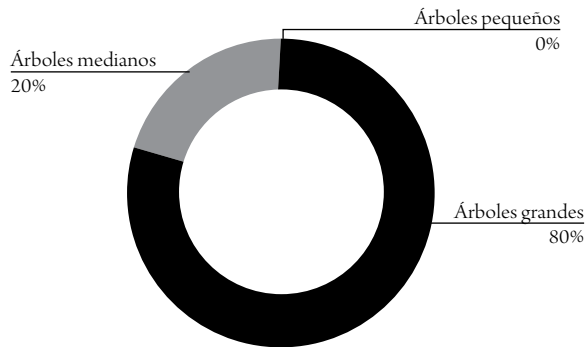


Figura 9. Porcentajes de distribución de tamaños de las especies vegetales en el tramo 1, vía Tenjo-Siberia

Fuente: elaboración propia.

Inferencias entre las patologías identificadas y la presencia de especies vegetales

En la tabla 13 se presenta un recuento acerca del número de patologías en el pavimento asociadas a cambios volumétricos de la subrasante (tomado a partir de los datos presentados en la tabla 4), y el porcentaje de árboles según su tamaño, indiferente de la especie, para cada uno de los tramos analizados. Los datos presentados en esta tabla sugieren que existe cierta proporcionalidad entre el porcentaje de árboles grandes y medianos y el número de patologías de los tipos FL, FML, HUN y FBLQ, identificadas en los tramos. En la figura 10 se observa que el número de patologías asociadas a cambios volumétricos de la subrasante guarda una marcada relación con el número de árboles grandes y medianos presente en cada uno de los tramos estudiados, a pesar de que las longitudes de los tramos no sean iguales.

La tabla 14 presenta el área total afectada de cada uno de los tramos analizados, establecida a partir de la información levantada en campo, para un ancho de vía promedio de 5,50 m y las patologías de los tipos FL, FML, HUN, FBL. En los tramos 1 y 3 se presentan porcentajes de área de vía dañadas de 62 y 75 %, respectivamente, de manera congruente con el número de árboles grandes y medianos presentes en cada uno de estos. En el tramo 2 predominan árboles pequeños, por lo cual el número de patologías asociadas al comportamiento volumétrico de la subrasante es mucho menor que en los otros dos tramos.

En la figura 11 se presenta el análisis comparativo de las áreas afectadas para los tramos estudiados. A pesar de que los tramos tienen longitudes diferentes, la relación entre la densidad de especies vegetales grandes y medianas con la aparición de deformaciones inadmisibles para la estructura de pavimento causada por la extracción de agua por efecto de las raíces es evidente. Las especies acacia japonesa, arrayán, acacia mimosa y eucalipto (*globulus* y *cinerea*) presentan raíces que se catalogan como superficiales e intrusivas (tablas 6 y 7), las cuales pueden alcanzar profundidades de hasta 2,0 m dentro del subsuelo que conforma la subrasante. Otras especies, como el ciprés, poseen raíces profundas que pueden alcanzar profundidades mayores. Dado que el consumo de agua depende fundamentalmente del tamaño de la especie; al parecer el hecho de que las especies sean o no foráneas no parece tener influencia en la aparición y desarrollo de patologías en los tramos de vía estudiados.

Tabla 13. Relación del número de patologías asociadas a especies vegetales y el tamaño de las especies para los tramos estudiados

TRAMO	NÚMERO DE DAÑOS	ÁRBOLES GRANDES (%)	ÁRBOLES MEDIANOS (%)	ÁRBOLES PEQUEÑOS (%)
1	59	55	36	9
2	4	0	21	79
3	17	79	20	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Número de daños, áreas afectadas y número de especies vegetales grandes y medianas en cada tramo estudiado

TRAMO	LONGITUD DEL TRAMO (M)	NÚMERO DE DAÑOS	ÁREA AFECTADA DEL TRAMO (M ²)	ÁREA TOTAL DEL TRAMO (M ²)	PORCENTAJE DE ÁREA AFECTADA	NÚMERO DE ÁRBOLES GRANDES Y MEDIANOS
1	1400	59	4803,3	7700,0	62	113
2	500	4	382,4	2750,0	14	14
3	500	17	2058,9	2750,0	75	40

Fuente: elaboración propia.

