
Evaluación de Daños Producidos por Árboles Ornamentales en Pavimentos de la Zona Norte de Bogotá

En este artículo se presenta un resumen de la fisiología de los árboles y del comportamiento del suelo, se mencionan los daños causados en pavimentos en la zona Norte de la ciudad de Bogotá y, finalmente, se indican las posibles soluciones para minimizar el problema.

El trabajo fue presentado en el Tercer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos realizado en Cartagena del 22 al 27 de octubre de 1979.

Por:
LISANDRO BELTRAN MORENO

**Profesor Asociado, Jefe de la Sección de Geotecnia, Facultad de Ingeniería:
Universidad Nacional de Colombia**

Introducción

Teniendo en cuenta que los árboles en las calles de las ciudades les dan ornamentación y constituyen una fuente importante de descontaminación del aire, diferentes gobiernos distritales han tratado de efectuar la arborización de las calles y avenidas más importantes de Bogotá. En el año de 1948, con motivo de la IX Conferencia Panamericana, se adelantó la mayor acción en este sentido cuando las autoridades consideraron que la ciudad debía embellecerse para la época del evento. Con ese fin la Sociedad de Mejoras y Ornato contrató al arquitecto japonés Hochin, quien en razón de la brevedad del tiempo con que contaba, unos seis meses, plantó una especie originaria del Asia, de muy rápido crecimiento, llamada "Urapan" (*Fraxinus Chinensis*), la cual es en el momento la más abundante en la ciudad. En ocasiones anteriores, la misma Sociedad de Mejoras y personas de las clases altas habían introducido otras especies que conocieron en sus viajes al exterior y que consideraron conveniente cultivar en el país. Así también se sembraron en las avenidas de Bogotá especies como el "Sauce" (*Salix Humboltiana*), originario del Asia, la "Acacia" (*Acacia Melanoxylon*), originaria de Australia, el Eucalipto (*Eucalyptus Mobulus, Viminalis y Camaldulensis*) originario de Australia y el Pino (*Pinus Pátula, Radia-*

ta, Taeda) originario de California y Europa.

De esta manera se efectuó la implantación de especies foráneas sin tener en cuenta el cambio de las condiciones ambientales en sus regiones de origen, normalmente secas y con suelos arenosos, a las de la Sabana de Bogotá, de un ambiente húmedo y con un suelo provisto de una rica capa vegetal y de estratos arcillosos cercanos a la saturación. En esta última situación, las especies mencionadas encuentran unas condiciones extremadamente favorables que propician además de un rápido crecimiento y el logro de tamaños mayores, la fácil competencia con las especies nativas,

Otro factor de importancia a considerar es el hecho de que toda planta requiere de cantidades determinadas de agua diaria para su supervivencia y desarrollo. Esa cantidad es función de la especie, y dentro de ella, la edad y tamaño (altura, diámetro del tronco y follaje) del árbol. Algunos de los mencionados alcanzan alturas cercanas a los 40 m. (pino, eucalipto) y consumen diariamente tanto como 450 litros, especialmente en el verano y con vientos. Esta cantidad de agua es obtenida del suelo por las raíces, aplicando succiones que normalmente llegan hasta los 1500 KN/m². Si parte de la superficie del suelo correspondiente al área aferente del▶

◁ árbol se cubre con un material impermeable, tal como el pavimento de una vía o una edificación que colecta el agua lluvia en determinados sumideros, el árbol se ve obligado a extender sus raíces y a extraer del suelo la máxima cantidad de agua posible, causando la desecación y la contracción del mismo. (**) Los movimientos causados de esta forma pueden ser tan importantes que produzcan el hundimiento local y la falla del pavimento o el agrietamiento de pisos y paredes de la edificación.

Movimiento del agua a través de los árboles

Para este propósito es posible suponer que un árbol o una planta es una bomba hidráulica capaz de ejercer presiones de succión altas, del orden de las 15 atmósferas o más dependiendo de las especies, pero de una descarga limitada. (Figura No. 1). Árboles individuales pueden absorber entre 225 y 450 litros por día (Kramer et al, 1960), ó 900 litros por semana (Ward, 1947), de la cual entre el 95 y 99% se transmite a la atmósfera por transpiración. La demanda anual de los árboles europeos está entre 30000 y 55000 litros, siendo el valor más alto para los álamos.

La relación entre el agua perdida por transpiración y la utilizada en fotosíntesis, hidrólisis, hidratación de los protoplasmas y paredes de las celdas, y el mantenimiento de la turgencia*, se conoce como "relación de transpiración" (Krammer et al, 1960) y varía ampliamente dependiendo de la especie, de la localización y del ambiente, con valores típicos entre 300 y 500 para los árboles.

El mecanismo mediante el cual un árbol desarrolla y mantiene las elevadas succiones indicadas se supone comprendido en tres partes:

(**) En realidad al cubrir el terreno se impide la evaporación y como consecuencia se produce un aumento en la humedad del suelo respecto de las áreas no cubiertas. Por esta razón los árboles dirigen sus raíces hacia las primeras buscando la mayor humedad.

(*) Ver glosario de términos.

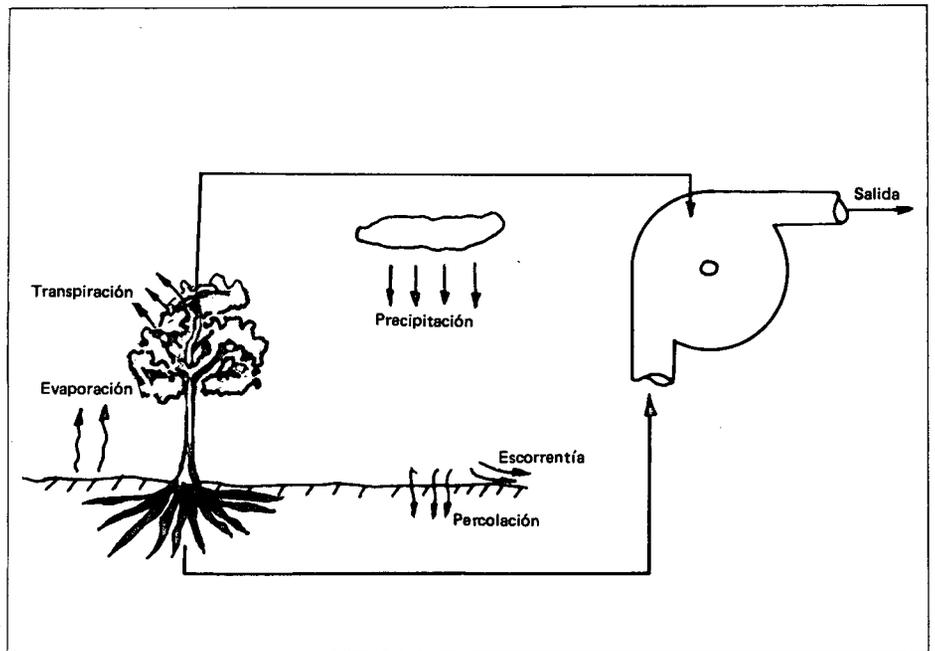


Fig. 1. Modelo de Asociación de la Evapotranspiración

1. La superficie de la hoja donde el estoma actúa como la interfase a través de la cual se transpira la mayor cantidad del agua. En las hojas de los árboles las cavidades de los estomas se encuentran principalmente en el anverso de las hojas, variando su densidad con las especies (entre 20000 y 110000 por cm^2). Se ha encontrado que esta densidad no influye apreciablemente en la tasa de transpiración.

Cuando hay abundante agua para las raíces y la presión de turgencia es alta, las celdas en la boca de la cavidad de los estomas se hinchan facilitando la transpiración, haciéndola cercana a la tasa potencial creada por las condiciones ambientales. No está muy bien entendido en la actualidad el mecanismo preciso por medio del cual se transfiere agua de las paredes de la celda a la cavidad, pero parece que es una combinación de efectos de succión de un soluto en la pared de la celda, la cual actúa como una membrana semi-permeable, y la succión matricial en la boca del estoma, complementados por los gradientes de temperatura y humedad.

Cuando el agua disponible para las raíces es escasa, éstas tienen que aplicar succiones altas y las hojas responden cerrando las aberturas de los estomas a medida que la presión

de turgencia decrece en cercanías de las aberturas. Se dice que la planta se está marchitando cuando la presión de turgencia ha disminuido a cero y las cavidades estomatales se encuentran completamente cerradas. En este momento el árbol está aplicando la succión más elevada posible a los suelos. De acuerdo con Scholander (1971) algunas especies en un ambiente desértico pueden ejercer succiones tan altas como 80 atmósferas, y aquellas que viven en agua salada deben aplicar succiones entre 40 y 50 atmósferas para sobrevivir, venciendo a la succión osmótica que produce el agua salada sobre las raíces, de unas 25 atmósferas.

