

Evaluación de la probabilidad de falla de árboles urbanos usando tecnologías no destructivas

Urban tree risk assessment using non-destructive technologies

Avaliação de risco de árvores urbanas usando tecnologias não destrutivas

Ana Paula Coelho-Duarte ¹, Óscar Vallejos-Barra ², Mauricio Ponce-Donoso ³

Recibido: 12/06/2023

Aceptado: 12/06/2023

Resumen. - Los árboles urbanos aportan servicios ecosistémicos de gran importancia para las ciudades. Para que estos servicios sean aprovechados es importante que los árboles estén en buen estado, minimizando el riesgo a las personas, bienes y actividades esenciales debido a la caída de ramas o árboles enteros. Su condición debe ser debidamente evaluada, favoreciendo su presencia en la ciudad con niveles aceptables de riesgo. El objetivo del trabajo fue comparar la valoración de la probabilidad de falla de árboles urbanos utilizando tres niveles de evaluación del riesgo, estudiando la combinación de la evaluación visual con resultados obtenidos a partir de tecnologías no destructivas. Fueron evaluados 32 árboles de los géneros *Eucalyptus* y *Tipuana*, ubicados en un parque urbano de Montevideo, Uruguay. Dos evaluadores, con experiencia en evaluación visual y en equipamientos no destructivos, utilizaron tres niveles de evaluación según la norma ANSI A300. Para los niveles 1 y 2 se utilizaron descriptores basados en el método ISA/BMP. Para el nivel 3 fueron realizadas evaluaciones con un penetrógrafo y un tomógrafo acústico. Las evaluaciones visuales básicas y los análisis de los equipamientos fueron vinculantes, especialmente en árboles que tenían alguna evidencia de problemas estructurales en el tronco.

Palabras clave: arboricultura, clasificación del riesgo de los árboles, árboles urbanos, árbol peligroso, bosque urbano.

Summary. - *Urban trees provide ecosystem services of great importance to the city. To take advantage of these services, it is important that the trees are in good condition, minimizing the risk to people, goods, and essential activities due to the fall of branches or entire trees. Therefore, their condition must be duly evaluated to favor their presence in the city with acceptable levels of risk. The main goal of this research was to compare assessments of likelihood of failure of urban trees using three levels of risk assessment, as well as to study the combination of visual assessment with results obtained from non-destructive technologies. Thirty-two trees of the genera Eucalyptus and Tipuana, located in an urban park in Montevideo, Uruguay, were evaluated. Two assessors with experience in visual assessment and non-destructive equipment used three levels of assessment according to ANSI A300. For levels 1 and 2, descriptors based on the ISA/BMP method were used.*

¹Doctora en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, paula.coelho@fagro.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9914-0032>

²Doctor en Ciencias Forestales. o.vallejos.barra@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0155-0835>

³Doctor en Ciencias Forestales. Sociedad Chilena de Arboricultura, mauricio.ponce.donoso@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9949-2057>

For level 3, evaluations were performed with a drilling resistance equipment and an acoustic tomograph. The basic visual assessments and non-destructive analyses could be linked, especially in trees that had some evidence of structural problems in stems.

Keywords: *arboriculture; tree risk rating; urban trees; hazardous tree; urban forest.*

Resumo. - *As árvores urbanas fornecem serviços ecossistêmicos de grande importância para a cidade. Para usufruir destes serviços, é importante que as árvores se encontrem em bom estado, minimizando o risco para pessoas, bens e atividades essenciais devido à queda de ramos ou árvores inteiras. Portanto, sua condição deve ser devidamente avaliada para favorecer sua presença na cidade com níveis aceitáveis de risco. O principal objetivo desta pesquisa foi comparar avaliações de probabilidade de falha de árvores urbanas usando três níveis de avaliação de risco, bem como estudar a combinação de avaliação visual com resultados obtidos de tecnologias não destrutivas. Foram avaliadas 32 árvores dos gêneros Eucalyptus e Tipuana, localizadas em um parque urbano em Montevideú, Uruguai. Dois avaliadores com experiência em avaliação visual e equipamentos não destrutivos utilizaram três níveis de avaliação de acordo com ANSI A300. Para os níveis 1 e 2, foram utilizados descritores baseados no método ISA/BMP. Para o nível 3, as avaliações foram realizadas com um equipamento de resistência à perfuração e um tomógrafo acústico. As avaliações visuais básicas e as análises não destrutivas puderam ser vinculadas, principalmente em árvores que apresentavam alguma evidência de problemas estruturais nos fustes.*

Palavras-chave: *arboricultura; classificação de risco das árvores; árvores urbanas; árvore perigosa; floresta urbana.*

1. Introducción. - Los árboles urbanos aportan servicios ecosistémicos de gran importancia en la ciudad [1; 2; 3; 4; 5]. Sin embargo, es importante que los árboles estén en buenas condiciones para que su riesgo sea reducido [6; 7]. En caso contrario, la caída de ramas o árboles enteros pueden llegar a causar daños a personas, bienes materiales o cortes de servicios esenciales [8]. Dado que eliminar el riesgo total del arbolado urbano es una actividad económica y técnicamente inviable, evaluar la condición del árbol tiene como objetivo reconocer y reducir los potenciales riesgos, conservando una cobertura deseable [9; 10; 8].

La Norma ANSI A300 [11] proporciona directrices para la evaluación del riesgo. Según esta norma, los métodos pueden ser divididos en tres niveles de aplicabilidad: nivel 1 - visual limitado, donde la evaluación puede ser realizada desde un móvil en movimiento; nivel 2 - visual básica, cuyo uso se apoya en un formulario y herramientas sencillas, como martillo de goma, binocular, entre otros; y el nivel 3 - evaluación avanzada, donde se incorporan equipos avanzados para detectar descomposición y calcular la resistencia remanente, como son tomógrafo sónico, penetrógrafo o radar de suelo.

