



Características estructurales y nivel de riesgo de arbolado en un parque periurbano

Structural features and risk level of trees in a peri-urban park

Pablo Hernández-López¹, Tomás Martínez-Trinidad^{1*}, Leopoldo Mohedano Caballero²,

Patricia Hernández-de la Rosa¹ y Manuel de Jesús González Guillén¹

¹ Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia. tomtz@colpos.mx

RESUMEN

El arbolado urbano puede representar un nivel de riesgo para la gente, infraestructura u objetos cercanos. Por ello, los objetivos del presente trabajo fueron analizar las características estructurales y evaluar el nivel de riesgo del arbolado del parque nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl (PNMFN), así como comparar el desempeño de cinco métodos de evaluación del riesgo. Se establecieron 62 sitios de muestreo en 11 zonas de manejo del PNMFN. En cada sitio se evaluó el riesgo de todos los árboles mediante el método Matheny y Clark (M&C); posteriormente, se seleccionaron 50 árboles y se evaluó el riesgo mediante cuatro métodos adicionales: Pokorny, Montevideo, TRAQ y Threats. Se registraron 395 árboles, en el arbolado vivo se identificaron 13 condiciones que representan características asociadas al riesgo, la madera muerta fue la más frecuente. Del total de árboles evaluados, 50.4% representa un riesgo muy bajo, 4.6% riesgo alto y 0.3% riesgo muy alto. Los cinco métodos de evaluación mostraron diferencias significativas para la probabilidad de falla, impacto y consecuencias. Los métodos formaron dos grupos: M&C, Pokorny y Montevideo generaron calificaciones de riesgo más altas lo que implica medidas de mitigación más drásticas. Threats y TRAQ conforman el segundo grupo. Threats puede llegar a subestimar el nivel de riesgo y generar calificaciones no adecuadas o confusas, mientras que TRAQ toma en cuenta un mayor número de características para evaluar el riesgo de múltiples objetivos. Se sugiere utilizar TRAQ para evaluar el nivel de riesgo del arbolado.

PALABRAS CLAVE: árbol riesgo, característica estructural, consecuencias de la falla, probabilidad de falla, probabilidad de impacto.

ABSTRACT

Urban trees represent a level of risk for people, infrastructure and/or any nearby object. Therefore, the objectives of the work were to evaluate the level of risk and structural characteristics of the trees of the Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park (PNMFN) and to compare the performance of five risk assessment methods. 62 sampling sites were established in 11 PNMFN management zones. In each site, the risk of the trees was evaluated using the Matheny and Clark (M&C) method, from that sample 50 trees were selected and the risk was evaluated using four more methods: Pokorny, Montevideo, TRAQ and Threats. 395 trees were evaluated, 13 conditions that represent characteristics associated with risk in the trees were registered, dead wood was the most frequent. 50.4% of the trees represent a very low risk, 4.6% high risk and 0.3% very high risk. The five evaluation methods showed significant differences for the probability of failure, impact and consequences. The methods formed two groups: M&C, Pokorny, and Montevideo generated higher risk ratings, which implies more drastic mitigation measures. Threats and TRAQ make up the second group. Threats can underestimate the level of risk and lead to misleading or inappropriate scores, while TRAQ takes more features into account to assess the risk of multiple targets. It is suggested to use TRAQ to assess the level of risk for trees.

KEYWORDS: risk tree, structural feature, consequences of failure, probability of failure, probability of impact.

INTRODUCCIÓN

Los árboles en zonas urbanas y periurbanas crecen frecuentemente bajo condiciones poco adecuadas, ya que en muchas ocasiones se establecen sin planificación y se ven severamente afectados por actividades de construcción, mantenimiento y reparación de la infraestructura del entorno (Brazolin y Tomazello, 2016), y comúnmente, en un espacio reducido para su buen desarrollo. En consecuencia, varios de esos árboles representan un riesgo para las personas, estructuras y servicios públicos cercanos (Koeser, Hasing et al., 2016). Por ejemplo, en Reino Unido se han registrado 54 personas fallecidas y 24 casos de lesiones graves relacionadas con la fractura o caída de árboles, principalmente en zonas cercanas a carreteras (Ball y Watt, 2013). Además, la caída de árboles puede representar pérdidas económicas cuando estos afectan y dañan la infraestructura como líneas eléctricas y la interrupción de los servicios asociados (Gullick et al., 2019). Aunque la probabilidad que un árbol cause daños generalmente represente un mal menor en comparación con los múltiples beneficios que brindan (Li et al., 2022; Smiley et al., 2011b), es necesario evaluar y aceptar un nivel de riesgo para poder acceder a sus beneficios (Smiley et al., 2011b). Principalmente, en áreas con actividades humanas recurrentes y presencia de objetos vulnerables (Li et al., 2022).

El riesgo de causar daños aumenta cuando se trata de árboles maduros o viejos sin mantenimiento, afectados por plagas, enfermedades o por problemas estructurales del propio árbol (Brazolin y Tomazello, 2016; Koeser, Hasing et al., 2016; Pérez et al., 2018). La presencia de descomposición y madera muerta incrementan la probabilidad de falla (caída) de los árboles (Nelson et al., 2022). Incluso, trabajos previos sobre evaluación de riesgo del arbolado indican que las principales características del arbolado del bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México, relacionadas con el riesgo son la inclinación del tronco principal, la presencia de cancros y brotes epicórmicos (Saavedra-Romero et al., 2019). Por otra parte, en el parque nacional Viveros de Coyoacán, Ciudad de México, la presencia de madera muerta con grietas y cancros son los defectos más

frecuentes relacionados con el nivel de riesgo del arbolado (Muñoz et al., 2022).

Actualmente, existe gran interés por determinar el riesgo de caída que los árboles representan para poder establecer acciones de mitigación, conservación y, en su caso, eliminación, por lo que se han desarrollado múltiples herramientas de gestión y normativas para su evaluación (Klein et al., 2019; Koeser, Hasing et al., 2016). La evaluación del riesgo del arbolado se divide en tres niveles: limitado, básico y avanzado (Smiley et al., 2017), basados en tres componentes: la probabilidad de falla, la probabilidad de impacto y las consecuencias esperadas (Klein et al., 2019). Considerando los anteriores componentes, se han formulado diversas metodologías para la evaluación del riesgo (Coelho, 2021). Cabe indicar que la mayoría de los métodos que los arboristas utilizan pertenecen al nivel básico, el cual comprende una revisión de 360° desde el suelo y del sitio de crecimiento del árbol (Dunster et al., 2013; Koeser et al., 2017). El desarrollo de métodos de evaluación debe ser confiable y permitir el dictamen de cualquier riesgo para que el arbolado se mantenga dentro de condiciones aceptables; así como para evitar medidas de mitigación de gran impacto, como la eliminación o mutilación del árbol (Ellison, 2005; Klein et al., 2019). Sin embargo, ningún método de evaluación es aceptado como estándar para aplicarse en todas las situaciones (Klein et al., 2019).

Algunos métodos de evaluación de riesgo han sido calificados recientemente, señalando que aquellos de nivel básico y ampliamente utilizados generan diferentes calificaciones de probabilidad de falla, impacto o consecuencias para un mismo escenario de riesgo (Ameneiros et al., 2022; Coelho-Duarte et al., 2021b; Norris y Moore, 2020; Reyes et al., 2018). En este sentido, Klein et al. (2019) resaltan la necesidad de analizar el desempeño de los métodos de evaluación, sus objetivos y características de los árboles, así como la influencia de los métodos en las medidas de mitigación del riesgo. Lo anterior permitirá mejorar el entendimiento de los métodos de evaluación, conocer las ventajas y desventajas de cada uno y tener los elementos necesarios para aplicarlos de acuerdo con las necesidades y objetivos de cada evaluación.



OBJETIVOS

Analizar las características estructurales (“defectos”) de los árboles que conforman el PNMFN asociadas al riesgo de caída y evaluar el nivel de riesgo que representa el arbolado del parque para contribuir en las decisiones de manejo del recurso arbóreo. Así como comparar el desempeño, diferencias, ventajas y desventajas de aplicación de cinco métodos de evaluación del riesgo del arbolado, para brindar mayor certeza en la elección de un método de evaluación de riesgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El parque nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl tiene una superficie total de 49.2 ha (Secretaría del Medio

Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Semarnat y Conanp], 2017) y se encuentra a una altitud de 2300 m (Herrera-Llampallas et al., 2018). Está ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México y recibe cerca de 192 000 visitantes anualmente (Herrera et al., 2019). Fue decretada como área natural protegida en la categoría de Parque Nacional en el año 1937 por el presidente Lázaro Cárdenas (Departamento Forestal y de Caza y Pesca, 1937). Para la evaluación del riesgo del arbolado se definieron 11 zonas de manejo con información del parque y recorridos de campo (Fig. 1) y se establecieron 62 sitios circulares de muestreo de 400 m² a una intensidad de 5% de la superficie total. Los sitios se seleccionaron aleatoriamente mediante una malla de puntos y se asignaron proporcionalmente al tamaño de cada zona de manejo.