2. La xilema de las ramas, tronco y raíces, cuyas celdas forman las arterias para la transmisión de agua desde la punta de las raíces hasta las hojas. La de una conífera está formada por elementos traqueidales que son cámaras pequeñas alargadas de 50-100 mm de ancho y de unos pocos milímetros de largo. Se encuentran profusamente interconectados por diminutos poros membranales los cuales permiten el paso del agua aunque no de una interfase aire-agua. Los árboles de madera dura (cedro, pino, guayacán, etc.) tienen el mismo sistema traqueidal básico intercalado con tubos largos y anchos (vasos), los cuales empie-

zan y terminan cegados pero se encuentran atravesados por poros. Pueden ser de varios metros de longitud y hasta de 0.5 mm de ancho, y representan el camino de menor resistencia para la circulación del agua a través del árbol. Normalmente se encuentran reforzados por nervios en espiral.

Los sistemas mencionados anteriormente son capaces de sostener esfuerzos de compresión aplicados cuando se presentan presiones de succión (tensión) en la sabia, y debido a los pequeños radios de capilaridad protegen contra la existencia de cavitación. Si hacemos un corte o herida en el árbol (e.g. en el tronco), la naturaleza celular de los traqueidales y vasos asegura que únicamente se pierda la sabia de las celdas dañadas, constituyendo un mecanismo de seguridad tal como se muestra en la Figura No. 2. Al mismo tiempo la permeabilidad longitudinal desde el tronco a las ramas se mantiene tan alta como sea posible y el agua atravesará transversalmente el xilema, balanceando cualquier déficit que se produzca por una raíz en particular, aunque la permeabilidad lateral es mucho menor.

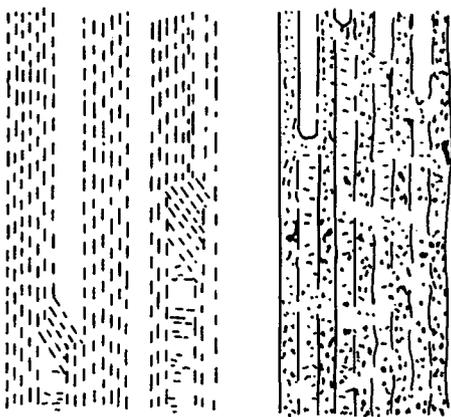


Fig. 2. Mecanismo de Seguridad del xilema contra daño.

3. La superficie de las raíces compuesta de cabellos o microrraíces las cuales forman la interfase entre el árbol y el suelo. Una vez que se ha establecido el gradiente de succión en las hojas, éste se transfiere a las ramas, al tronco y a las raíces, llegando eventualmente a las microrraíces, las cuales aplican succiones matriciales y osmótica. Las propor-

ciones precisas de estas succiones y el mecanismo exacto mediante el cual se producen no está perfectamente claro en el momento, aunque sí se considera que la acción de la punta de las raíces debe ser inversa a la de las hojas, dado que a través de ellas el agua entra al sistema. En la Figura No. 3 se muestra la subdivisión típica de un sistema de raíces.

Las raíces se pueden dividir en leñosas (o permanentes) y no leñosas (o temporales). Las raíces leñosas más gruesas se desarrollan cerca de la raíz principal, bajo el tronco, con la única función de proporcionar una base estable para soportar el árbol. Estas raíces engruesan hasta unos 25 mm rápidamente y permanecen del mismo tamaño hasta formar las raíces leñosas primarias. La ▶

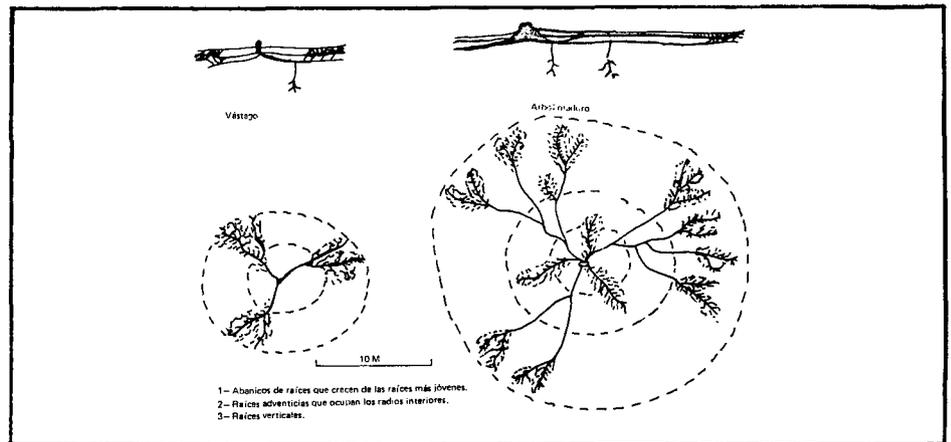


Fig. 3. Subdivisión típica de las raíces vista de planta

Desarrollo de las raíces

Debido a la dificultad de seguir las raíces, se han realizado estudios muy limitados sobre los efectos que puedan ejercer sobre su desarrollo, el ambiente, el tipo de suelo y la especie. Se conocen sin embargo la forma y tendencia generales de desarrollo para la mayoría de los árboles. En las figuras Nos. 4, 5, 6, 7, y 8 se presentan los resultados del trabajo efectuado por Lyford et al (1963) y los realizados por el Departamento de Botánica de la U. Nacional en Bogotá, mencionados por Cardona et al (1979).

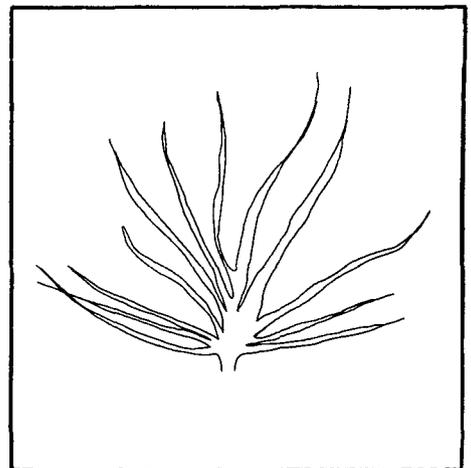


Fig. 4. Sistema radicular del urapán (*fraxinus chinensis*).

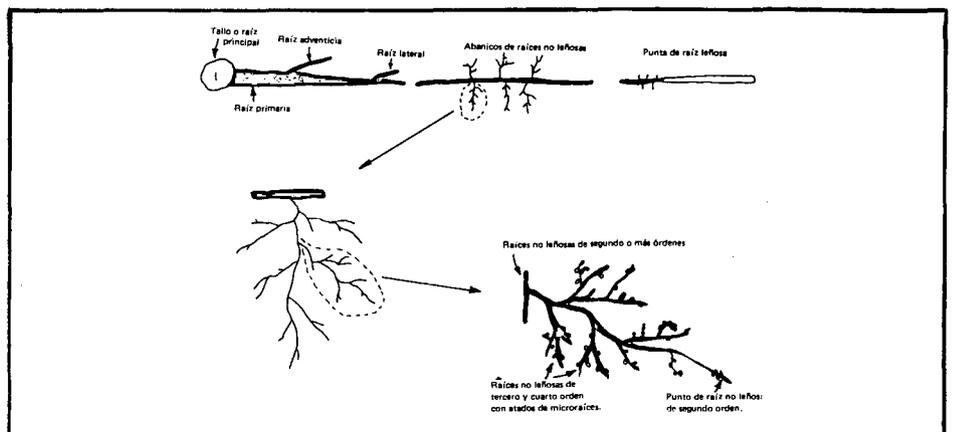


Fig. 5. Vistas de planta y de lado de un arce (*acer rubrum L.*). (Después de Lyford et al, 1963).

◁ dirección es mantenida por la punta de la raíz, la que crece a velocidades hasta de 20 mm por día dependiendo de las necesidades del agua.

Tienen la habilidad de corregir su curso muy rápidamente si encuentran un obstáculo en su camino, como una piedra o una pared. Tienen a crecer en profundidades entre 0.5 y 1.0 m y desarrollan pares de raíces laterales no leñosas las cuales se extienden en la dirección en que se encuentra el agua, usualmente hacia la superficie para interceptar el agua lluvia. Estas últimas, en el caso de que se presente un período de sequía que reduzca el contenido de humedad en la superficie o forme una barrera impermeable que evite la entrada del agua lluvia, se profundizan para remover el agua de los estratos inferiores, llegando fácilmente a profundidades de 6 m. Sin embargo, debido a que las raíces requieren de oxígeno para vivir, se puede presentar la muerte de las que han profundizado durante el período seco cuando se produce una elevación en la tabla de agua durante el período de lluvias, especialmente en el caso de suelos arenosos permeables. En los suelos arcillosos normalmente la permeabilidad es tan baja, que lo más probable es que la tabla de agua no alcance a regresar a su nivel inicial antes de que llegue un nuevo período seco. La mayoría del agua para el árbol es entonces suministrada por la red de abanicos de raíces muy finas que se desarrollan al final de los sistemas no leñosos como se muestra en la Figura No. 5.