Los métodos visuales plantean una incertidumbre vinculada a los niveles 1 y 2, que se relaciona a diversos factores, como la experiencia y el conocimiento que el evaluador tiene respecto de las características de la especie a evaluar. En algunos casos los defectos son muy visibles, como las grietas o la presencia de cuerpos fructíferos [12], pero gran parte de ellos no son fácilmente identificables, lo que obliga muchas veces a realizar suposiciones. Para disminuir esta incertidumbre es que en algunos casos se recomienda la evaluación de nivel 3, que incorpora el uso complementario de instrumentos de análisis, llamados métodos no destructivos [13]. El estudio que integra estos métodos e instrumentos es de reciente data [14].

Actualmente han sido estudiados y adaptados al ambiente urbano diversos tipos de instrumentos como penetrógrafos, detectores ultrasónicos, medidores de conductividad eléctrica y radares [15; 16; 17; 18; 19]. Estos métodos no destructivos son usados para la evaluación de la condición interna de troncos y ramas, y la distribución de raíces. Si bien son instrumentos costosos, proporcionan buena información y deberían ser utilizados de forma complementaria a la evaluación visual del riesgo [20; 21].

Un estudio realizado en Estados Unidos [22] compara los tres niveles de evaluación asociada a la probabilidad de falla, realizado en cinco árboles por 70 evaluadores, considerando la Norma ANSI A300 [11]; encuentran que las medias de valoración a través del método de evaluación visual limitado (nivel 1) son menores que para los métodos visual básico (nivel 2) y avanzado (nivel 3), mientras que la diferencia entre estos últimos dos es menos pronunciada. Al respecto, concluyen que ninguno de los niveles de evaluación reduce las diferencias entre evaluadores.

En las últimas décadas diversos estudios han sido realizados con el objetivo de evaluar la efectividad de la utilización de diferentes tecnologías para detección de pudriciones en árboles urbanos. Autores investigan sobre la aplicación de tomógrafo de impedancia eléctrica, ultrasonido, georadar y penetrógrafo para la detección de pudrición en árboles de *Platanus hybrida* [23]; encuentran que el ultrasonido es una tecnología efectiva para este tipo de evaluación, siendo capaz de ubicar y estimar el tamaño de las pudriciones. Otros investigadores muestran resultados de evaluaciones realizadas con tecnologías no destructivas y con evaluaciones visuales [18; 20]; en ambos estudios se considera que la combinación de la evaluación visual con los resultados del tomógrafo acústico y del penetrógrafo es capaz de estimar y ubicar áreas con deterioro.

Por otro lado, en una comparación de dos modelos de tomógrafos acústicos, otro estudio señala que la mayor fuente de error es la posición de los sensores, dado que afecta la velocidad estimada de la onda de tensión, así como la forma del tomograma y el tamaño del defecto [24]. Por consiguiente, para producir tomogramas aceptables y repetibles de árboles con formas complejas,

es esencial medir la posición de los sensores con precisión.

La presente investigación tuvo como objetivo comparar la valoración de la probabilidad de falla de árboles urbanos utilizando tres niveles de evaluación del riesgo, así como estudiar la combinación de la evaluación visual con resultados obtenidos a partir de un tomógrafo sónico y un penetrógrafo.

2. Materiales y métodos. –

2.1 Área de estudio. - El trabajo de campo fue realizado en el Parque José Batlle y Ordóñez, Montevideo, Uruguay (34°53'45"S y 56° 9'33"O). La ciudad se ubica a 136 msnm y posee una población de 1,3 millones de habitantes, representando casi el 50% del total de la población del país. Posee un clima subtropical húmedo de Köppen-Geiger (Cfa) con una temperatura media anual de 16,7°C y una precipitación anual de 1.100 mm; el invierno es húmedo, ventoso y nublado, con ocurrencia de temporales y tormentas; mientras que el verano es cálido y húmedo, con poco viento [25].

2.2 Árboles, evaluadores y métodos. - Fueron seleccionados 16 ejemplares adultos del género *Eucalyptus* y 16 de *Tipuana tipu*, ampliamente presentes en el parque, que se alinean en aceras, áreas internas y senderos. La mayoría de los árboles seleccionados estaban ubicados donde prevalecía el movimiento de vehículos y peatones, aunque también se seleccionaron algunos ubicados en áreas al interior del parque, que presenta un uso ocasional a intermitente. La selección consideró las distintas situaciones vinculadas a los componentes de probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencia, incorporando árboles en todos los posibles niveles de riesgo.

En los 32 árboles fueron aplicados tres niveles de evaluación del riesgo —nivel 1, nivel 2 y nivel 3—. Las evaluaciones fueron llevadas a cabo entre los meses de octubre y diciembre de 2018, realizadas de forma individual por dos profesionales con experiencia en evaluaciones de riesgo del arbolado urbano, tanto visuales como a través de las tecnologías no destructivas. Para el nivel 1 los evaluadores observaron por aproximadamente 5 minutos cada árbol y marcaron la opción entre las categorías de probabilidad de falla que mejor representaba cada situación, basadas en las categorías “improbable, posible, probable e inminente” descritas en el método “*Best Management Practices – Tree Risk Assessment*” – ISA BMP [26]. Para el nivel 2 también fue utilizado este método de evaluación visual, con las mismas categorías de probabilidad de falla, pero con una evaluación que requirió mayor tiempo. A fin de analizar la información sobre los daños potenciales que podrían causar la falla de los ejemplares evaluados, fue calculado el porcentaje de los defectos identificados y fue extraída la información del tamaño de la parte más probable de fallar.

Para el nivel 3 fueron realizadas evaluaciones con dos instrumentos no destructivos: el resistógrafo PD400-Serie de IML® y el tomógrafo de impulso 2D (RINNTECH® ARBOTOM®). Para todos los árboles se ajustó el resistógrafo con las velocidades de 25 cm/minuto y 1.500 rotaciones/minuto, para penetración y rotación respectivamente, y se buscó mantener la horizontalidad del equipo (ángulo de entrada de 0°). Los instrumentos fueron posicionados únicamente en el tronco, de acuerdo con la presencia de defectos, y en algunos casos, se llevó a cabo más de una aplicación por árbol. Las evaluaciones con el resistógrafo fueron realizadas en la dirección de o entre los sensores del tomógrafo que presentaban alguna zona con posible deterioro identificado en la imagen del tomograma, y en la misma altura de la medición de éste. Al final de la aplicación instrumental, los evaluadores observaban las imágenes generadas por cada técnica y marcaban en una planilla la categoría de probabilidad de falla correspondiente (improbable, posible, probable e inminente). Para esta actividad fueron utilizadas las imágenes del software del resistógrafo y las

generadas en la aplicación de análisis mecánica del software del tomógrafo con el ajuste automático.