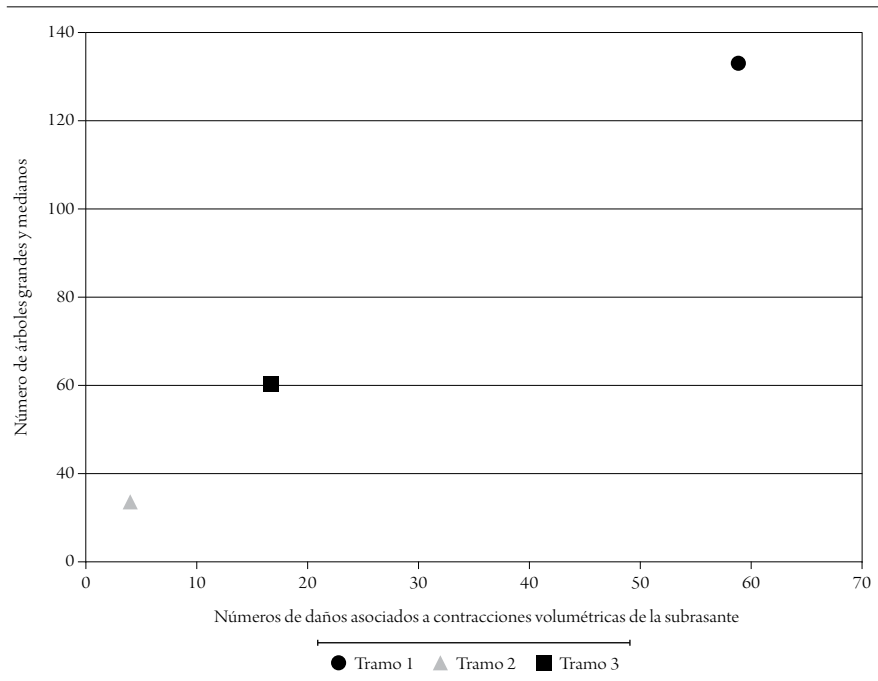


Figura 10. Relación entre el número de daños y de árboles grandes y medianos localizados en cada tramo

Fuente: elaboración propia.

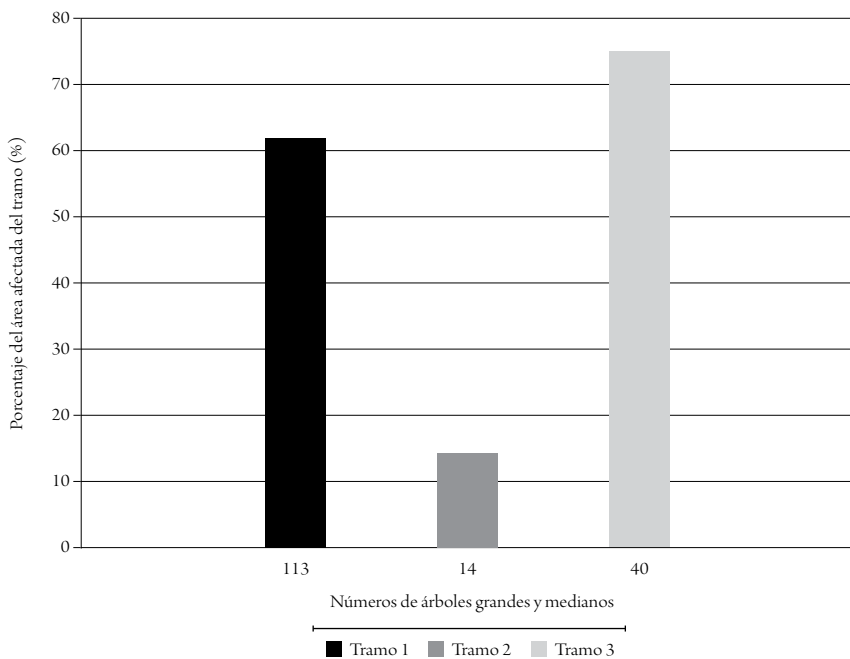


Figura 11. Porcentaje de área dañada a partir del reconocimiento de las patologías del tipo FL, FML, HUN y FBL en función del número de árboles grandes y medianos para los tramos analizados

Fuente: elaboración propia.

En el tramo 1 se encontró que la acacia japonesa, con especímenes grandes y medianos, con raíces intrusivas y profundas, es la especie que más se repite. La segunda especie que más se presenta es el eucalipto *globulus*, igualmente con especímenes grandes. Las dos especies vegetales poseen raíces profundas e intrusivas, hecho que combinado al consumo de agua esperado puede explicar las patologías tipo FL, FML, HUN y FLB.