Ward (1953) y Skempton (1954) propusieron que para efectos de di-

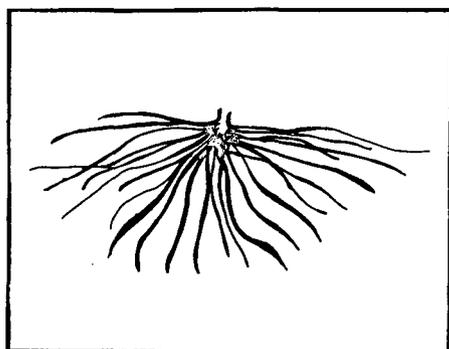


Fig. 6. Sistema radicular de la acacia (*acacia melanoxylon*).

seño de construcciones livianas, (e.g. casas de dos pisos) se considere en las condiciones arcillosas y semi-áridas del S.E. de Inglaterra una distancia de extensión de las raíces igual a la altura del árbol, cuando éste se encuentra aislado, y de 1.5 veces la altura cuando se trata de filas o grupos de ellos. Sin embargo, Nicholson (1977) encontró con base en datos recolectados por los laboratorios Jodrell en Kew Gardens (Inglaterra), que para un determinado tipo de árbol aislado, sus raíces

pueden extenderse tanto como sería de esperar para grupos de ellos, dependiendo de las condiciones ambientales. En las Figuras Nos. 9, 10 y 11 se presentan las relaciones entre la altura del árbol y la distancia a la cual se detectaron sus raíces para los álamos, los robles y los fresnos.

Los factores que obligan a las raíces a extenderse determinadas distancias no están perfectamente definidos aunque existen ciertos indicadores. Ward (1947) encontró que

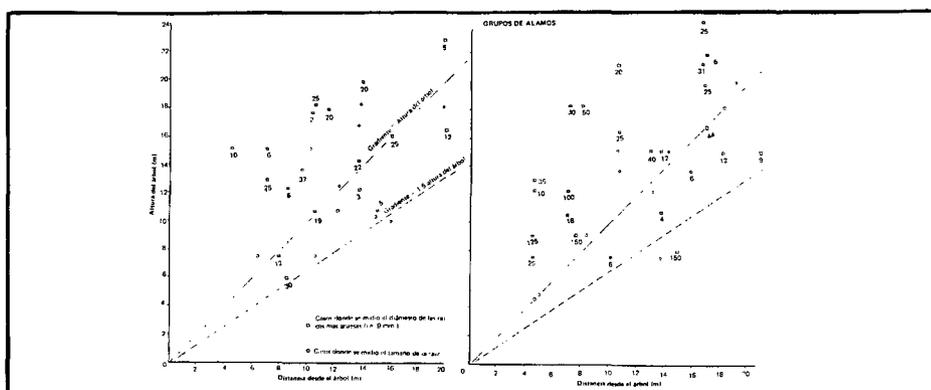


Fig. 9. Relación entre la altura del árbol y la extensión de las raíces para los álamos (después de Nicholson, 1977. ALAMO INDIVIDUAL (*Sp. Populus*)).

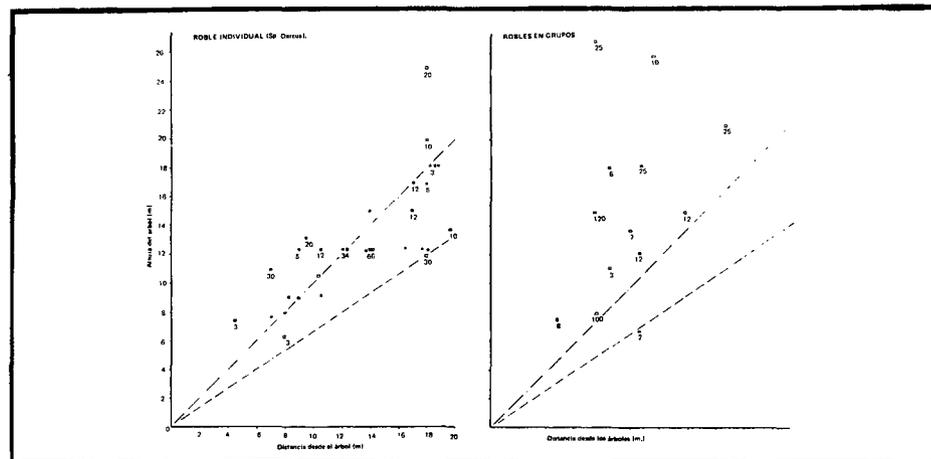


Fig. 10. Relación entre la altura del árbol y la extensión de las raíces de robles (después de Nicholson 1977).

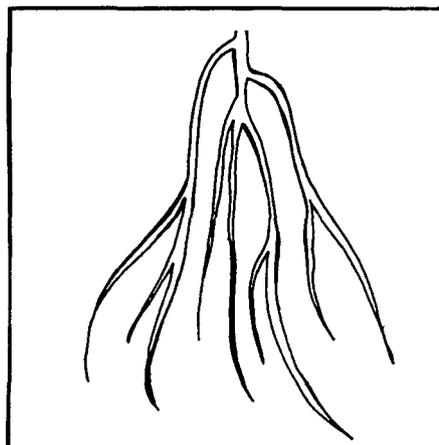


Fig. 7. Sistema radicular del eucalipto (*eucalyptus mobulus, viminalis y camaldulensis*).

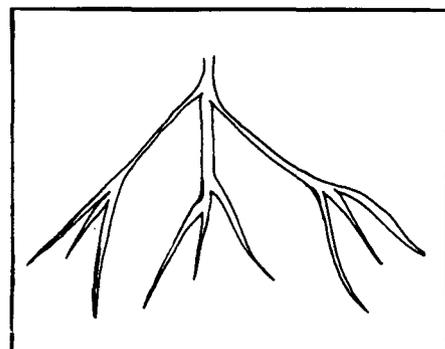


Fig. 8. Sistema radicular del pino (*pinus pátula, radiata y taeda*).

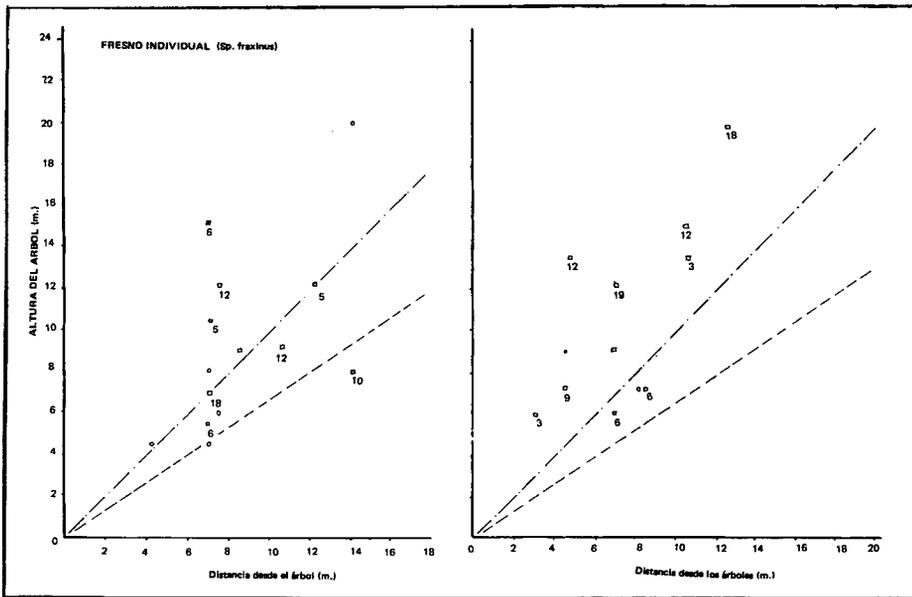


Fig. 11. Relación entre la altura del árbol y la extensión de las raíces de los fresnos (Después de Nicholson 1977).

cuando tienen acceso a una fuente de agua sin restricciones, como por ejemplo en un estrato o sub-base granular, las raíces se extienden hasta distancias que exceden dos veces la altura del árbol. Así mismo se ha observado que alcanzan distancias hasta dos veces la altura del árbol en el lado seco de una pendiente, mientras que en el lado húmedo se presenta una mayor densidad de ellas pero sin exceder la distancia igual a la altura.