Finalmente, para el procesamiento estadístico las categorías cualitativas fueron transformadas en rangos numéricos de 1 a 4, donde 1 corresponde a la categoría más baja (improbable) y 4 a la más alta (inminente).

2.3 Análisis estadístico. - En el análisis estadístico se incluyeron 192 evaluaciones. Diferencias entre géneros, niveles de evaluación, evaluadores y la interacción entre éstos fueron testeadas utilizando análisis de varianza (ANOVA) a un nivel $P < 0,01$. Para el ANOVA se utilizó un modelo lineal mixto (MLMix), considerando como factor aleatorio el efecto “árbol”, evitando así problemas de falta de independencia y multicolinealidad, dado que todos los niveles fueron aplicados en los mismos árboles. Cuando la hipótesis nula fue rechazada, los promedios fueron comparados utilizando la prueba *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher ($\alpha = 0,01$). Los datos fueron analizados con la función *lmer* de la librería *lme4* de R, interconectado al *software* InfoStat versión 2020 [27]. Asimismo, para construir los gráficos se usó SigmaPlot versión 12.

Los datos del tomógrafo fueron procesados en el software ARBOTOM® a través de *Mechanic Graph*, que presenta las velocidades mínimas, medias y máximas de la propagación de la onda entre los sensores, y que indicaría la pérdida de resistencia mecánica de la parte en función de la forma del tronco, la ubicación y el porcentaje de la zona con decaimiento [28]. Se extrajo información con ajuste automático y manual; el uso del ajuste manual del software consistió en la exclusión de las velocidades detectadas como outliers en el gráfico de estadística del propio software y, a partir de ello, fueron seleccionadas las velocidades mínimas y máximas.

3. Resultados y Discusión. - No hubo diferencias significativas entre los géneros y entre los evaluadores, ni tampoco interacciones entre las variables. A su vez, hubo diferencias significativas ($P < 0,01$) entre los niveles de evaluación (Figura I).

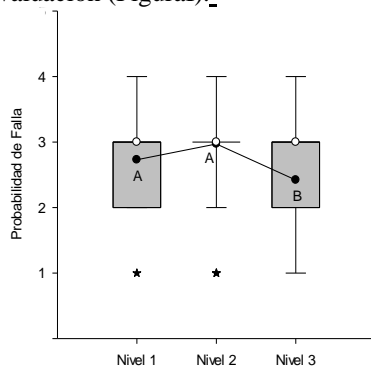


Figura I. Diagrama de caja (barras) para la probabilidad de falla por nivel de evaluación ($P < 0,01$). Media ajustada (puntos negros), medianas (círculos blancos) y valores atípicos (estrellas negras). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (LSD, $P < 0,01$).

Las evaluaciones de nivel 1 y 2 no difirieron estadísticamente, lo que diferencia a lo encontrado por [22], donde encuentran menor promedio en la evaluación de nivel 1, siendo menor inclusive que la evaluación utilizando los equipamientos no destructivos. La diferencia entre los niveles 1 y 2 era esperada, debido a que durante una evaluación limitada, el evaluador no tiene la visión completa del árbol, como lo señalan estos autores. El resultado obtenido puede ser explicado por

la mayor presencia de defectos de fácil visualización en la copa, donde los evaluadores con mayor experiencia fueron capaces de identificar rápidamente los principales problemas. Se observó además que la evaluación de nivel 3, utilizando las tecnologías de diagnóstico, obtuvo un menor promedio que los niveles 1 y 2, pudiendo ser explicado porque en la mayoría de las evaluaciones visuales básicas la parte más probable de fallar fueron las ramas, mientras que la evaluación avanzada se focalizó en el tronco. Otros autores [22] encuentran que el uso del penetrógrafo (nivel 3) no se diferencia de la evaluación visual básica (nivel 2); a su vez, el tomógrafo —que también correspondiente a un nivel 3 de evaluación— obtiene un menor promedio que el nivel 2, resultado similar a lo encontrado en esta tesis.

En general, un cambio del nivel de evaluación de limitado a básico conlleva un aumento en el tiempo de evaluación de 15 a 20 minutos [29], que es más que el doble del tiempo, cuestión que en esta investigación sucedió, pero sin que cambiara la valoración de la probabilidad de falla obtenida. La diferencia principal entre estas dos formas de evaluar el componente sería que, en el nivel 2, el evaluador indica los problemas y los respectivos manejos necesarios para reducir la probabilidad de falla. Esto podría indicar que, en la práctica, sería viable generar un método de nivel 1 con un formulario más robusto, pero de rápida evaluación, para ser utilizado en grandes poblaciones arbóreas —como son los parques urbanos o periurbanos— a fin de detectar y reportar defectos que evidencian situaciones peligrosas, para su posterior manejo.

Cuando se compararon los evaluadores en un mismo nivel de evaluación, no hubo diferencia significativa entre ellos considerando $P < 0,01$, pero lo hubo en un nivel de significancia de 0,05 para los niveles 1 y 2 (Figura II).