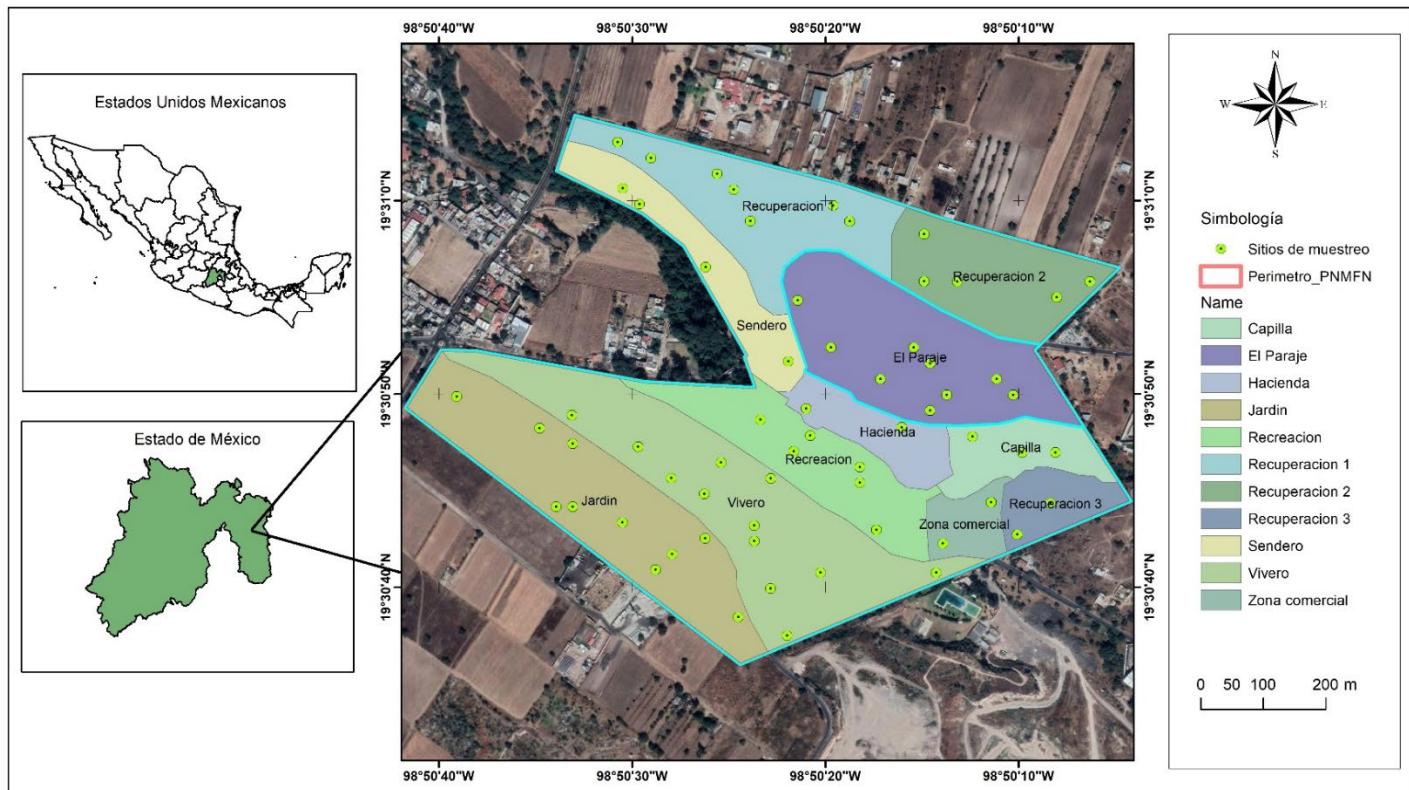


FIGURA 1. Perímetro del parque nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, zonas de manejo y sitios de muestreo.

Características estructurales y evaluación del riesgo

En cada sitio se registraron todos los árboles mayores a 7.5 cm de diámetro normal (DN, 1.3 m de altura a partir del suelo) y se realizó una inspección de 360° desde el suelo de todas las partes de cada árbol, se registró especie, diámetro normal, altura total y se identificaron las principales características estructurales presentes en los árboles con base en la clasificación de Pokorny et al. (2003). Todos los árboles fueron evaluados por una misma persona. El nivel de riesgo fue evaluado mediante el método desarrollado por Matheny y Clark (1994) (M&C), el cual consiste en valorar tres componentes principales: el potencial de falla, el tamaño de la parte que probablemente fallará y la calificación del objetivo. A cada uno de estos componentes se le asignó una calificación numérica con valor de 1 a 4 dependiendo de las características físicas observadas. Al finalizar la evaluación, estas calificaciones se suman para obtener una calificación general de riesgo del árbol que va de tres a doce puntos como máximo (Klein et al., 2019). Sin embargo, para facilitar la interpretación de esta calificación, se generó una escala de riesgo de cinco categorías donde valores de 3 y 4 corresponden a un riesgo muy bajo; 5 y 6 riesgo bajo; 7 y 8 riesgo medio; 9 y 10 riesgo alto; y 11 y 12 riesgo muy alto. La evaluación en campo se llevó a cabo de abril a julio del 2021.

Comparación de métodos de evaluación del riesgo

Posterior a la evaluación de riesgo general, se seleccionó una muestra de 50 árboles completamente al azar distribuidos en todas las zonas de manejo, con el fin de comparar la calificación de riesgo obtenida mediante cinco diferentes métodos de evaluación de nivel básico (se incluye la calificación M&C obtenida de la primera parte para los 50 árboles seleccionados y cuatro métodos más), los cuales han sido reconocidos y utilizados, excepto el método Montevideo el cual es de reciente creación (Tabla 1). Cada

uno de los métodos comparados determinan el nivel de riesgo con base en la probabilidad de falla, probabilidad de impacto y las consecuencias de la falla, sin embargo, en cada método los componentes pueden recibir diferente nombre. Se obtuvo un total de 250 calificaciones de riesgo por un mismo evaluador.

Análisis de datos

Con la información obtenida, se generó una base de datos en el programa Microsoft Excel®. Se utilizó estadística descriptiva para el diámetro normal, altura y características estructurales registradas, así como para la calificación de riesgo por zona de manejo dentro del parque. Para determinar si existían diferencias estadísticas significativas en la calificación de riesgo obtenida entre cada zona de manejo, se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, debido a que la calificación de riesgo no cumple el supuesto de normalidad. Este análisis se realizó en el software estadístico InfoStat© versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020) con un nivel de significancia de 5%.