Mirando el árbol como una bomba hidráulica, podemos considerar cada raíz primaria como una conexión independiente que parte del tronco, el cual actúa bajo un potencial o succión común. La cantidad de agua que le llega de cada raíz primaria estará supeditada, en consecuencia, a la resistencia a la succión en los grupos de raíces de la zona considerada. El desarrollo de las raíces es máximo en el área donde se están produciendo los flujos más altos en un momento dado.

Comportamiento del suelo

Succión en los suelos

Se considera que los suelos están compuestos por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Cuando la presión de poros en la fase líquida es positiva, (i.e, suelos situados por debajo de la tabla de agua), cualquier

fase gaseosa que se presente en el suelo sólo puede existir como gas (aire) atrapado en una presión más alta que la del aire en la superficie (atmosférica). En consecuencia este gas tenderá a disolverse en el sistema a medida que crece la presión y el suelo aumentará su grado de saturación, llegando a 100% cuando todos los poros estén llenos con agua.

Cuando las presiones de poros en el líquido (agua) son negativas, las interfases aire-agua se vuelven cóncavas y retroceden dentro de los poros del suelo, como un efecto del menisco de capilaridad. Este último vacía el agua de los poros más grandes al principio, dejando burbujas de aire en su lugar. Una vez que este hecho se presenta se dice que el suelo está parcialmente saturado.

Si el suelo está compuesto de partículas muy finas, como en el caso de las arcillas, los poros entre estas partículas pueden desarrollar tensiones capilares superficiales muy altas, por la acción combinada del tamaño de los poros y las características mineralógicas de las partículas coloidales, reduciendo notablemente su tamaño antes de que se presente la cavitación (separación del aire del agua) y el suelo empiece a ser parcialmente saturado. Holmes (1955) menciona la existencia de presiones negativas del orden de 10000 KN/m² en suelos arcillosos

que se mantienen saturados, mientras que Aitchison (1961) indica que en la mayoría de similar clase de suelos inicialmente saturados y no fisurados, la presión de poros puede descender por debajo de -700 KN/m² antes de que se conviertan en parcialmente saturados.

Aunque se han desarrollado algunas técnicas que permiten medir las tensiones o succiones en la fase porosa, aún se encuentran grandes inconvenientes y limitaciones que han obligado a asociarla con los valores del contenido de humedad, de mucho más fácil determinación. En las Figuras Nos. 12, 13 y 14 se presentan las relaciones entre la succión en PF

$$= \log 10 \frac{h}{\gamma \omega}, \text{ h en cms} =$$

ua—u ω , donde ua presión del aire de los poros normalmente asumida como presión atmosférica (cero) y u ω presión del agua de poros y el contenido de humedad para un suelo muy arcilloso, para diferentes arcillas inglesas, y para una arena fina a diferentes densidades. En la última figura se puede observar el valor mucho más bajo de la succión a la cual se presenta la cavitación en los suelos arenosos comparándola con los valores equivalentes para los suelos arcillosos.

Puesto que un árbol es capaz de aplicar succiones del orden de 1500 KN/m² (PF= 4.18) podemos concluir que en estas condiciones el suelo arcilloso llegará a contenidos de humedad cercanos a 20% y estará en la zona donde se produce la mayor variación en el grado de saturación, que corresponde al límite de contracción.

Principio de Esfuerzos Efectivos

Por definición conocemos que es el esfuerzo efectivo el que controla los cambios en volumen y la resistencia de un suelo. Terzaghi (1923) propuso la siguiente expresión para suelos saturados,

$$\sigma' = \sigma - u$$

donde:

$$\sigma = \text{Esfuerzo total}$$

$$u = \text{Presión del agua de poros} \triangleright$$

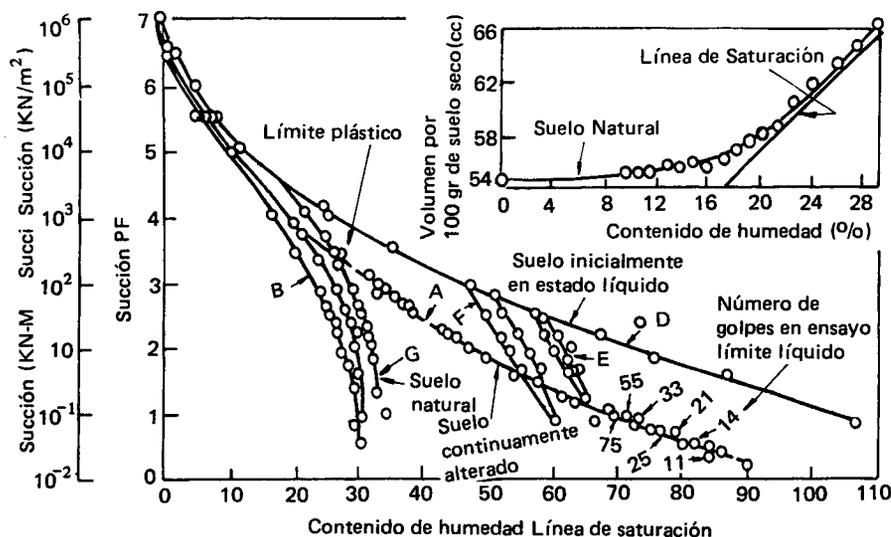


Fig. 12. Relaciones entre la succión, el contenido de humedad y la contracción para la arcilla de Londres. (Después de Black et al, 1958).

Lias	24	60	36
Weald	25	68	43
London	26	78	52
Kimmeridge	24	77	53
Oxford	24	72	48
Gault A	25	70	45
Gault B	29	81	52
Gault C	34	102	68
Cotton soil	38	82	44
Gavit D	32	121	89

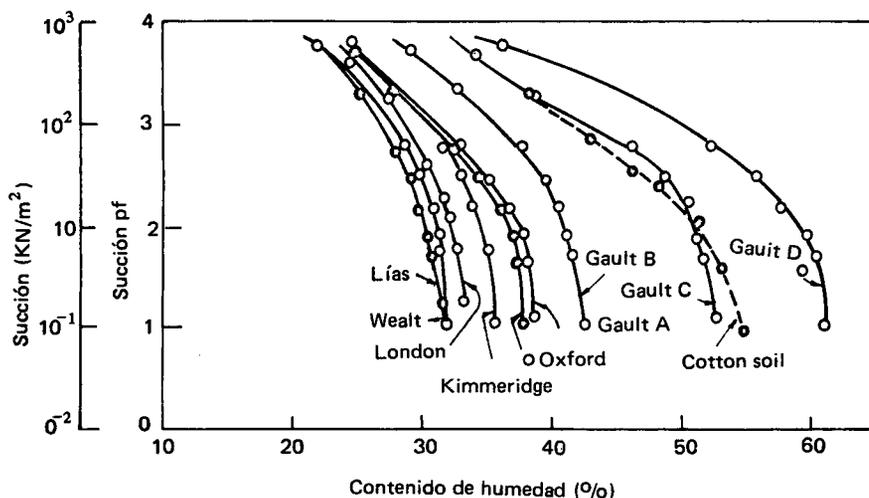


Fig. 13. Relación entre la succión del contenido de humedad para suelos arcillosos inalterados. (Después de Black et al, 1958).

Esta ecuación se ha encontrado adecuada para propósitos de Ingeniería (Bishop y Skinner, 1977) cuando las estructuras del suelo son relativamente compresibles.

La ecuación que expresa los cam-

bios en deformación volumétrica ΔV , se puede escribir de la siguiente forma:

$$-\Delta \left(\frac{dv}{v} \right) = C \Delta (\sigma - u)$$

$$-\Delta \left(\frac{dv}{v} \right) = C \Delta \sigma'$$

donde C = compresibilidad volumétrica del suelo.

Los cambios en el esfuerzo efectivo en suelos saturados se producen de diferentes maneras, ya sea por:

a) Cambios en el esfuerzo total causados por la deposición o erosión de la sobrecarga, o por fuerzas tectónicas, o por excavaciones y rellenos realizados por el hombre.

b) Cambios en la presión de poros originados en la elevación o descenso del nivel freático ya sea por efectos de bombeo, drenaje, inundación, etc., o desecación debida a presencia de estructuras calientes (tuberías, hornos, calderas), el clima o la vegetación. En los casos de desecación por clima o vegetación, los esfuerzos totales permanecen sensiblemente constantes (considerando despreciable el peso de los árboles) y por lo tanto los cambios en la deformación volumétrica de un suelo totalmente saturado se expresa como:

$$\Delta \left(\frac{dv}{v} \right) = C \Delta u$$

Algunos autores han modificado la ecuación de esfuerzos efectivos propuesta por Terzaghi para acomodarla a la situación de suelos no saturados. En la actualidad se considera que la siguiente expresión presentada por Bishop (1959) es la más adecuada y general.

$$\sigma' = \sigma - ua + \chi (ua - u\omega)$$

donde:

ua = presión del aire de los poros

u ω = presión del agua de los poros

χ = coeficiente función del tipo de suelo y grado de saturación.