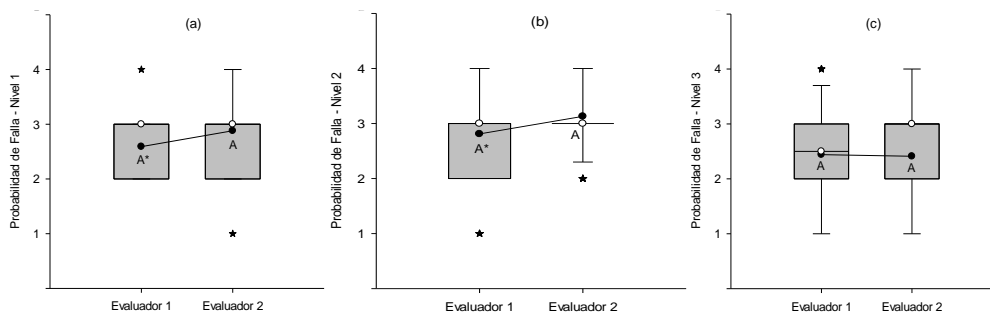


Figura II. Diagrama de caja (barras) para la probabilidad de falla por evaluador para cada nivel de evaluación ($P < 0,01$): (a) Nivel 1, (b) Nivel 2, (c) Nivel 3. Media ajustada (puntos negros), medianas (círculos blancos) y valores atípicos (estrellas negras). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas en las medias determinadas con una prueba de LSD Fisher ($P < 0,01$) y el * representa diferencia significativa con una prueba de LSD Fisher ($P < 0,05$).

Fue posible observar una tendencia en la reducción de las diferencias entre los evaluadores al aumentar el nivel de evaluación con la utilización de los instrumentos. En el trabajo de [22] los autores encuentran una mayor consistencia tanto entre los niveles de evaluación como entre los evaluadores en un árbol sin indicadores externos de pudrición en el tronco, lo que podría explicar los resultados encontrados en la presente investigación, dado que el tronco fue pocas veces considerado como la parte más probable de fallar (solamente en tres de 32 árboles).

Con respecto al análisis de las partes del árbol más probable de fallar, considerado en el nivel 2, se realizaron 143 evaluaciones, de estas 91,6% eran ramas (secundarias y estructurales), 5,6% tronco y 2,8% raíz. Solamente en tres árboles (IDs 06, 11 y 16) el tronco fue evaluado como la parte más probable de fallar, todos del género *Eucalyptus*. Las evaluaciones de raíz, como parte más probable

de fallar, fueron consideradas en otros tres árboles (IDs 01, 02 y 17), dos *Eucalyptus* y una *Tipuana*; mientras que la probabilidad de falla en ramas se analizó para todos los árboles.

El reducido número de árboles en que el análisis del tronco fue considerado en las evaluaciones de nivel 2 (9%) fue similar al porcentaje identificado por [18], donde el 7% de los 147 árboles evaluados visualmente tienen identificados algún defecto estructural en el tronco.

De las evaluaciones con el tomógrafo, se observó que hay diferencias significativas entre los géneros en las velocidades reportadas, con excepción de la velocidad mínima, para ambos ajustes (Cuadros I y II y Figura III), siendo mayores las velocidades en los *Eucalyptus*.

Velocidad	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Mínima	894,63 ± 227,58 A	864,19 ± 146,47 A
Media	1.822,44 ± 298,35 A	1.514,81 ± 149,45 B
Máxima	2.750,88 ± 462,39 A	2.165,88 ± 333,67 B

Tabla I. Valores promedios de velocidades (m/s) obtenidos del tomógrafo con ajuste automático, por género. Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ($P < 0,05$).

Velocidad	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Mínima	537,81 ± 98,69 A	521,94 ± 31,64 A
Media	1.266,06 ± 165,36 A	1.108,94 ± 105,71 B
Máxima	1.994,63 ± 269,54 A	1.696,38 ± 212,70 B

Tabla II. Valores promedios de velocidades (m/s) obtenidos del tomógrafo con ajuste manual, por género. Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ($P < 0,05$).

Al realizar el ajuste manual se observó una reducción de las velocidades, mientras la tendencia entre las especies permanece en ambos tipos de ajuste (Figura III).

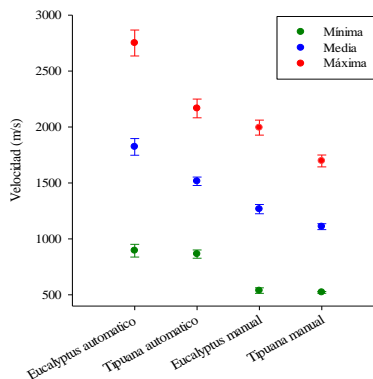


Figura III. Gráfico de dispersión (media y error estándar) para las velocidades mínima, media y máxima por género y tipo de ajuste.

Las mayores velocidades medias y máximas de los tomogramas de los eucaliptos estarían principalmente relacionadas a la mayor densidad de la madera del grupo de especies de este género que fueron evaluadas, que van desde los 625 kg/m³ hasta los 1.220 kg/m³ [30], en comparación con la de tipuana, que varía entre 670 a 750 kg/m³ [31]. La velocidad mínima promedio detectada para el género *Tipuana* con ajuste manual del software fue similar al encontrado por [32], pero las velocidades media y máxima encontradas por el mismo autor son más bajas, lo que indicaría una mejor condición interna del tronco de los árboles encontrados en el Parque José Batlle y Ordóñez, coincidiendo que para ningún árbol de este género el tronco fue considerado como la parte más probable de fallar. Hay que destacar que la aplicación del software para ajustar el límite de velocidades influenció el resultado final del tomograma, que en el trabajo de [32] no se informa. En otra investigación [23], los autores encuentran para maderas de *Platanus hybrida*, con densidades promedio de madera sana entre 769 a 954 kg/m³ y de madera con pudrición de 856 a 858 kg/m³, velocidades estimadas entre 600 y 1.200 m/s, que corresponderían a zonas con decaimiento, y entre 1.200 y mayor a 2.000 m/s para zonas con tejido sano. Este resultado fue similar a las velocidades encontradas con ajuste manual para el género *Eucalyptus*, que también tienen una densidad de tejido sano equivalente, indicando que este ajuste fue más adecuado comparativamente al automático.

Para el índice de pérdida mecánica también hubo diferencia significativa entre los géneros, siendo mayor la pérdida mecánica para el género *Eucalyptus* en ambos ajustes (Cuadro III y Figura IV).

Ajuste	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Automático	-32,31 ± 10,22 A	-22,00 ± 8,74 B
Manual	-8,63 ± 7,48 A	-3,81 ± 5,62 B

Cuadro III. Valores promedios del índice de pérdida mecánica vía tomografía por género (ajustes automático y manual). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ($P < 0,05$).