Para realizar la comparación en el desempeño de cada método de evaluación del riesgo, los resultados de cada método fueron estandarizados utilizando la propuesta de Reyes et al. (2018). Con la ecuación 1 se generó una calificación final expresada en porcentaje de 0% a 100% y dividido en cuatro categorías de riesgo: bajo (0%-25%), medio (>25%-50%), alto (>50%-75%) y muy alto (>75%).

$$Cri = (Crim - Vm) * \left(\frac{100}{V M - Vm} \right) \quad (1)$$

donde:

Cri = calificación de riesgo estandarizado expresado en porcentaje

Crim = calificación de riesgo del método utilizado

Vm = valor mínimo (calificación mínima de riesgo obtenida del método utilizado)

VM = valor máximo (calificación máxima de riesgo obtenida del método utilizado)



TABLA 1. Características de los métodos de evaluación del riesgo utilizados para la comparación de su desempeño en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

| Método | Autor | Código | Fórmula para determinar el riesgo | Intervalos de calificación de riesgo |
|---|--|------------|--|--|
| Tree hazard evaluation method | Matheny y Clark (1994) | M&C | Potencial de falla+ tamaño de la parte+ calificación del objetivo | Mínimo 3, máximo 12, sin categorías definidas |
| Best Management Practices: Tree Risk Assessment - Basic Tree Risk Assessment Form | Smiley et al. (2011a); Dunster et al. (2013) | TRAQ | Matriz 1: Probabilidad de falla combinada con probabilidad de impacto Matriz 2: Probabilidad combinada de Matriz 1 por consecuencias | Bajo Moderado Alto Extremo |
| United States Department of Agriculture (USDA) Forest Service Community Tree Risk Evaluation Method | Pokorny et al. (2003) | Pokorny | Probabilidad de falla + tamaño de la parte defectuosa + probabilidad de impactar un objetivo + 0-2 extra para riesgo subjetivo opcional | Mínimo 3, máximo 10, sin categorías definidas |
| Tree Hazard: Risk Evaluation and Treatment System | Forbes-Laird (2010) | Threats | Puntaje de falla x puntaje de objetivo x puntaje de impacto | 0-49 = Insignificante 50-159 = Mínimo 160-349 = Leve 350-999 = Moderado 1000-2000 = Significativo 2001-3999 = Severo ≥4000 = Extremo |
| Evaluación del riesgo visual básico semicuantitativo | Coelho, (2021); Coelho-Duarte et al. (2021a) | Montevideo | Probabilidad de falla + probabilidad de impacto + consecuencias | Mínimo 3, máximo 12, puede adaptar las categorías de la evaluación cualitativa bajo, moderado, alto y extremo |

Para estandarizar el resultado de los métodos TRAQ y Threats a cada categoría de riesgo se le asignó un valor de 1 a 4 y de 1 a 7 respectivamente, posteriormente se aplicó la fórmula de estandarización. Este proceso se realizó con cada una de las partes que integran todos los métodos: probabilidad de falla, probabilidad de impacto, consecuencias y calificación final. Para determinar si existían diferencias

estadísticas significativas respecto a la calificación de riesgo, se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para cada uno de los componentes de cada método utilizando las calificaciones estandarizadas. Finalmente se generó un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de cada método de evaluación del riesgo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características estructurales del arbolado

Se evaluó un total de 395 árboles, de ellos, 44 ejemplares estaban muertos en pie. El diámetro normal (DN) promedio de la población fue de 27.73 cm con una altura total promedio de 11.58 m. El arbolado vivo pertenece a 21 especies, de las cuales *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Schinus molle* L., *Casuarina equisetifolia* L. y *Hesperocyparis lusitanica* (Mill) Bartel fueron las más frecuentes y juntas representan 65.3% de los árboles muestreados. La población restante estuvo compuesta por *Acacia melanoxylon* R.Br. (2.27%), *Buddleja cordata* Kunth (2.02%), *Casimiroa edulis* Llave. (0.50%), *Celtis australis* L. (0.25%), *Crataegus mexicana* Moc. Sessé. 82.02%), *Erythrina coralloides* DC. (0.25%), *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg. (0.75%), *Fraxinus uhdei*

(Wenz.) Lingelsh. (5.31%), *Grevillea robusta* A. Cunn. ex. R. Br. (0.50%), *Jacaranda mimosifolia* D. Don. (1.01%), *Ligustrum lucidum* WT Aiton. (1.51%), *Pinus cembroides* Zucc. (0.50%), *Pinus greggii* Engelm. (3.29%), *Pinus halepensis* Mill. (0.50%), *Quercus* sp. (0.25%), *Salix babylonica* L. (1.51%) y *Taxodium mucronatum* Ten (1.01%).

Se registró un total de 271 árboles vivos con una o más características, comúnmente denominadas “defectos”, que contribuyen a debilitar la estructura de los árboles y pueden generar una falla en alguna de sus partes y que son originadas por lesiones, enfermedades o problemas estructurales de desarrollo (Pokorny et al., 2003; Koeser et al., 2023). De estas características se registraron 13 tipos diferentes con potencial de riesgo (Tabla 2). La más frecuente fue la presencia de madera muerta en alguna de las partes del árbol, principalmente en ramas (Fig. 2a).

TABLA 2. Principales características estructurales del arbolado vivo asociadas al riesgo por zona de manejo dentro del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

| Zona de manejo | Tallos codominantes | Corteza incluida | Peso final excesivo | Grietos | Heridas | Descomposición visual | Número de árboles por característica estructural | | | | | | |
|----------------|---------------------|------------------|---------------------|---------|---------|-----------------------|--|------------|----------------|---------------|---------|---|------------------------------------|
| | | | | | | | Cavidades | Resinación | Corteza dañada | Madera muerta | Cáncros | Inclinación moderada $\geq 10^\circ < 40^\circ$ | Inclinación severa $\geq 40^\circ$ |
| Capilla | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 19 | 3 | 20 | 6 |
| Sendero | 11 | 5 | 7 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 28 | 10 | 14 | 2 |
| Hacienda | 6 | 3 | 6 | 0 | 4 | 4 | 2 | 0 | 0 | 11 | 1 | 8 | 0 |
| Jardín | 6 | 2 | 0 | 1 | 0 | 8 | 2 | 0 | 1 | 10 | 1 | 4 | 2 |
| Paraje | 4 | 0 | 1 | 1 | 6 | 14 | 6 | 0 | 0 | 23 | 16 | 20 | 10 |
| Recreación | 22 | 12 | 8 | 0 | 6 | 6 | 5 | 0 | 1 | 51 | 20 | 19 | 4 |
| Recuperación 1 | 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 21 | 9 | 7 | 2 |
| Recuperación 2 | 5 | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 14 | 9 | 6 | 0 |
| Recuperación 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 2 | 4 | 0 |
| Vivero | 10 | 7 | 3 | 0 | 6 | 6 | 1 | 0 | 0 | 14 | 8 | 8 | 1 |
| Zona comercial | 7 | 3 | 4 | 1 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 5 | 1 |
| Total | 88 | 40 | 31 | 5 | 27 | 49 | 21 | 1 | 7 | 206 | 79 | 115 | 28 |



FIGURA 2. Ejemplo de las cuatro principales características registradas en el arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl: a) presencia de madera muerta en ramas, b) inclinación moderada, c) tallo codominante, d) cancro en tronco.

Esta condición es similar a la registrada en el parque nacional Viveros de Coyoacán donde más de 70% de los árboles presentan madera muerta (Muñoz et al., 2022). La zona de Recreación, la cual es una de las más visitadas, tiene el mayor número de árboles con presencia de madera muerta, por lo que es necesario aplicar medidas de corrección de esta condición. Estas medidas pueden ser podas de limpieza que remuevan las ramas dañadas, muertas o enfermas con el fin de incrementar la salud del árbol o los árboles, además de evitar que las partes muertas caigan sobre personas o algún otro objetivo (Speak y Salbitano, 2023).

Una condición común es la inclinación del tronco del árbol, la cual es hasta cierto punto natural, sin embargo, cuando esta inclinación supera los 40°, con respecto a la vertical, se considera un “defecto”, ya que representa una probabilidad mayor de falla (Pokorny et al., 2003). En este sentido, la segunda característica más frecuente que se considera como defecto en el arbolado del PNMFN es la inclinación moderada $\geq 10^\circ < 40^\circ$ la cual debe ser inspeccionada periódicamente para registrar cambios abruptos que incrementen la probabilidad de falla (Fig. 2b). La inclinación es la característica más común que describe una arquitectura pobre del árbol (Calaza e Iglesias, 2016) y es frecuente observar esta condición en el entorno urbano. Por ejemplo, en el bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México, la principal característica estructural registrada en el arbolado fue la inclinación del tronco (Saavedra-Romero

et al., 2019). Para el caso de inclinaciones severas ($\geq 40^\circ$) solo se registraron 28 individuos, la zona de El Paraje registró mayor número de árboles con esta condición, sin embargo, es una zona de uso intermitente dentro del PNMFN.