Bishop et al (1960) demostraron que la anterior ecuación controla la resistencia al corte de suelos parcialmente saturados y Blight (1965) encontró que en general también es aplicable para predecir los cambios de volumen.

Jennings y Kerrich (1963) explicaron en términos del esfuerzo efectivo la manera como se produce la disminución del volumen del suelo

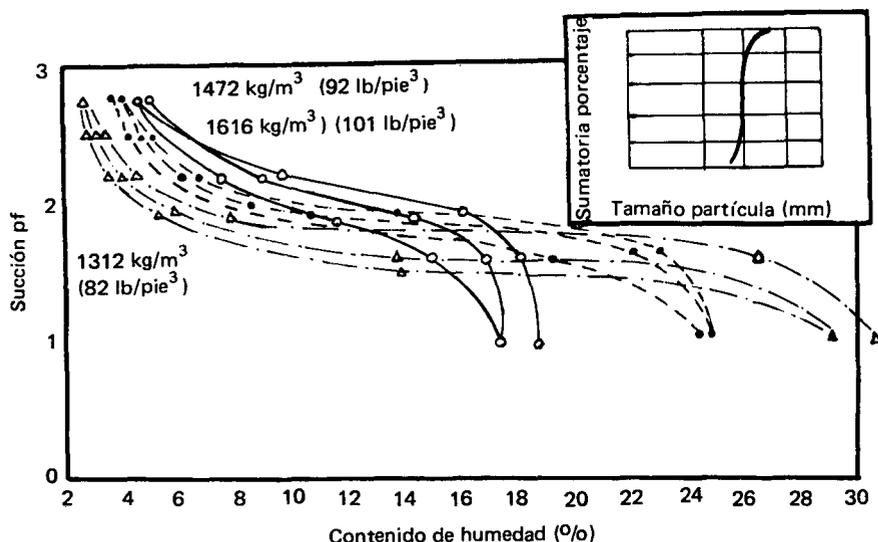


Fig. 14. Relación entre la succión y el contenido de humedad para diferentes densidades de una arena fina. (Después de Black et al, 1958).

durante el desecamiento, o el aumento de volumen originado por el humedecimiento o por el corte de un árbol. En la Figura No. 15, el esfuerzo efectivo a una profundidad Z cambia entre un valor inicial ML, antes de plantar el árbol, a un valor más alto, KL, cuando se genera la desecación por la succión de las raíces, y como consecuencia se presenta una disminución del volumen de la masa de suelo desecada. El proceso contrario se origina cuando se corta un árbol, produciéndose con el tiempo una disminución del

esfuerzo efectivo y el respectivo aumento de volumen. En la Figura mencionada, la curva de p_i'' representa la succión inicial en el suelo que se convierte a presión de poros u_i multiplicándola por el factor X_i . De esta forma tenemos la curva OMD. La presión de poros final, u_f multiplicándola por el factor X_f tenida multiplicando la curva de succión final p_f por el valor U_f . La curva DLF representa la variación con la profundidad de los esfuerzos totales, los que permanecen aproximadamente constantes.

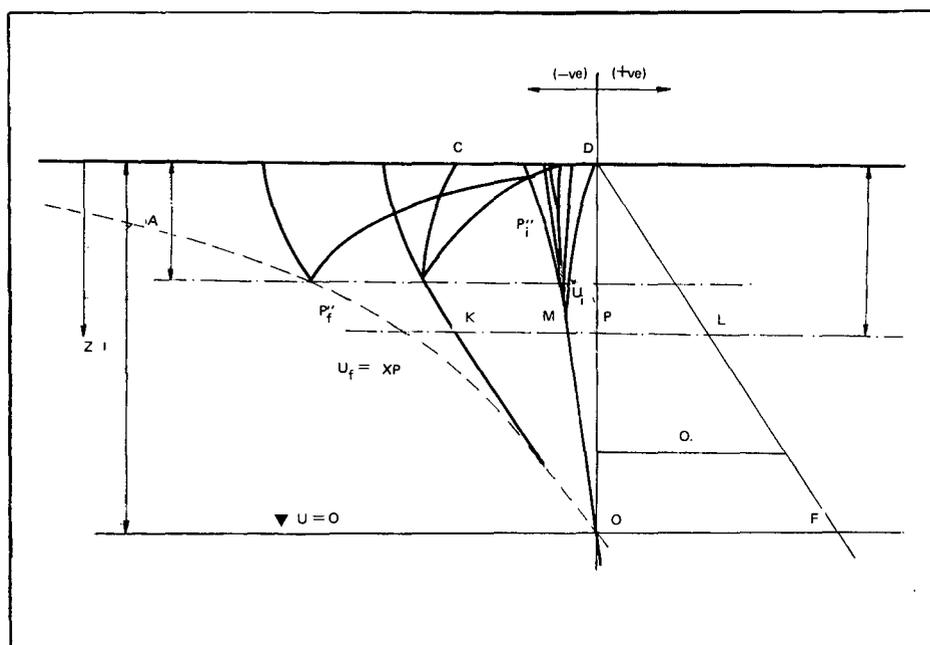


Fig. 15. Cambios en el esfuerzo efectivo durante los procesos de contracción e hinchamiento. (Después de Jennings y Kennich, 1963).

La profundidad D es la zona de influencia estacional dentro de la cual oscila la presión del agua. Es interesante observar que esta profundidad de influencia estacional es mucho menor que la profundidad hasta la cual se presenta la desecación o hinchamiento, normalmente limitada por la profundidad del nivel freático.

Daños causados por árboles

Numerosos trabajos se han presentado en la literatura informando de daños causados por árboles sobre estructuras livianas. Ward (1947) y Skempton (1954) estudiaron fallas en fundaciones originadas en el desecamiento del suelo por árboles en las inmediaciones. Samuels et al (1974) analizaron los daños causados casas de un piso por humedecimiento e hinchamiento del suelo producidos al cortar unos olmos grandes antes de la construcción. Bozozuk et al (1960) determinaron los movimientos presentados en cercanías de olmos plantados en la arcilla Leda del Canadá, mientras que Hamilton (1963), Russam et al (1961) y Black et al (1958), han tratado de relacionar, con relativo éxito, los movimientos del terreno a diferentes parámetros climáticos.

Fallas en pavimentos ocasionadas por árboles son poco mencionadas en la literatura. Una de ellas es la de Russam et al (1965), quienes realizando una investigación para establecer la influencia de diferentes bermas en una carrera experimental en Kenya, donde se varió el talud y el recubrimiento, encontraron que el pasto kikuyu produce vigorosos ciclos de humedecimiento y secado que fisura el pavimento adyacente longitudinalmente. En Bogotá, sin embargo, los daños propiciados por los árboles ornamentales son importantes y fácilmente detectables mediante una observación atenta de sus calles, especialmente en la zona norte que es la más arborizada. Con el fin de conocer un orden de magnitud del valor de los daños, la Facultad de Ingeniería decidió adelantar una inspección minuciosa de las calles delimitadas entre las 57 y 127 y las carreras 7a. y 30, elaborando al mismo tiempo el pre-

◀ supuesto de los costos de las reparaciones. Un grupo de tres estudiantes recorrió la zona anteriormente mencionada realizando un inventario en un formato como el que se presenta en la Tabla No. 1. De acuerdo con la intensidad de las fallas se establecieron cinco niveles de daños que van desde un valor 0, cuando no se detectan señales de distorsiones en

el pavimento con árboles en sus zonas verdes adyacentes, hasta un valor 5, cuando se producen grandes hundimientos con falla de la calzada y grietas con anchos mayores de 5 cms., tal como se observa en la Tabla No. 2. En las figuras Nos. 16, 17 y 18, se muestran esquemáticamente tres clases de fallas correspondientes a diferentes niveles de

daños, mientras que en la Figura No. 19, mapa de Bogotá, se han señalado las calles afectadas.

Tomando dos o tres sitios típicos de cada nivel, se establecieron dos factores de influencia, uno longitudinal y otros transversal, de la incidencia de las fallas en pavimentos causados por cierto número de árboles, tal como se muestra en la Tabla No. 3. Con estos factores y una vez asignados los correspondientes niveles a las vías donde se encontraron daños (Figura No. 19), se obtuvo la Tabla No. 4 que indica las áreas de pavimento afectado, en metros cuadrados.