En el tramo 2 se halló que las especies acacia japonesa y arrayán predominan en inmediaciones de la vía. Sin embargo, dado que se tienen árboles pequeños, los procesos de equilibrio de humedad que afectan la subrasante por la acción de las raíces parecen no tener una mayor influencia en el deterioro de la estructura de pavimento; de allí el bajo número de patologías asociadas a este fenómeno identificadas en el tramo.

En el tramo 3 se encontró que los árboles grandes y medianos representan el 99 % de las especies presentes, representadas principalmente en la acacia mimosa, la acacia japonesa, el eucalipto *globulus* y el ciprés. El porcentaje del área afectada de este tramo por las patologías asociadas a la acción de las especies vegetales asciende al 79 %, con 40 árboles. Todas las especies mencionadas presentan raíces profundas e intrusivas, situación que sumada al consumo de agua de las especies explica la presencia de los daños mencionados.

A pesar de que no se menciona en este trabajo la incidencia de los sistemas de drenaje superficial de la vía en los tramos analizados y en la problemática presentada, es necesario mencionar que existe total ausencia de cunetas, canales de recolección de agua o cualquier otro tipo de obra de arte superficial que favorezca el equilibrio del contenido de agua, en la subrasante, en el tiempo. Por otro lado, la ausencia de bermas y otras estructuras de confinamiento del pavimento maximizan la vulnerabilidad de la carretera ante las deformaciones originadas por el comportamiento volumétrico de la subrasante causado por las raíces de los árboles presentes. Los dos factores mencionados originan condiciones específicas de los tramos viales estudiados que pueden favorecer la acción de las raíces vegetales en la subrasante, el desarrollo de patologías y el deterioro de la capacidad de servicio en el tiempo.

Conclusiones

Se realizó un trabajo exhaustivo en campo que buscó la evaluación de daños y patologías asociadas con la acción de especies vegetales adyacentes a tres tramos viales de la carretera Siberia-Tenjo, al occidente de la sabana de Bogotá. Junto con la identificación de las patologías presentes, se realizó la identificación detallada de las especies localizadas en inmediaciones de la vía, en distancias no mayores a 5,0 m desde el borde de la carretera, incluyendo la determinación de las dimensiones de los árboles de cada especie. Esta información permitió realizar una primera aproximación acerca de las relaciones de causalidad entre el número de daños presentes, el área afectada del tramo y el número y tipo de especies vegetales.

En la identificación de las patologías, se emplearon criterios generales contenidos en el método PCI de evaluación de pavimentos asfálticos, con el fin de ajustar dichos criterios a la identificación de depresiones, grietas y fisuras longitudinales, grietas y fisuras de borde y fisuras en bloque inducidas por la extracción de agua

de las raíces de los árboles adyacentes a los tramos analizados. Se encontró que existe una relación de proporcionalidad entre el tamaño de las especies vegetales y la densidad de los daños presentes en los tramos; es así como pudo identificarse que los tramos 1 y 3, donde predominan árboles grandes y medianos, el deterioro de la estructura de pavimento asociado al comportamiento volumétrico de la subrasante es mayor que en el tramo 2, en el cual predominan especies vegetales de tamaño pequeño. Se puede concluir que los árboles que tienen un grupo de raíces profundas, como lo son el eucalipto y el pino, el ciprés y el urapán, generan fisuras longitudinales, fisuras en media luna y hundimientos. Para las zonas donde se presentan árboles con las raíces de acción más superficial, como en el caso de las especies de acacias, las patologías encontradas se pueden relacionar con mecanismos de falla similares, aunque menos severos.

Por lo general, se tiene el concepto de que la vegetación nativa es menos dañina que la foránea, simplemente por el hecho de que la primera se asume como endémica de la zona y su historia reciente. De acuerdo con las inferencias realizadas, el tamaño de la vegetación es, al parecer, la característica que más influye en el desarrollo de daños sobre los materiales arcillosos lacustres que sirven como apoyo a las vías del occidente de la sabana de Bogotá. Lo anterior debido a que el consumo de agua de todas las especies es muy similar y está directamente relacionado con su tamaño, más que con la especie en particular. Un árbol nativo, del mismo tamaño que uno foráneo, consume la misma cantidad de agua aproximadamente, y se presume que genera los mismos cambios volumétricos en el terreno.

También se estableció que un factor muy importante en la afectación de la vegetación sobre los tramos viales es su proximidad. En efecto, para distancias superiores a 6 m entre el borde de la vía y las especies vegetales, no se presenta efecto alguno sobre la integridad de la vía.