La presencia de tallos bifurcados [codominantes] (Fig. 2c) es otra característica que es considerada como agravante de riesgo en el arbolado del PNMFN, especialmente en la zona de Recreación con la presencia de 20 individuos. Esta condición incrementa en algunas especies la posibilidad de falla en comparación con árboles con un tronco principal (Kane y Clouston, 2008), ya que generalmente se encuentran insertados en un ángulo estrecho y desarrollan corteza incluida que en algunos casos reduce la fuerza de unión de los tallos (Meadows y Slater, 2020). Otra característica de importancia fue la presencia de cancros, áreas donde el cám-bium y la corteza del árbol se encuentran muertos, que pueden ser causados por factores bióticos y abióticos (Pokorny et al., 2003). El número mayor de árboles con esta condición se encuentra dentro de la zona de Recreación (Tabla 2, Fig. 2d), lo cual, sumado a los ejemplares con tallos codominantes y madera muerta, indica que esta zona debe ser atendida con prioridad para realizar labores que corrijan, eliminen o reduzcan estas características. Además de las características en arbolado vivo, se registraron 44 árboles muertos en pie, los cuales pueden representar una amenaza potencial a los visitantes del parque (Stereńczak et al., 2017). Sin embargo, el mayor número de estos árboles se ubica en

las zonas de Recuperación 1, Recuperación 2 y Jardín, las cuales son poco frecuentadas, por lo que la probabilidad de dañar a las personas no es alta.

Evaluación del riesgo del arbolado en el PNMFN

Del total de los árboles evaluados, 50.4% obtuvo un nivel de riesgo muy bajo y solo 0.3 % un riesgo muy alto (Tabla 3). El resultado contrasta con lo observado en el parque nacional Viveros de Coyoacán en la Ciudad de México donde más de 40% de los árboles evaluados se clasificaron con riesgo alto o superior (Muñoz et al., 2022). La diferencia mostrada puede deberse al protocolo de evaluación utilizad

zado, diferentes condiciones y hábitos de crecimiento de las especies y a las posibles acciones de manejo implementadas en el parque. Por otro parte, en el bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México, se observó que 83.9% del arbolado evaluado tuvo un riesgo ≤ 8 con el método de Matheny y Clark (1994) (Saavedra-Romero et al., 2019). Este resultado es similar al PNMFN donde 95% de los árboles obtuvieron calificaciones ≤ 8 (Tabla 3). Las zonas de manejo que presentaron un número mayor de árboles con riesgo alto fueron Hacienda y Recreación (Fig. 3); además, en la zona de Vivero se registró el único ejemplar con riesgo muy alto (Tabla 3, Fig. 3).

TABLA 3. Número de árboles por categoría de riesgo dentro de cada zona de manejo del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

| Zona de manejo | Árboles (Núm.) | Árboles muertos (Núm.) | Categoría de riesgo (Calificación) | | | | |
|----------------|----------------|------------------------|------------------------------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| | | | Muy bajo (3-4) | Bajo (5-6) | Medio (7-8) | Alto (9-10) | Muy alto (11-12) |
| Capilla | 31 | 0 | 18 | 8 | 3 | 2 | 0 |
| Sendero | 60 | 3 | 38 | 8 | 12 | 2 | 0 |
| Hacienda | 14 | 2 | 0 | 2 | 8 | 4 | 0 |
| Jardín | 25 | 9 | 13 | 6 | 6 | 0 | 0 |
| Paraje | 38 | 3 | 25 | 9 | 3 | 1 | 0 |
| Recreación | 71 | 2 | 5 | 41 | 21 | 4 | 0 |
| Recuperación 1 | 50 | 9 | 28 | 14 | 8 | 0 | 0 |
| Recuperación 2 | 35 | 7 | 23 | 10 | 1 | 1 | 0 |
| Recuperación 3 | 16 | 1 | 15 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Vivero | 43 | 8 | 32 | 5 | 2 | 3 | 1 |
| Zona comercial | 12 | 0 | 2 | 4 | 5 | 1 | 0 |
| Total | 395 | 44 | 199 | 108 | 69 | 18 | 1 |
| (%) | 100 | 11.1 | 50.4 | 27.3 | 17.5 | 4.6 | 0.3 |

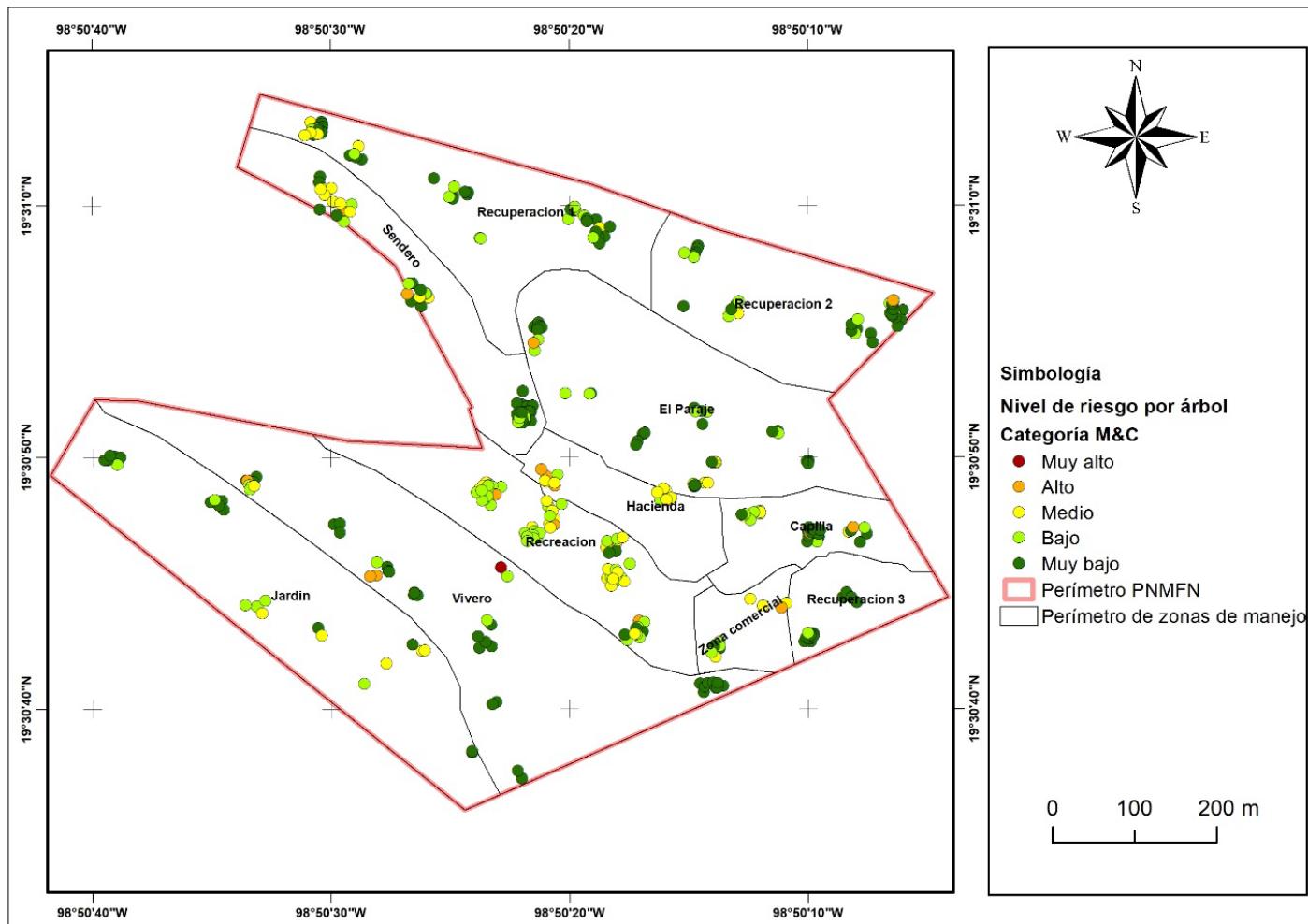


FIGURA 3. Distribución del arbolado evaluado y su nivel de riesgo, de acuerdo con el método de Matheny y Clark (1994), dentro de cada zona de manejo del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en la calificación de riesgo entre cada una de las zonas de manejo, las zonas de Hacienda, Comercial y de Recreación registraron la mediana más alta (Tabla 4). Esto se debe a que estas son zonas con mayor presencia de objetivos que pueden ser afectados por la falla del arbolado, además algunos ejemplares evaluados se encuentran muertos en pie. Es importante aclarar que el valor de la mediana de riesgo dentro de cada zona de manejo corresponde únicamente a los árboles evaluados y en ningún caso debe generalizarse este valor a todos los individuos existentes en cada zona.