Teniendo en cuenta la Resolución No. 7125 emanada de la Secretaría de Obras Públicas del Distrito "por la cual se fijan los precios de mano de obra, equipo pesado, materiales y obras de pavimentación para el período comprendido entre el 1o. de enero y el 30 de junio de 1979" y suponiendo determinadas clases de reparaciones, basadas en el nivel de daños y de acuerdo con las soluciones de la Secretaría de Obras Públicas, variando entre la simple nivelación por colocación de base y rodadura asfáltica para el nivel 2, hasta la demolición del pavimento existente, la excavación de base y sub-base con la posterior colocación de nuevas capas estructurales, para el nivel 5, se obtuvo la Tabla No. 5 que señala un costo total de las reparaciones a acometer en agosto de 1979, de \$39'241.780.00. Este valor constituye aproximadamente el 11% del presupuesto total anual de la Secretaría y el 30% del dedicado a inversiones.

Algunas soluciones

Las posibles soluciones se dividen en las que es necesario adoptar para resolver el problema de las especies ya plantadas, por una parte, y la forestación ornamental que se debe dar a la ciudad en el futuro. Entre las primeras están las siguientes:

1. Tumbiar los árboles. Es aconsejable sólo en casos extremos debido a las grandes opiniones y protestas.

Tabla 1.- EVALUACION DE DAÑOS		HOJA <input type="checkbox"/>								
PAVIMENTO Rígido _____ Flexible <input checked="" type="checkbox"/>		TRAMO	DE							
LOCALIZACION <u>Cll. 94 Cra. 16</u>			0	30	60	90	120	150	180	
LONGITUD DEL SITIO <u>240 MTS.</u>		A	30	60	90	120	150	180	210	
FECHA <u>Noviembre /78</u>										
TIPO DE FISURACION										
	Longitudinal		X	X	X	X	X			
	Transversal									
	Concéntrica							X	X	
	Polédrica									
TAMAÑO DE LA GRIETA										
	Menor de 1/8"		X	X				X	X	
	Mayor de 1/4"									
	Mayor de 5 cms.				X	X	X			
FALLA										
	Local							X	X	
	Continua		X	X	X	X	X			
	Longitudinal									
	Transversal									
	Superficial		X	X				X	X	
	Profunda				X	X	X			
INFLUENCIA										
	Transversal									
	- media calzada o más				X	X	X			
	- menos de media calzada		X	X				X	X	
	Longitudinal (mts.)		30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	
ARBOL										
	Especie		U	U,P	U,P	U	U	U,P	U,P	
	Altura (mts.)		15.0	16.5	13.5	17.5	16.5	13.0	13.6	
	Diámetro (cms.)		51	49	51	67	53	38	50	
	Distancia a la calzada (mts.)		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
	Número de árboles cercanos		5	5,2	4,1	4	5	3,1	2,1	
	Separación entre árboles (mts.)		20.	10.	10.	20.	20.	10.	10.	
SEPARADOR										
	Ancho (mts.)		7.45	7.45	7.45	7.45	7.45	7.45	7.45	
	Tipo									
	- con zona verde		X	X	X	X	X	X	X	
	- en concreto									
OBRAS DE MEJORAMIENTO										
	Mejoras anteriores									
	- parcheo		X	X	X	X	X	X	X	
	- reconstrucción-calzada									
	Mejoras propuestas									
	- corte de raíces		X	X	X	X	X			
	- arreglo de calzada		X	X	X	X	X	X	X	
	- parcial		X	X	X	X	X	X	X	
	- total									

en contra que se originarían, provenientes de diferentes sectores de la ciudadanía y en especial de los ecologistas.

2. Poda continuada. Es recomendable en particular si se realiza desde temprana edad. De esta forma se limita la extensión de las raíces del árbol, al impedirle que crezca en altura y que transpire por un follaje abundante. Exige cuadrillas de trabajadores dedicados a esta labor en forma permanente.

3. Corte de Raíces. Se efectúa sobre aquellas que se introducen en las capas estructurales del pavimento o en la subrasante, excavando en la zona verde adyacente y cortando las que se encuentren más superficiales (hasta 1.0 m. ó 1.5 m.). Recientemente la Secretaría de Obras Públicas empezó a utilizar esta solución, con resultados aparentemente positivos ya que no se han tenido que realizar nuevas reparaciones (e.g. Calle 92 entre carreras 11 y 15, desde hace año y medio).

Las soluciones sobre la forestación futura son dos básicamente:

1. Adelantar estudios minuciosos sobre las especies plantadas en la actualidad que permitan establecer unas normas mínimas de sembradío,

Nivel de daño	Tipo de Daños	Convención
0	No existen daños.	Color verde
1	En la actualidad no existen daños, pero se observan parcheos.	Color azul
2	Pequeños hundimientos locales, sin grietas	Color amarillo
3	Hundimientos locales y grietas mayores de 1/8"	Color naranja
4	Grandes hundimientos sin falla de calzada pero con grietas mayores de 1/4"	Color café
5	Grandes hundimientos con falla de calzada, grietas mayores de 5 cm. y profundas	Color rojo

TABLA 2 Niveles de daños (Después de Cardona et al, 1979).

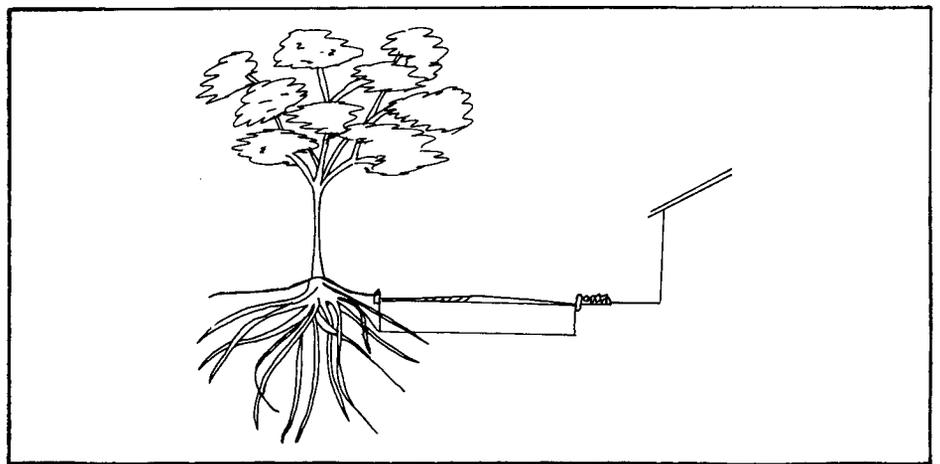


Fig. 16. Nivel 3. Hundimientos locales y grietas superficiales.

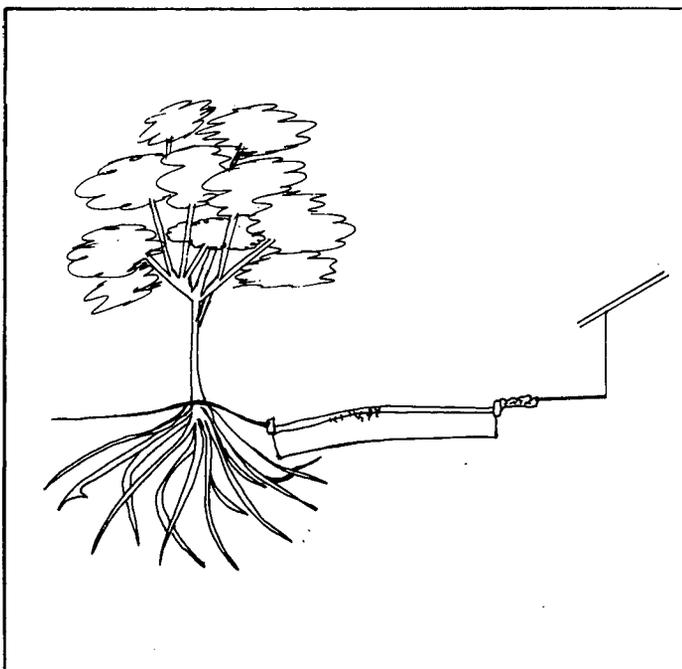


Fig. 17. Nivel 4. Grandes hundimientos sin falla en la calzada y grietas mayores de 0,6 cm.