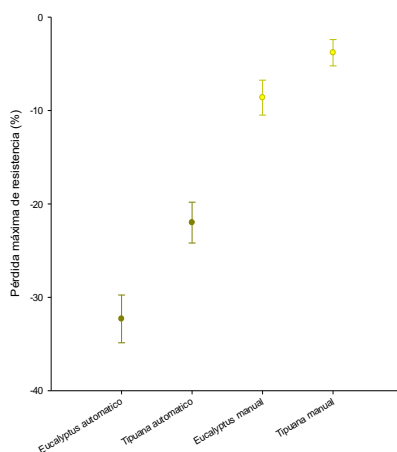


Figura IV. Gráfico de dispersión (media y error estándar) para la pérdida de resistencia máxima por género y tipo de ajuste.

Se observó que los eucaliptos tenían significativamente mayor pérdida de resistencia que las tipuanas, lo que estaría relacionado con la identificación del tronco de los árboles del género *Eucalyptus* como la parte más probable de fallar, en las evaluaciones visuales de nivel 2.

Utilizando el ajuste automático del tomógrafo, un 63% de los eucaliptos tuvieron un porcentaje de pérdida máxima de resistencia mayor al 30%, mientras que para las tipuanas fue de 19% (Cuadro IV). Se observó que hubo una reducción de las pérdidas de resistencia cuando se utilizó el ajuste manual, dado que todos los árboles presentaron pérdidas menor o igual a 30% y la mayoría menor a 10% (Cuadro IV).

Ajuste	Género	Pérdida Máxima de Resistencia (%)				
		0 a 10	11 a 20	21 a 30	31 a 40	≥ 41
Automático	<i>Eucalyptus</i>	0	13	25	37	25
	<i>Tipuana</i>	0	56	25	13	6
Manual	<i>Eucalyptus</i>	63	31	6	0	0
	<i>Tipuana</i>	94	0	6	0	0

Cuadro IV. Porcentaje de árboles por rango de pérdida de resistencia, por género y tipo de ajuste.

El número reducido de árboles identificados con defectos peligrosos en el tronco en el nivel 2 de evaluación puede estar vinculado con el bajo porcentaje de troncos con pérdida de resistencia mayor a 30%. Se observó que el ajuste manual sería más adecuado para corroborar las evaluaciones visuales, tal como lo recomendado en [28]. El ajuste automático tiende a aumentar significativamente el porcentaje de la pérdida máxima de resistencia, pudiendo llevar a decisión de eliminar árboles prematuramente.

De los árboles con evaluaciones donde el tronco es la parte más probable de fallar, esto es árboles ID 06, 11 y 16, las pérdidas de resistencia encontradas en el ajuste automático fueron 35%, 22% y 37%, respectivamente; mientras que cuando se utilizó el ajuste manual, los índices bajaron a 12%, 0% y 8%, respectivamente (Figura V). En este último ajuste, el resultado mostró que la pérdida de resistencia en la zona de medición del tronco fue baja, lo que podría indicar, en caso de no presentar otro defecto que actúe de forma sinérgica, que la probabilidad de fallar en esta zona específica también sería reducida.