Comparación de métodos de evaluación del riesgo

Los 50 árboles evaluados presentaron un DN promedio de 35.9 cm y una altura promedio de 14.5 m. Con base en los resultados obtenidos en este trabajo y la experiencia de aplicación, la tabla 5 resume las principales ventajas y desventajas percibidas en cada método de evaluación del riesgo. Lo anterior brinda mayor certidumbre en la elección de un método por los interesados en el riesgo de los árboles. Los resultados en la categoría de riesgo estandarizado mostraron diferentes proporciones en cada categoría para cada método evaluado. Sin embargo, todos los métodos calificaron a la mayoría de los árboles en la categoría de riesgo bajo (Fig. 4).

TABLA 4. Categoría de riesgo de cada zona de manejo dentro del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

| Zona de manejo | Mediana de la calificación de riesgo | Categoría de riesgo | Rango* |
|----------------|--------------------------------------|---------------------|------------|
| Recuperación 3 | 3 | Muy bajo | 69.5 a |
| Recuperación 2 | 4 | Muy bajo | 139.56 b |
| Vivero | 4 | Muy bajo | 151.15 bc |
| Paraje | 4 | Muy bajo | 158.41 bc |
| Capilla | 4 | Muy bajo | 169.39 bcd |
| Recuperación 1 | 4 | Muy bajo | 174.79 bcd |
| Jardín | 4 | Muy bajo | 204.86 cd |
| Sendero | 4 | Muy bajo | 206.46 d |
| Recreación | 6 | Bajo | 276.16 e |
| Zona comercial | 6 | Bajo | 285.95 ef |
| Hacienda | 8 | Medio | 347.42 f |

*Letras diferentes indican diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) en el promedio de rangos entre zonas de manejo a través del análisis de Kruskal-Wallis.

TABLA 5. Principales ventajas y desventajas de cinco métodos de evaluación del riesgo de árboles, observadas en función de su desempeño aplicados al arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. (Parte 1 de 3)

| Método | Tiempo de aplicación (minutos) | Ventajas | Desventajas |
|--------|--------------------------------|---|--|
| M&C | 20 | <ul style="list-style-type: none"> Permite la descripción general del árbol, sus partes y el entorno donde está establecido impulsando una evaluación de 360° desde el suelo Permite registrar la severidad de múltiples defectos en cada una de las partes del árbol La calificación ordinal puede ayudar a jerarquizar la intervención de la mitigación del riesgo Brinda recomendaciones básicas de mitigación del riesgo e inspecciones futuras Permite una evaluación de todas las partes del árbol y su entorno en un relativo corto periodo de tiempo | <ul style="list-style-type: none"> Genera Cri* con valor numérico sin una definición del significado de los valores, por tanto, el valor es relativo Produce Cri en los niveles más altos que pueden derivar en mayor eliminación de árboles si no se tienen consideraciones adicionales No permite evaluar múltiples objetivos y el registro se debe realizar de manera general La PF* se basa únicamente en la parte más probable de falla y no permite evaluar múltiples escenarios de diferentes partes del árbol La PI* se estima cualitativamente por señales visuales y no contempla el uso de contadores, lo cual puede variar en diferentes horas del día, principalmente en flujo peatonal y vehicular La estimación de las Co* se basa únicamente en el tamaño de la parte más probable de fallar |

*Cri= calificación de riesgo, PF= probabilidad de falla, PI= probabilidad de impacto, Co=consecuencias.



TABLA 5. Principales ventajas y desventajas de cinco métodos de evaluación del riesgo de árboles, observadas en función de su desempeño aplicados al arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. (Parte 2 de 3)

| Método | Tiempo de aplicación (minutos) | Ventajas | Desventajas |
|------------|--------------------------------|---|---|
| Montevideo | 20 | <ul style="list-style-type: none"> Permite la descripción general del árbol, sus partes y el entorno donde está establecido impulsando una evaluación de 360° desde el suelo El formato brinda una lista descriptiva de defectos identificados en el árbol y una escala de severidad del defecto Permite registrar la PF de la parte con mayor probabilidad de falla y la PF de la parte con mayor consecuencia Permite definir una zona y protección del objetivo en riesgo Las Co permiten registrar la parte más probable de fallar, distancia de caída, presencia de masa reducida por degradación y tamaño de la parte más probable de fallar corrigiendo la sobreposición de intervalos Cuenta con un apartado de manejo y gestión del riesgo con ejemplo de medidas de control Permite registrar el nivel de riesgo residual después de realizar las medidas de control | <ul style="list-style-type: none"> Produce Cri en los niveles más altos que pueden derivar en mayor eliminación de árboles si no se tienen consideraciones adicionales No permite evaluar múltiples objetivos y el registro se debe realizar de manera general La PI está basada en el método TRAQ, pero no incluye el uso de contadores de tráfico, lo cual puede variar en diferentes horas del día, principalmente en flujo peatonal y vehicular Al ser de nueva creación requiere de mayor investigación para validar sus resultados |
| Pokorny | 10 | <ul style="list-style-type: none"> Se basa en una guía de siete pasos para determinar el nivel de riesgo con este método Fácil de utilizar y de rápida aplicación por lo que puede usarse para evaluar grandes poblaciones de árboles en cortos períodos de tiempo Categoriza los defectos en siete grandes grupos fáciles de recordar y codificados para mayor rapidez en el registro Propone acciones correctivas codificadas para su uso en el formato Permite incrementar el nivel de riesgo a juicio del evaluador hasta en dos puntos más en caso de que la calificación final no sea suficiente La calificación ordinal puede ayudar a jerarquizar la intervención de la mitigación del riesgo | <ul style="list-style-type: none"> La rápida aplicación del método omite información relevante El formato propuesto no permite registrar características del sitio del árbol, ni registrar defectos para las diferentes partes del árbol, y solo registra el diámetro del árbol como característica de tamaño sin espacio para altura y/o diámetro de copa La PF se basa únicamente en la parte más probable de fallar y no permite evaluar múltiples escenarios de diferentes partes del árbol La PF influye más en la Cri al darle hasta 4 posibles puntos mientras que la PI y Co se califican hasta con 3 puntos cada una La estimación de las Co se basa únicamente en el tamaño de la parte más probable de fallar Genera Cri con valor numérico sin una definición del significado de los valores Produce Cri en los niveles más altos que pueden derivar en mayor eliminación de árboles si no se tienen consideraciones adicionales |

*Cri= calificación de riesgo, PF= probabilidad de falla, PI= probabilidad de impacto, Co=consecuencias.

TABLA 5. Principales ventajas y desventajas de cinco métodos de evaluación del riesgo de árboles, observadas en función de su desempeño aplicados al arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. (Parte 3 de 3)

| Método | Tiempo de aplicación (minutos) | Ventajas | Desventajas |
|---------|--------------------------------|---|--|
| Threats | 10 | <ul style="list-style-type: none"> • Fácil de utilizar y de rápida aplicación por lo que puede usarse para evaluar grandes poblaciones de árboles en cortos períodos de tiempo • Cuenta con un documento orientativo para los usuarios • Todos los indicadores incluyen ejemplos para ayudar en la definición de la PF, PI y Co • Incluye un apartado para las aplicaciones de medidas de control con categorías de riesgo bien definidas, así como los tiempos recomendados para la mitigación del riesgo y esquemas de trabajo | <ul style="list-style-type: none"> • Es el método que produce las Cri más bajas por lo que puede generar evaluaciones donde se subestime el nivel de riesgo • No permite registrar características del sitio donde está establecido el árbol, ni registrar defectos para las diferentes partes del árbol • La rápida aplicación del método puede omitir información relevante • La PF y PI pueden calificarse con valores igual a 0 lo que resulta en Cri iguales a 0 lo que puede generar confusiones en la interpretación del nivel de riesgo • La PF se basa únicamente en la parte más probable de falla y no permite evaluar múltiples escenarios de diferentes partes del árbol • La PI se estima cualitativamente por señales visuales y no contempla el uso de contadores de tráfico, lo cual puede variar en diferentes horas del día • No permite evaluar múltiples objetivos y el registro se debe realizar de manera general • La estimación de las Co se basa únicamente en el tamaño de la parte más probable de fallar (incluye el peso en kg), la escala del tamaño sobreponde los valores de dos categorías |
| TRAQ | 25 | <ul style="list-style-type: none"> • Permite la descripción general del árbol, sus partes y el entorno donde está establecido impulsando una evaluación de 360° desde el suelo • Permite evaluar múltiples objetivos presentes, su posible protección y la zona en donde se encuentran respecto al árbol de manera escrita y gráfica • Permite evaluar la PF de múltiples escenarios de diferentes partes del árbol • Permite generar una Cri de cada objetivo evaluado y de cada parte del árbol que represente una preocupación, la Cri final será la más alta obtenida • Las Co se basan en el tamaño de la parte, distancia de caída, tipo de objetivo y su posible protección • Permite registrar el nivel de riesgo residual de cada escenario evaluado después de realizar las medidas de control • Tiene mayor soporte documental para un mejor entendimiento de la evaluación | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere de mayor tiempo para terminar la evaluación de un árbol en comparación con otros métodos • La PI se estima cualitativamente por señales visuales y no contempla el uso de contadores de tráfico, lo cual puede variar en diferentes horas del día, principalmente en flujo peatonal y vehicular • Requiere mayor entrenamiento para determinar las categorías de PF, PI y Co, para asegurar el máximo entendimiento del método el evaluador debe someterse a un proceso de evaluación para obtener una calificación respaldada por la International Society of Arboriculture (ISA). |

*Cri= calificación de riesgo, PF= probabilidad de falla, PI= probabilidad de impacto, Co=consecuencias.