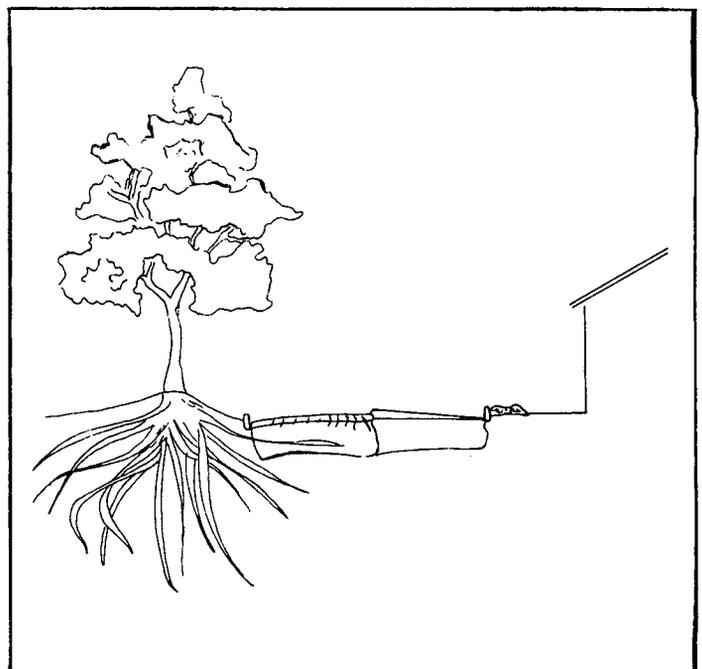


Fig. 18. Nivel 5. Grandes hundimientos con falla de calzada y grietas mayores de 5 cm.

Nivel	Avenidas	Longitud Mts.	Influencia Long.	Trans.	No. de árboles	Long. de Daño	F.L.
1	Trans. 21	100	1.35	1.30	8	10.80	0.108
	Trans. 24	150	1.60	1.60	12	19.20	0.128
	Calle 63	120	0.90	1.60	11	11.70	0.080
2	Av. 11	100	3.50	0.80	9	31.50	0.315
	Av. 13	100	2.90	1.20	12	34.80	0.348
	Av. 63	100	2.60	1.00	11	28.60	0.286
3	Av. 92	150	4.50	1.90	11	49.50	0.330
	Av. 19	150	6.00	2.00	10	60.00	0.400
	Av. 100	200	6.60	2.10	16	105.60	0.528
4	Av. 116	150	9.00	2.80	8	72.00	0.480
	Av. 94	180	7.50	3.20	12	90.00	0.500
5	Av. 94	:Se midió la longitud del daño reparado sobre la longitud total dando un factor de longitud igual a 0.82.					

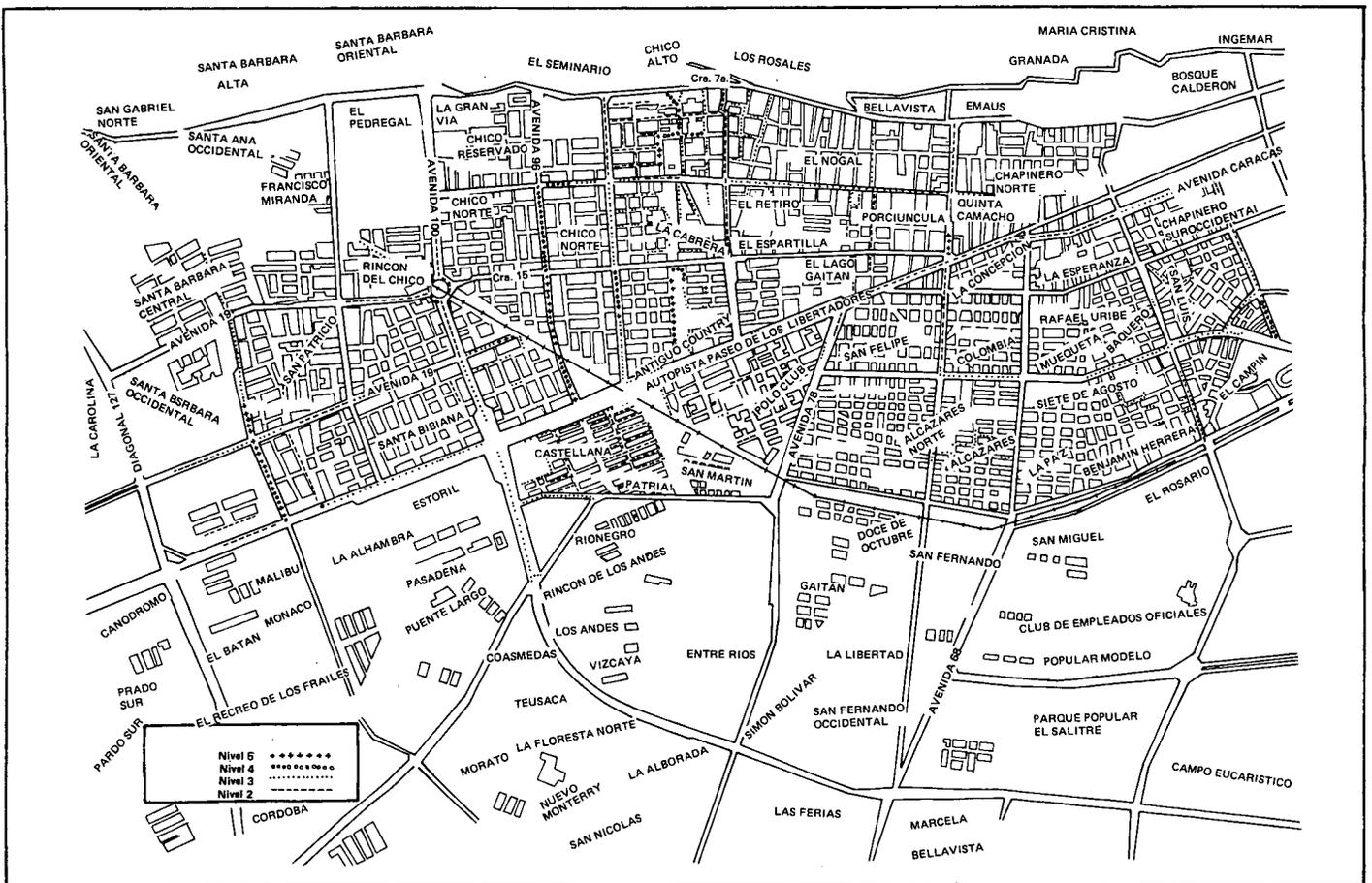
Tabla 3. Factores transversal y de longitud. (Después de Cardona et al, 1979).

Nivel de Daño	Longitud Medida ms.	Factor de Longitud	Longitud Efectiva ms.	Influencia en el ancho de la calzada	Area de Daños M ²
1	54.320	0.10	5.432	1.50	8.148
2	17.460	0.30	5.238	1.00	5.238
3	26.090	0.40	10.436	2.00	20.872
4	6.500	0.50	3.250	3.00	9.750
5	4.270	0.80	3.416	3.50	11.956

Tabla 4. Cuantificación de daños. (Después de Cardona et al, 1979)

Nivel de Daños	Precio Unitario Reparación/M ²	Cantidad de Obra en M ² (aproximada)	Costo Total
1	—	8.148	—
2	244.85	5.238	1'282.524,30
3	644.05	20.872	13'442.611,60
4	845.47	9.750	8'243.332,50
5	1.361.10	11.956	16'273.311,60
TOTAL			\$39'241.780.00

Tabla 5. Costos totales de reparación en la zona estudiada, para agosto de 1979. (Después de Cardona et al, 1979).



relacionadas con las distancias mínimas a los pavimentos, áreas aferentes de zonas verdes para cada árbol, distancia entre ellos y perfiles de suelo donde es aconsejable colocarlos obteniendo finalmente una gráfica de diseño como la mostrada en la Figura No. 20, presentada por Bozozuk et al (1960) para los olmos.

2. Realizar una forestación con especies autóctonas, originarias de los mismos pisos térmicos de la ciudad y de las cuales se tenga algún conocimiento de su comportamiento. Sobre este aspecto, el Dr. Luis E. Mora, Director del Departamento de Botánica de la Facultad de Biología de la Universidad, viene adelantando una investigación desde hace cinco años en el vivero del jardín Botánico "José Celestino Mutis" de Bogotá, en la cual ha logrado establecer las características generales mencionadas a continuación:

- Sistemas radiculares delgados y superficiales, con capacidad de absorción de agua baja ya que están en su propio medio ecológico.
- Alturas inferiores a 10 ms.