El deterioro en las estructuras de pavimentos puede tener diversos orígenes, para este caso el proceso de daño se origina en el suelo de subrasante. Cambios volumétricos implican reducción de espesores en la estructura al generarse colapso en las capas de materiales que son sensibles al agua.

La variación de contenido de agua en el suelo, para el caso de la desecación, genera disminución del desempeño mecánico del material de las capas granulares. Teniendo en cuenta que el diseño de la estructura de pavimento considera las

propiedades óptimas de los materiales respecto a su curva de compactación, los valores asociados a la capacidad estructural se ven reducidos para niveles de tráfico igual generando daños en la vía.

La aparición de daños en la estructura afecta de forma directa el índice de servicio que, a su vez, está directamente relacionado con la capacidad estructural. Lo anterior implica que en términos estructurales se genera un efecto iterativo de pérdida de capacidad estructural y daño acelerado.

En los tramos estudiados se encontró que la vía no cuenta con ningún tipo de cunetas o estructuras para el manejo de las aguas superficiales. Tampoco se encontraron estructuras de confinamiento de la vía, situaciones puntuales que favorecen el deterioro de la vía por acción de las raíces de las especies identificadas. Dado que las relaciones de causalidad entre daños de la vía y vegetación pueden involucrar otros factores, es fundamental continuar con la observación de las patologías, evaluar su severidad y su variación espacio-temporal en mayor detalle, con el fin de generar información de consulta que permita, en el mediano plazo, la generación de criterios que lleven a tomar decisiones frente a la programación de labores de mantenimiento y rehabilitación de esta vía y otras en nuestro medio, con problemas similares.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle por la colaboración prestada en el desarrollo del trabajo de grado que permitió el levantamiento parcial de información presentada en este artículo en 2011; al programa de Maestría en Infraestructura Vial de la Universidad Santo Tomás, por el financiamiento de las actividades de campo complementarias relacionadas con la evaluación de la condición del pavimento incorporando patologías asociadas a desecación de la subrasante en 2013 y 2014; y al grupo de investigación en Suelos Residuales y Parcialmente Saturados de la Universidad Nacional de Colombia, por la colaboración con la revisión conceptual de las relaciones de causalidad presentada en este trabajo entre los daños del pavimento y la vegetación.

Referencias

- ASTM (2011). *ASTM D6433-11. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index survey*. West Coshohocken, PA: ASTM Standards.
- Cabana, M.D. y García, D.A. (2015). *Propiedades de retención de humedad de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de grado). Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Gómez, D. y Pérez, J. (2012). *Caracterización de los daños de estructuras de pavimento debidos a vegetación en el occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Mahecha, J., Duarte, E. y Rodríguez, J. (2010). *Inventario de especies vegetales en la sabana de Bogotá*. Documento de trabajo. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano. Inédito.
- Pineda, J., Colmenares, J., Martínez, W. y Rodríguez, J. (2003). Comportamiento volumétrico de arcillas superficiales de la sabana de Bogotá en procesos de pérdida de humedad. *Memorias – XII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Pineda, J. y Colmenares, J. (2007). *Influence of dessication on volume change behavior of Bogota Clay*. Documento procedente de 13th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Isla Margarita, Venezuela: Sociedad Venezolana de Geotecnia.
- Pineda, J. y García, D. (2014). *Relaciones succión-humedad y comportamiento volumétrico de arcillas lacustres fisuradas por desecación*. Documento proveniente de las Memorias 50 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Cujae, La Habana.
- Randrup, T. y McPherson, G. y Costello, L. (2001). A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, 5(3), 209-225.
- Roberts, J., Jackson N. y Smith, M. (2006). *Tree roots in the build environment*. Londres: TSO Publishing.
- Rueda, M. Y. (2012). *Estado del arte de la problemática asociada a patologías por desecación en vías del occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de maestría). Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Rueda, M. Y. y Pineda, J. A. (2011). *Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la sabana de Bogotá*. Documento procedente del XVIII Simposio sobre Ingeniería de Pavimentos, Cartagena.
- Vesga, L., Caicedo, B. y Mesa, L. (2002). Comportamiento del subsuelo arcilloso de la sabana de Bogotá debido a su agrietamiento profundo causado por desecación. *Memorias – IX Congreso Colombiano de Geotecnia*. Medellín: Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Wullschleger, S., Epstein, H., Box, E., Euskirchen, E., Goswami, S., Iversen, C., et al. (2014).
Plant functional types in earth system models: past experiences and future directions for application of dynamic vegetation models in high-latitude ecosystems.
Annals of Botany, 114, 1-16.