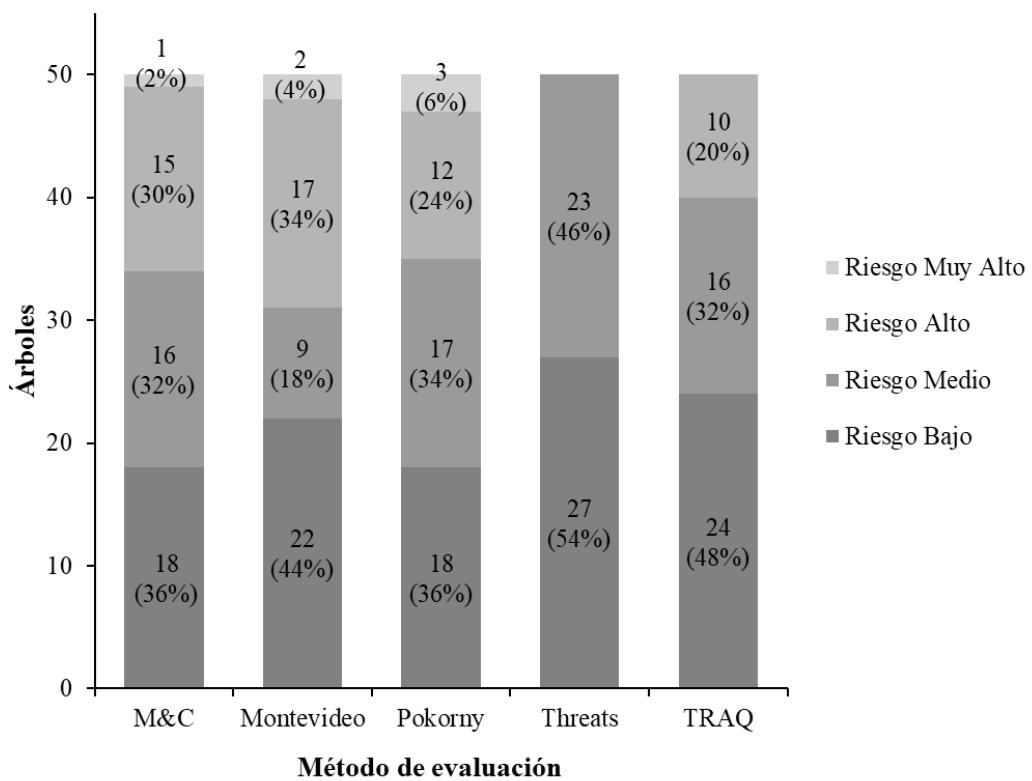


FIGURA 4. Número de árboles por categoría de riesgo estandarizada en cada método de evaluación dentro del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl.

Para los métodos de M&C, Montevideo y Pokorny se registraron árboles en todas las categorías de riesgo. TRAQ no registró árboles en la categoría de muy alto y Threats no evaluó árboles con riesgo alto y muy alto. Estos resultados coinciden con los señalados por Reyes et al. (2018) para los métodos M&C, Pokorny y TRAQ, donde los dos primeros calificaron árboles en las cuatro categorías de riesgo estandarizado mientras que TRAQ solo calificó el riesgo en las primeras tres categorías. Para el caso de Threats los árboles se concentraron casi proporcionalmente en las dos categorías inferiores de riesgo, situación que coincide con el trabajo de Norris y Moore (2020) quienes determinaron que este método tiende a producir, con mayor frecuencia, resultados en las categorías inferiores de riesgo.

Diferencias por componente

Probabilidad de falla (PF)

Los resultados de la prueba de Kruskall-Wallis para probabilidad de falla mostraron diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre métodos de evaluación del riesgo (Fig. 5a). Pokorny, M&C y Montevideo conforman un primer grupo. Estos métodos califican la PF en un intervalo de uno a cuatro puntos, en este estudio generaron calificaciones de PF concentradas principalmente en los niveles inferiores. Para el caso de Montevideo, la estimación de la PF se basa en los siete grupos de características estructurales que establece Pokorny, razón que puede explicar la distribución similar de las calificaciones, incluidos los datos atípicos (Fig. 5a).

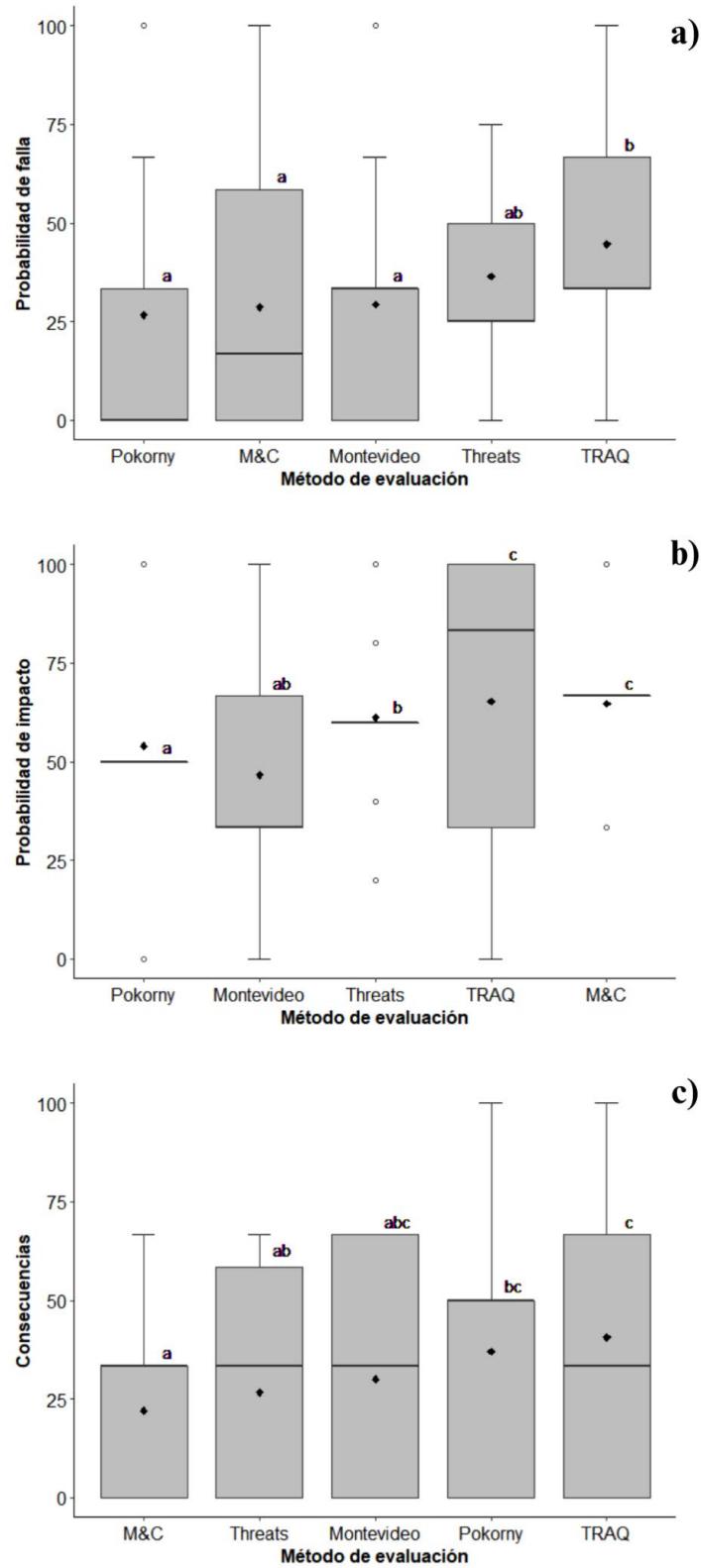


FIGURA 5. Gráfica para la calificación estandarizada de a) probabilidad de falla, b) probabilidad de impacto y c) consecuencias de cada método de evaluación.