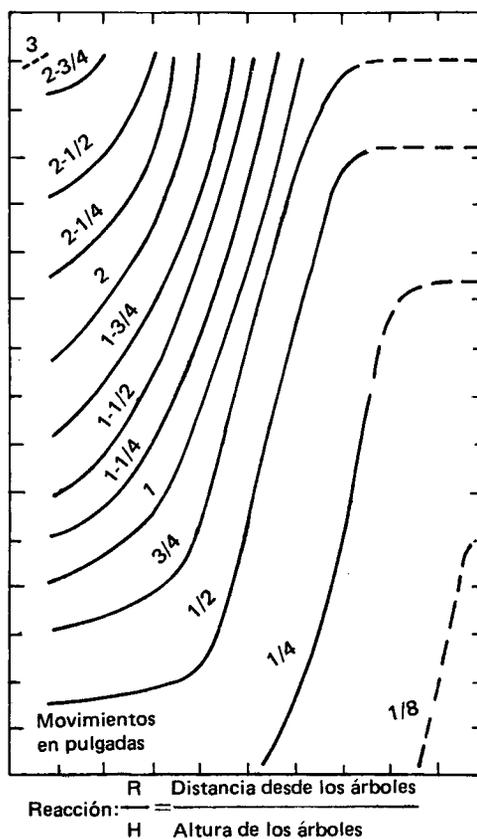


Fig. 20. Variación del movimiento vertical del terreno cerca de árboles en arcilla leda. (Después de Bozozuk et al, 1960).

- Diversidad de follaje, (aparasoladas, cónicas o esféricas) y con

florescencia vistosa y variada.

Entre las especies analizadas, recomendables para realizar la forestación de la ciudad y algunas de ellas sembradas actualmente en la zona verde de la Autopista Eldorado, en proceso de experimentación, están las siguientes:

- Acacia tomentosa
- Alcaparro de Bogotá (cassia velutina)
- Amarabollo
- Arboloco (plymnia priamidalis)
- Borrachero (datura arbórea)
- Caucho (ficus soatensis o ficus tequendamae)
- Cedro (cedrenla bogotenses)
- Cerezo (pronus serotina)
- Cheflera
- Chirlobirlo
- Floripondio (dotura sanguínea)
- Manos de oso
- Palma de cera (ceroxylon quinduiense)
- Paloblanco o palo mulato (ilex runtiana)
- Papayo o papayuela (corica candamarcensis)
- Pimienta (schinus molle)
- Pino ayuelo o pino colombiano
- Raque (abalea estipulares)
- Sangregado (croton bogotanus)

Sietecueros, mayos o san antonios (tibouchina)

Te de Bogotá o palo blanco (Symlocos theiformes)

Trompeto (bocconia frutensis)

Une (dahnopis bogotensis)

Urapa (cytharexylon subtraresceus)

Conclusiones

1. Las especies foráneas empleadas en la forestación ornamental de Bogotá causan en general un desecamiento continuo del suelo debido a sus grandes necesidades de consumo de agua, a las altas presiones de succión que pueden ejercer, y a una plantación sin patrones adecuados, originando daños en sardineles, andenes, edificaciones livianas, y fallas periódicas en los pavimentos, especialmente de la zona norte de la ciudad, que producen disminución en los niveles de servicio para los automovilistas y consumen un buen porcentaje del presupuesto de la Secretaría de Obras Públicas.

2. Existen algunas soluciones sin experimentar suficientemente, como son la poda continua y el corte de raíces, que pueden colaborar reduciendo los daños propiciados por los árboles en los pavimentos, y por

lo menos alargando los períodos de reparación.

3. Es ampliamente recomendable acometer la forestación ornamental futura de la ciudad empleando especies autóctonas, las cuales han demostrado bajo consumo de agua, reducida agresividad con otras especies y mínimos problemas de desecamiento del suelo.

4. Es aconsejable, sin embargo, para perfiles de suelo muy arcillosos como los de la zona norte de Bogotá, utilizar la siguiente recomendación de Croney (1977): "Cuando el suelo es arcilloso, con un índice de plasticidad superior a 35%, los árboles de bosque no se deben sembrar a distancias menores de 15 m del borde de la vía, y se deben evitar las variedades de crecimiento rápido como los álamos".

Reconocimientos

Las tesis de grado de Ducan P. Nicholson en el Imperial College de Londres, y de Miguel A. Cardona A. Fabio Mojica F. y Luis A. Villate S. en la Universidad Nacional, fueron ampliamente utilizadas para la elaboración de este trabajo. Se agradece

la colaboración prestada por el Dr. Luis E. Mora durante la realización de la segunda, en el reconocimiento de las especies plantadas en las calles de la ciudad y por informaciones no publicadas sobre sus investigaciones con las especies nativas, así como la ayuda del Ing. Libardo Prieto de la Secretaría de Obras Públicas, quien suministró datos sobre costos de las reparaciones.

Glosario de términos

Estoma: Abertura, poros o cavidades, localizadas principalmente en el anverso de las hojas y a través de las cuales se realiza la transpiración.

Raíz Principal: Raíz descendente de la planta, continuación del tronco.

Traqueidal: Celda elongada, ahusada, en forma de traquea y atravesada por poros.

Turgencia: Fenómeno en el cual una célula se llena de agua produciendo su máxima presión e hinchamiento. Generalmente se da en los estomas.

Xylema: Paquete vascular que compone un tejido leñoso. ♦

BIBLIOGRAFIA

- Aitchison, G.D. (1961) "Relation ship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils". *Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, pp. 47-52.
- Bishop, A.W. (1959) "The principle of effective stress". *Teknisk Ukeblad*, 39, pp. 859-863.
- Bishop, A.W., Alpan, I., Blight, G.E. and Donald, I.B. (1960) "Factors controlling the strenght of partly saturated cohesibe soils", *Proc. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, 503-532 (A.S.C.E.).
- Bishop, A.W., Skinner, A.E. (1977) "The influence, of high pore-water pressure on the strength of cohesionless soils", *Transactions Royal Society* 284, 91-170.
- Black, W.P.M., Croney, D., Jacobs J.C. (1958) "Field studies of the movement of soil moisture", *Road Research Laboratory*, T.P. No. 41, London.
- Blight, G.E. (1965), "A study of effective stresses for volume change", *Moisture Equilibria and Moisture Changes Beneath Covered Areas*. Butterworths Sydney, 259-269.
- Bozozuk, M. and Burn, K.N. (1960) "Vertical ground movements near elm trees", *Geotechnique*, 10, 19-32.
- Cardona A.M.A., Mojica F.F. y Villate S.L.A. (1979) "Evaluación de daños en pavimentos causados por árboles en la zona norte de Bogotá". *Tesis de grado*. U. Nacional, 230 p.
- Croney D. (1977) "The Design and Performance of Road Pavements", Transport and Road Research Laboratory, London, H.M.S.O. 657 p.
- Hamilton, J.J. (1963) "Volume changes in undisturbed clay profiles in Western Canada", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 1, No. 1, 27-42.
- Holmes, J.W. (1955) "Water sorption and swelling of clay blocks", *Journal of Soil Science*, 6, 2, 200-208.
- Jennings, J.E. and Kerrich, J.E. (1963) "The heaving of buildings and the associated economic consequences", *Trans. S.A. Instn. of Civil Engineers*.
- Kramer, P. y Kozlowsky T. (1960) "Physiology of Trees" Mc-Graw Hill, New York.
- Lyford, W.H. and Wilson, B.F. (1983) "Development of the root system of acer rubrum L." *Harvard University*.
- Nicholson, D.P. (1977) "The interaction of soil, climate and vegetation with structural movements and ground stability", M. Sc. Thesis, Imperial College, 94 p.
- Russam, K. and Coleman J.D. (1961) "The effect of climatic factors on subgrade moisture conditions", *Geotechnique*. 11, 22-28.
- Russam, K. y Dagg M. (1955) "The effect of verge slope and cover on soil moisture distribution under a road in Kenya", *Moisture Equilibria and Moisture Changes Beneath Covered Areas*. Butterworths, Sydney, pp. 250-269.
- Samuels, S.G. and Cheney, J.E. (1974) "Long-term heave of a building on clay due to tree removal" *Proceedings, on the settlement of Structures*. British Geotechnical Society, 212-220.
- Scholander, P.F. (1971) "Inhibition and osmosis in plants", The Bio Source Book, Harper and Row, London.
- Skempton, A.W. (19454) "A Foundation failure due to clay shrinkage caused by poplar trees", *Proc. Institution of Civil Engineers*, 1, 3, 66-83.
- Terzaghi, K. (1923). "Calculation of the porosity index of clay from hydrodynamic pressure conditions", *Sitzbericht (A b t l l a)*, Academic der Wissenschaften. Vienna, pp. 132.
- Ward, W. H. (1947) "Effects of fast growing trees and shrubs on Shallow foundations" *Journal Inst. Landscape Arch*". 11, 7-16.
- Ward, W.H. (1953) "Soil moisture and weather", *Proceedings 3 rd Intd. Cont. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, I.S.S.M. F.E. 1. 477-482.