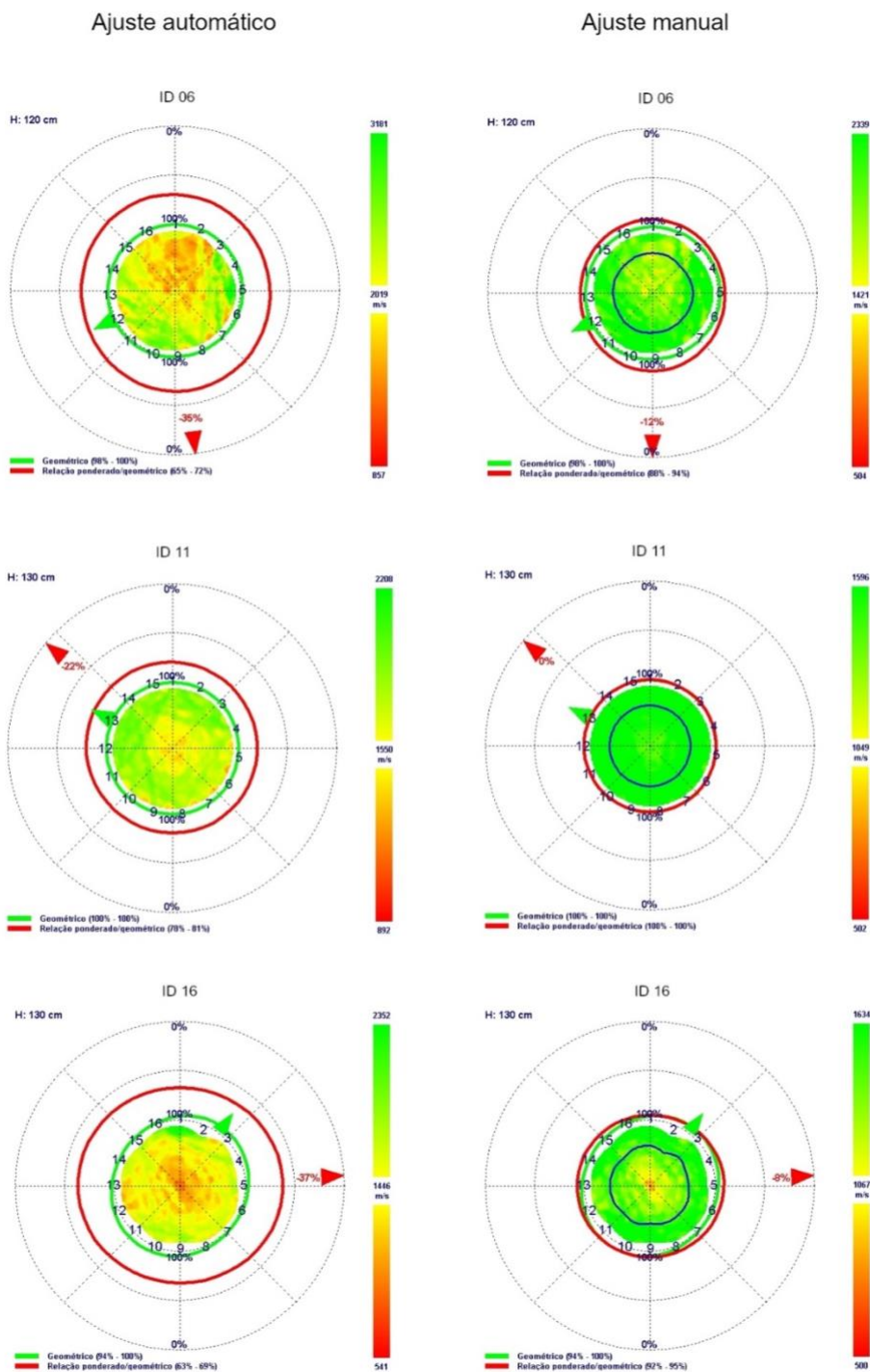


Figura V. Tomogramas de los árboles 06, 11 y 16 con ajuste automático y manual. La línea azul en los tomogramas con ajuste manual se posiciona a 1/3 del radio, de fuera hacia dentro.

En las Figuras VI, VII y VIII corresponden a los resistogramas de los árboles ID 06, 11 y 16, cuyos diámetros fueron 129, 94 y 102 cm, respectivamente. Su aplicación fue hecha considerando la ubicación del sensor del tomograma correspondiente. Se observa que la corteza de los eucaliptos mide alrededor de 2 cm.

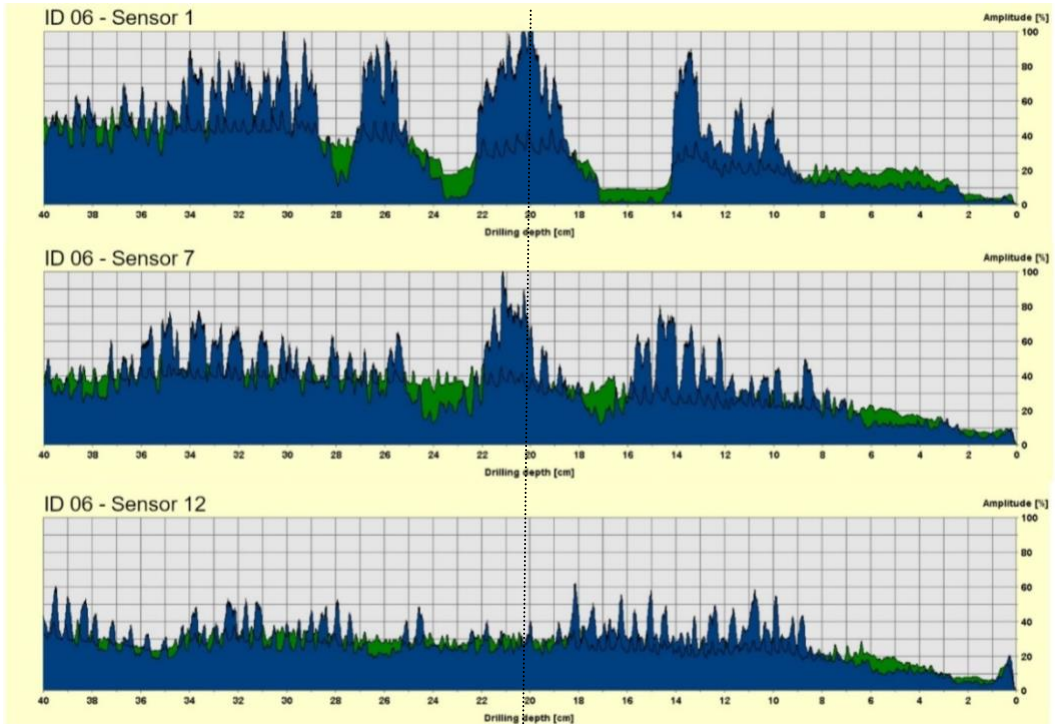


Figura VI. Resistogramas del árbol ID 06, a 1,20 m aplicado en tres diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica 1/3 del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

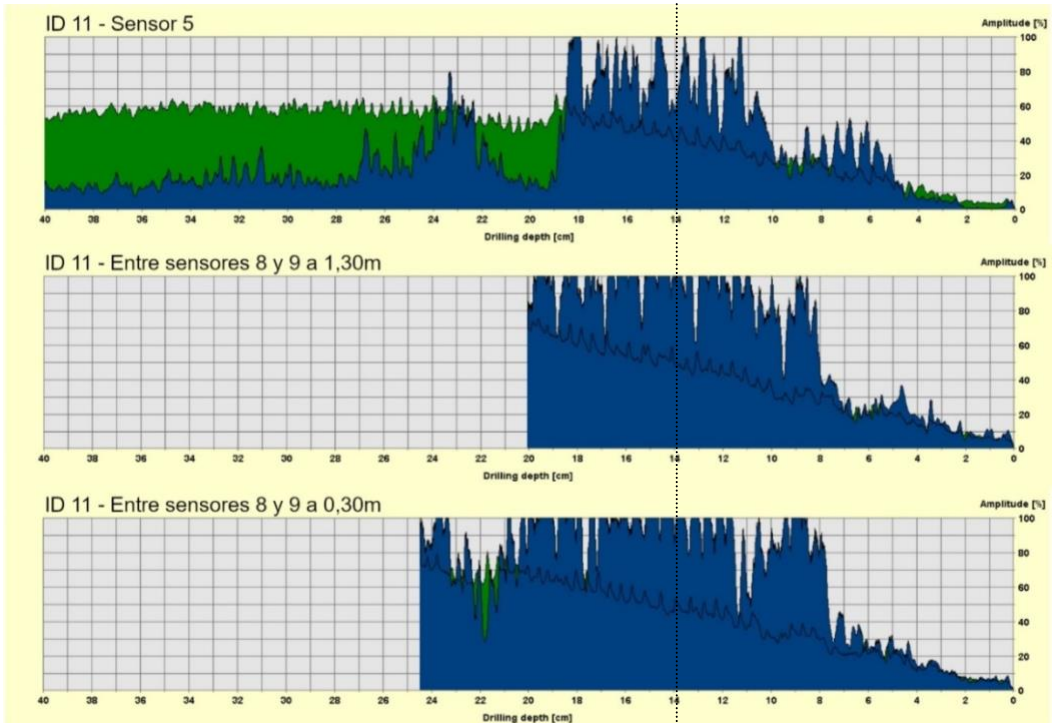


Figura VII. Resistogramas del árbol ID 11, a 1,30 m y a 0,30 m aplicado en tres diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica $1/3$ del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