Las barras negras indican la mediana, los rombos negros la media y círculos blancos los valores atípicos. Letras diferentes sobre cada caja indican diferencia estadística significativa en el promedio de rangos entre métodos de evaluación a través del análisis de Kruskal-Wallis con $p < 0.05$ para cada componente.



Además, este método permite registrar dos probabilidades de falla de la parte del árbol más probable de fallar y de la parte con mayores consecuencias (Coelho, 2021), lo cual puede representar una ventaja sobre Pokorny y M&C (Tabla 5). No obstante, al momento de generar la calificación final, se debe tomar en cuenta la PF que representa mayor riesgo. Lo anterior se considera también para generar las calificaciones de M&C.

Threats conformó un segundo grupo, sin embargo, no mostró diferencias significativas con M&C, Pokorny y Montevideo, ni con el tercer grupo formado por TRAQ (Fig. 5a). Este resultado es similar al de Coelho-Duarte et al. (2021b) para M&C y Ameneiros et al. (2022) para TRAQ. Este método evalúa la PF con base en un cálculo algorítmico que aumenta de manera exponencial al aumentar la severidad de la característica y la clasifica en cinco categorías (Calaza e Iglesias, 2016). Sin embargo, para generar la calificación de riesgo se debe elegir la parte del árbol más peligrosa, situación similar al anterior grupo de métodos. Además, este método brinda la posibilidad de calificar la PF con un valor de 0, lo que puede repercutir en generar calificaciones de riesgo bajas (Tabla 5); es decir, con cualquier nivel de impacto y de objetivo, la calificación sería de 0 debido a la fórmula multiplicativa de estos factores para determinar el riesgo (Tabla 1). El método TRAQ define la PF con base en una escala ordinal de cuatro categorías, es el único método que permite definir múltiples PF, en raíces, tronco y ramas lo cual representa una ventaja sobre todos los métodos anteriores (Tabal 5). Por tanto, es posible considerar una PF para la característica con probabilidad inminente de falla como aquel que causará mayor daño (Coelho-Duarte et al., 2021b). Sin embargo, la calificación de riesgo general será la más alta de todos los escenarios posibles evaluados.

Probabilidad de impacto (PI)

El método TRAQ presentó un valor de la mediana mayor de PI (Fig. 5b), junto con M&C formaron un grupo el cual comparte una escala similar, definida por cuatro categorías en función de la tasa de uso y ocupación del objetivo. Estos

dos métodos brindan una guía para definir la tasa de ocupación, aunque TRAQ es mucho más específico en cada categoría. Pokorny mostró diferencias con los otros métodos, excepto con Montevideo, sin embargo, este resultado no es el esperado debido a que Montevideo determina la PI basado en el procedimiento de TRAQ, mientras que Pokorny maneja una escala similar, pero solo de tres niveles. Los dos métodos definen la tasa de ocupación. Threats también mostró diferencias, excepto con Montevideo, este método es el único que evalúa la PI con seis posibles categorías, definiendo ejemplos de tasas de ocupación para cada una. En este método se puede evaluar la PI con valor de 0 lo que indica la ausencia de objetivos, por tanto, sin presencia de objetivos el riesgo no existe (Ellison, 2005); ello se refleja cuando se calcula la calificación de riesgo, debido a que, en cualquier caso, una PI de 0 brindaría una calificación de riesgo 0. Esta característica puede representar una desventaja al momento e interpretar el nivel de riesgo (Tabla 5) debido a que, aunque no existiera riesgo aún se tendrían consecuencias como la pérdida del hábitat o reducción de servicios ecosistémicos causados por la falla del árbol (Koeser et al., 2015).

Todos los métodos evaluados determinan la PI de manera cualitativa (Tabla 5) lo que puede representar una desventaja, debido a que la PI es catalogada como uno de los componentes críticos más importantes en la evaluación del riesgo (Ellison, 2005), y generar calificaciones subjetivas de PI mediante señales visuales agrega mayor incertidumbre en la evaluación del riesgo (Klein et al., 2016). El uso de herramientas sencillas como contadores de tráfico vehicular o peatonal puede mejorar la estimación de la PI (Klein et al., 2019); sin embargo, ninguno de los métodos evaluados enfatiza su uso. Es posible que el método TRAQ tenga el potencial de generar una evaluación más real de PI. Koeser et al. (2015) mencionan que los evaluadores avanzados que cuentan con certificaciones y calificaciones en *Tree Risk Assessment Qualification* (TRAQ) de la *International Society of Arboriculture* (ISA) brindan mayor importancia a la PI en la evaluación de riesgo por sobre la PF, que es uno de los componentes más subjetivos de la evaluación. Además,

TRAQ es el único método evaluado que se incluye en la capacitación y obtención de certificaciones internacionales.

Consecuencias (Co)

El método M&C obtuvo la menor mediana en la calificación, lo que coincide con lo observado por Coelho-Duarte et al. (2021b), además no existen diferencias estadísticas significativas entre M&C, Threats y Montevideo (Fig. 5c). El tamaño de la parte del árbol con probabilidad de fallar es un predictor significativo de las consecuencias de la falla (Klein et al., 2021). Tanto M&C como Threats determinan las Co con base en una escala del tamaño de la parte con más probabilidad de fallar, referida a diámetro y peso. No obstante, Coelho-Duarte et al. (2021b) consideran que esta escala tiene como debilidad la sobreposición de los intervalos en estos dos métodos. Para el caso de Montevideo, las Co se calculan con base en la distancia de caída, presencia de masa reducida por degradación y una escala del tamaño de la parte más probable de falla basada en la escala de Threats (Coelho, 2021), la cual fue modificada para evitar la sobreposición de intervalos. Sin embargo, Montevideo no presentó diferencias estadísticas significativas con ningún otro método.

El método Pokorny mostró diferencias significativas solo con M&C, la diferencia radica en que Pokorny utiliza tres intervalos de tamaño de la parte más probable de fallar, pero evita la sobreposición de estos, en contraste con los cuatro intervalos y sobreposición de M&C. Utilizar escalas de tamaño de la parte para definir las Co de la falla puede generar resoluciones falsas dado el entendimiento actual de los daños que pueden causar los árboles (Klein et al., 2021). Por su parte, TRAQ utiliza el tamaño de la parte más probable de fallar para determinar las Co, la cual es expresada a través del diámetro, pero sin definir categorías de tamaños y toma en cuenta la distancia de caída de la parte, así como el tipo de objetivo y su posible protección. Klein et al. (2021) mencionan que para determinar las Co de la falla del árbol es necesario considerar la masa de la parte que puede fallar, la distancia de caída y la resiliencia del objetivo que puede ser afectado. Por tanto, la

estimación de TRAQ puede valorar más adecuadamente las Co, coincidiendo con las conclusiones obtenidas por Coelho-Duarte et al. (2021b).

Calificación de riesgo (Cri)

De acuerdo con el análisis de Kruskall-Wallis, la calificación de riesgo estandarizado mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre cada uno de los métodos evaluados (Fig. 6), lo que concuerda con las diferentes estructuras que conforman los métodos. En general, los pocos estudios que han comparado métodos de evaluación del riesgo concluyen que estos pueden determinar diferentes calificaciones de riesgo (Ameneiros et al., 2022; Coelho-Duarte et al., 2021b; Norris y Moore, 2020). Por tanto, en un proceso de evaluación del arbolado es necesario elegir y mantener el mismo método para evitar cambios significativos en el nivel de riesgo (Coelho-Duarte et al., 2021b). En la figura 6 se aprecia la formación de dos grupos, el primero lo integran Threats y TRAQ. Esta agrupación coincide con la de Norris y Moore (2020), quienes indican que estos métodos proporcionan calificaciones de riesgo más bajas.