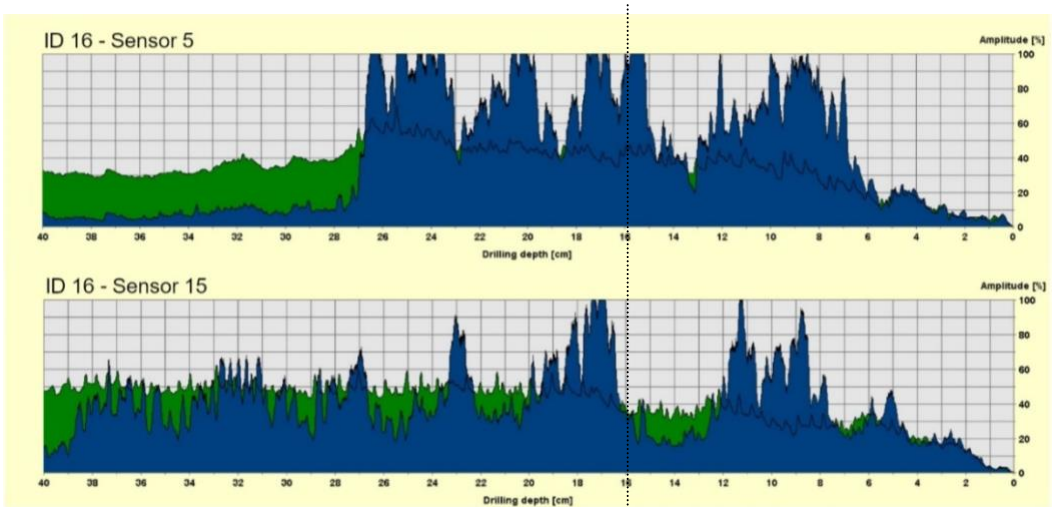


Figura VIII. Resistogramas del árbol ID 16, a 1,30 m aplicado en dos diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica $1/3$ del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

Considerando los resistogramas, se visualizó que el árbol ID 11 (Figura VII) tuvo una alta resistencia a la penetración, principalmente en el primer tercio del radio del tronco, por lo que el equipo no logró finalizar la medición. A su vez, para el árbol ID 06 (Figura VI) se observó una zona de posible deterioro entre los 14 a 17 cm de penetración en la dirección del sensor 1, dentro del primer tercio del radio, lo que también fue observado en el respectivo tomograma con ajuste manual (Figura V); esta misma situación se observó en el caso del árbol ID 16 (Figura VIII), a partir de los 27 cm de penetración en la dirección del sensor 5 y de los 39 cm en la dirección del sensor 15, condición que se refrenda con el tomograma con ajuste manual (Figura V).

Los trabajos de [18] y [20] demuestran que la combinación de la evaluación visual, la tomografía acústica y el penetrógrafo es efectiva para la detección y medición de los defectos internos en los árboles. En el presente trabajo, haciendo esta combinación, dos de los 32 árboles evaluados presentaron algún compromiso en el tronco, que podría indicar un nivel de probabilidad de falla más elevado de esta parte. De hecho, en las evaluaciones de nivel 2 para el árbol ID 06, los evaluadores consideraron probable a inminente la probabilidad de falla del tronco, mientras que un evaluador lo consideró probable; a su vez para el árbol ID 11 fue considerada posible.

Al observar las imágenes de los tomogramas y resistogramas, correspondientes a la evaluación de nivel 3, en el 38% de los árboles los evaluadores marcaron la probabilidad de falla en una categoría más baja que la indicada en la evaluación de nivel 2 y, a su vez, mantuvieron la misma categoría en el 62%. Para ningún árbol la probabilidad de falla aumentó posterior a la evaluación de nivel 3. En este contexto, habría sido posible encontrar un mayor porcentaje de reducción de la probabilidad de falla, si hubiesen sido utilizadas las imágenes de los tomogramas con ajuste manual.

Es importante destacar que el porcentaje de individuos donde se sugiere la evaluación de defectos estructurales con un instrumento avanzado es generalmente bajo, como es observado por [18], tal como se refrenda en este artículo. Concordante con [33], es recomendable adaptar una evaluación visual detallada que ayude a la interpretación de las adaptaciones biomecánicas del árbol, reduciendo así la realización de evaluaciones con uso instrumental donde sea realmente es necesario.

4. Conclusiones. - No se encontraron diferencias significativas entre los evaluadores al analizar las valoraciones de la probabilidad de falla en los tres niveles de evaluación del riesgo. A su vez, en la evaluación de nivel 3, aplicada en el tronco, se encontró un promedio menor en esta valoración, con una tendencia a reducir las diferencias entre ellos.

Las evaluaciones visuales básicas y el análisis de los tomogramas y resistogramas son vinculantes, especialmente en los árboles que tenían alguna evidencia de problemas estructurales en el tronco.

Para el adecuado análisis de las evaluaciones realizadas con instrumentos, como el tomógrafo sónico, se debe considerar las características de la especie y los hallazgos de la evaluación de nivel 2 del árbol. Asimismo, se releva la importancia de realizar un correcto procesamiento de datos, a fin de evitar la eliminación temprana de árboles.

5. Referencias

- [1] Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4: 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>.
- [2] Hernández HJ. 2008. La situación del arbolado urbano en Santiago. *Revista de Urbanismo*, 18: 1-8. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2010.272>.
- [3] Haase D, Larondelle N, Andersson E, Artmann M, Borgström S, Breuste J, Gomez-Baggethun E, Gren Å, Hamstead Z, Hansen R, Kabisch N, Kremer P, Langemeyer J, Rall EL, McPhearson T, Pauleit S, Qureshi S, Schwarz N, Voigt A, Wurster D, Elmqvist T. 2014. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *AMBIO*, 43: 413-433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>.
- [4] Hamstead ZA, Kremer P, Larondelle N, McPhearson T, Haase D. 2016. Classification of the heterogeneous structure of urban landscapes (STURLA) as an indicator of landscape function applied to surface temperature in New York City. *Ecological Indicators*, 70: 574-585. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.014>.
- [5] Ponce-Donoso M, Vallejos-Barra O, Ingram B, Daniluk-Mosquera G. 2020. Urban Trees and Environmental Variables: Relationships in a City of Central Chile. *Arboriculture & Urban Forestry*, 46(2): 84-95.
- [6] National Tree Safety Group. 2011. Common sense risk management of trees: Guidance on trees and public safety in the UK for owners, managers and advisers. Forestry Commission. Edinburgh: Forestry Commission. 104 p.
- [7] Vogt J, Hauer RJ, Fischer BC. 2015. The Costs of Maintaining and Not Maintaining the Urban Forest: A Review of the Urban Forestry and Arboriculture Literature. 41(6): 293-323.
- [8] Calaza P, Iglesias I. 2016. El riesgo del arbolado urbano. Contexto, concepto y evolución. Madrid: Mundi-Prensa. 526 p.
- [9] van Wassenae P, Richardson M. 2009. A review of tree risk assessment using minimally invasive technologies and two case studies. *Arboricultural Journal*, 32(4): 275-292. <https://doi.org/10.1080/03071375.2009.9747583>.
- [10] Tomao A, Secondi L, Corona P, Giuliarelli D, Quatrini V, Agrimi M. 2015. Can composite indices explain multidimensionality of tree risk assessment? A case study in an historical monumental complex. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3): 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.009>.
- [11] American National Standards Institute. (2011). *ANSI A300 (Part 9)—Tree Risk Assessment a. Tree Failure*. American National Standards Institute.
- [12] Pokorny, J. D. (2003). *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. <https://www.fs.usda.gov/naspf/publications/urban-tree-risk-management-community-guide-program-design-and-implementation>
- [13] Wessolly, L., & Erb, M. (2016). *Manual of Tree Statics and Tree Inspection*. Patzer Verlag.
- [14] Okun, A., Brazee, N.J., Clark, J.R., Cunningham-Minnick, M.J. Burcham, D.C., Kane, B. 2023. Assessing the Likelihood of Failure Due to Stem Decay Using Different Assessment Techniques. *Forests*, 14, 1043. <https://doi.org/10.3390/f14051043>.
- [15] Johnstone, D., Ades, P., Moore, G., & Smith, I. (2007). Predicting Wood Decay in Eucalypts Using an Expert System and the IML-Resistograph Drill. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(2), 76-82. <https://doi.org/10.48044/jauf.2007.009>
- [16] Ciftci, C., Kane, B., Brena, S. F., & Arwade, S. R. (2014). Loss in moment capacity of tree stems induced by decay. *Trees*, 28(2), 517-529. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0968-8>
- [17] Lin, C.-J., Lee, C.-J., & Tsai, M.-J. (2016). Inspection and Evaluation of Decay Damage in Japanese Cedar Trees Through Nondestructive Techniques. *Arboriculture & Urban Forestry*,

42(3). <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.018>

[18] Wu, X., Li, G., Jiao, Z., & Wang, X. (2018). Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. *Applications in Plant Sciences*, 6(10), 8. <https://doi.org/10.1002/aps3.1187>

[19] Burcham, D. C. (2019). *Can sonic tomography predict loss in load-bearing capacity for trees with internal defects? A comparison of sonic tomograms with destructive measurements*. 15.

[20] Wang, X., & Allison, R. B. (2008). Decay Detection in Red Oak Trees Using a Combination of Visual Inspection, Acoustic Testing, and Resistance Microdrilling. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(1), 4.

[21] Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant Soil*, 362, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>

[22] Koeser, A. K., Hauer, R. J., Klein, R. W., & Miesbauer, J. W. (2017). Assessment of likelihood of failure using limited visual, basic, and advanced assessment techniques. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.024>

[23] Nicolotti, G., Socco, L. V., Martinis, R., Godio, A., & Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29(2), 66-78.

[24] Rust, S. 2017. Accuracy and Reproducibility of Acoustic Tomography Significantly Increase with Precision of Sensor Position. *Journal of Forest and Landscape Research*, 1 (2017): 1–6. DOI: 10.13141/jflr.v2i1.449

[25] Instituto Uruguayo de Meteorología. 2020. Estadísticas climatológicas [En línea]. 31 agosto 2020. <https://www.inumet.gub.uy/index.php/clima/estadisticas-climatologicas>.

[26] Dunster, J. A., Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2017). *Tree Risk Assessment Manual* (2ª ed). International Society of Arboriculture.

[27] Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, CW Robledo. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [En línea]. 23 marzo 2020. <http://www.infostat.com.ar>.

[28] Rinn, F. (2012). *ARBOTOM User Manual*. Rinntech.

[29] Koeser, A. K., Hasing, G., McLean, D., & Northrop, R. (2016). Tree Risk Assessment Methods: A Comparison of Three Common Evaluation Forms. *Environmental Horticulture Department, UF/IFAS Extension*, 8.

[30] Boland, D., Brooker, M., Chippendale, G., Hall, N., Hyland, B., Johnston, R., Kleinig, D., McDonald, M., & Turner, J. (2006). *Forest Trees of Australia* (5.ª ed.). CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/9780643069701>

[31] Tortorelli, L. A. (2009). *Maderas y bosques argentinos* (2ª, Vol. 1). Orientación Gráfica Editora.

[32] Rollo, F. (2010). *Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze)* [Mestrado em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2010.tde-16032010-142305>

[33] Cheng-Jung, L., Chia-Ju, L. & Ming-Jer, T. 2016. Inspection and Evaluation of Decay Damage in Japanese Cedar Trees Through Nondestructive Techniques. *Arboriculture & Urban Forestry*. 42(3), 201–212.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

APCD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

OVB ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MPD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.