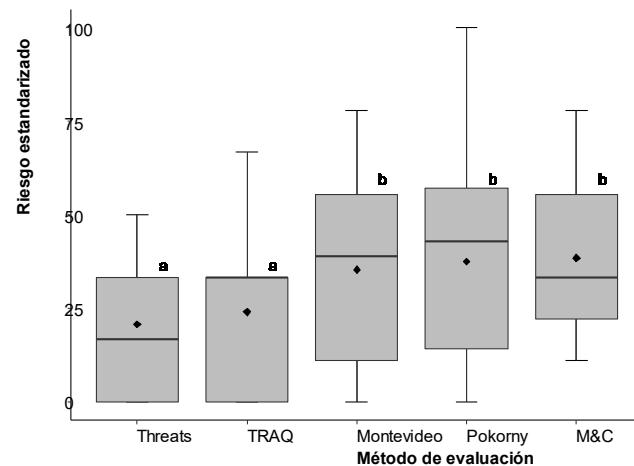


FIGURA 6. Gráfica para la calificación de riesgo estandarizada de cada método de evaluación.

Las barras negras indican la mediana, los rombos negros la media. Letras diferentes sobre cada caja indican diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) en el promedio de rangos entre calificación de métodos de evaluación a través del análisis de Kruskal-Wallis.



Threats determina la Cri mediante la multiplicación de la probabilidad de falla, la puntuación de impacto y la puntuación del objetivo, el resultado abarca valores de 0 hasta 20 000, asignando la puntuación a una de las siete categorías de riesgo. Es el único método evaluado que puede generar una calificación de riesgo igual a 0, que equivale a la categoría de insignificante. Sin embargo, establecer un nivel de riesgo 0 puede no ser adecuado, ya que en zonas públicas es imposible mantener a los árboles libres de riesgo (Norris y Moore, 2020; Smiley et al., 2011b). El método TRAQ es una actualización del método M&C, el cual está basado en matrices de riesgo y es el principal método estandarizado de evaluación utilizado en los Estados Unidos (Koeser, Hauer et al., 2016). Esta actualización evaluó el riesgo del mismo escenario de árboles en niveles menores en comparación con su antecesor M&C (Fig. 6). El resultado es consistente con trabajos anteriores (Norris y Moore, 2020; Reyes et al., 2018; Saavedra-Romero et al., 2019), pero contrasta con lo registrado por Coelho-Duarte et al. (2021b). Estos autores obtuvieron una menor calificación de riesgo cuando se aplicó el método M&C, sin embargo, ellos mencionan que este método fue el más modificado a la hora de estandarizar sus resultados para llevar a cabo la comparación. La diferencia entre los métodos TRAQ y M&C se puede deber a que TRAQ genera una calificación de riesgo poniendo mayor énfasis en las consecuencias que la falla del árbol pueda tener sobre los objetivos (Norris y Moore, 2020). Por su parte, M&C genera la calificación de riesgo asignando el mismo peso a la probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencias (todas evaluadas con una puntuación de 1 a 4).

El segundo grupo de métodos lo conforman Montevideo, Pokorny y M&C los cuales coinciden en que obtienen la Cri mediante la suma simple de la calificación de tres componentes principales que incluyen la probabilidad de falla, probabilidad de impacto y las consecuencias. Reyes et al. (2018) agruparon los métodos Pokorny y M&C como de igual desempeño al evaluar el riesgo. Además, Norris y Moore (2020) indican que estos métodos tienden a producir calificaciones más cercanas a la media dentro del intervalo de posibles puntuaciones.

Pokorny es un método que brinda mayor peso a la probabilidad de falla al momento de obtener la calificación de riesgo seguida de la probabilidad de impacto y tiene la particularidad de poder agregar hasta dos puntos extra a la calificación de riesgo, esto de manera opcional y en caso de que el evaluador así lo considere, sin embargo, la calificación máxima siempre será de 10 puntos. Por su parte M&C asigna el mismo intervalo de calificación a los tres componentes, sin embargo, los componentes de probabilidades tienen mayor énfasis que las consecuencias (Norris y Moore, 2020). Al poner mayor peso en los componentes de probabilidad, la evaluación debe llevarse a cabo de manera más cuidadosa. No obstante, estos métodos determinan la probabilidad de falla e impacto a través de evaluación visual cualitativa y la probabilidad de falla es considerada una de las partes más difíciles de evaluar debido a que depende de la habilidad y experiencia del evaluador (Ellison, 2005). Además, se recomienda tener algún equipo de monitoreo de tráfico para ayudar en la determinación más precisa de la probabilidad de impacto (comúnmente evaluado como tasa o nivel de ocupación) (Klein et al., 2016). El método Montevideo es de nueva creación, está basado en métodos ya establecidos, incluso el intervalo de posibles calificaciones es el mismo que usa M&C, lo que explica que se encuentre en el mismo grupo. Estos métodos generaron calificaciones de riesgo más altas para el mismo escenario en comparación con el grupo 1. Aunque fueron pocos árboles en la categoría de riesgo muy alto (Fig. 3), obtener calificaciones en los niveles más altos de riesgo puede tener como consecuencia que un número mayor de árboles sean eliminados como medida de mitigación del riesgo (Norris y Moore, 2020).

CONCLUSIONES

La principal característica estructural (defecto) presente en el arbolado del PNMFN está asociada a la presencia de madera muerta, esta característica se presentó con mayor frecuencia en las zonas de Recreación y Sendero, en las cuales se sugiere aplicar medidas de corrección de esta condición. La calificación de riesgo obtenida contribuye a priorizar la atención y mitigación del riesgo de los árboles y

zonas de manejo del parque. El arbolado evaluado presentó, de manera general, un nivel de riesgo bajo. En las zonas de Hacienda, Zona comercial y Recreación se concentran los árboles con riesgo más alto debido a la presencia de más objetivos que pueden ser dañados y a una tasa de ocupación mayor. Los métodos de evaluación del riesgo de árboles generaron diferentes calificaciones de PF, PI, Co y Cri para el mismo escenario de riesgo aplicados por un mismo evaluador. Los cinco métodos evaluados pertenecen a dos grupos de acuerdo con su desempeño en la evaluación del nivel de riesgo: M&C, Pokorny y Montevideo generaron calificaciones de riesgo más altas, lo que puede repercutir en recomendar medidas de mitigación más drásticas. Threats y TRAQ conforman el segundo grupo, sin embargo, Threats puede llegar a subestimar el nivel de riesgo y generar calificaciones que pueden resultar no adecuadas o confusas sobre la existencia del riesgo. Por su parte, TRAQ toma en cuenta un número mayor de características para evaluar el riesgo y es el único método que permite evaluar múltiples escenarios de riesgo para diferentes objetivos. Considerando resultados, ventajas y limitaciones se recomienda utilizar el método TRAQ para la evaluación del arbolado del PNMFN. Por último, se recomienda continuar los esfuerzos de investigación con más evaluadores, especies de árboles y métodos nuevos de evaluación del riesgo.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada al primer autor para realizar estudios de Doctorado. A la dirección del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl por todas las facilidades brindadas en la toma de datos.

REFERENCIAS

Ameneiros, C., Fratti, P., Sergio, A., Coelho-Duarte, A. P., Ponce-Donoso, M. & Vallejos-Barra, Ó. (2022). Comparison of visual risk assessment methods applied in street trees of Montevideo city, Uruguay. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 54(2), 38-47. <https://doi.org/10.48162/rev.39.081>

- Ball, D. J., & Watt, J. (2013). The risk to the public of tree fall. *Journal of Risk Research*, 16(2), 261-26. <https://doi.org/10.1080/13669877.2012.737827>
- Brazolin, S., & Tomazello, F. M. (2016). Evaluación de riesgo de caída de árboles urbanos. En A. Chacalo H., A. Chimal H., & V. Fuentes F. (Eds.), *Temas de arboricultura. Árboles, arbustos, palmas y frutales para ciudades Tomo I* (pp. 80-95). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Calaza M., P., & Iglesias D., M. I. (2016). *El riesgo del arbolado urbano. Contexto, concepto y evaluación*. Mundiprensa.
- Coelho D., A. P. (2021). *Evaluación del riesgo de los árboles urbanos: propuesta de un protocolo para Montevideo, Uruguay*. [Tesis doctoral, Universidad de la República].
- Coelho-Duarte, A. P., Daniluk-Mosquera, G., Gravina, V., Hirigoyen, A., Vallejos-Barra, Ó. & Ponce-Donoso, M. (2021a). Proposal of two visual tree risk assessment methods for urban parks in Montevideo, Uruguay. *Bosque* 42(2), 259-268. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000200259>
- Coelho-Duarte, A. P., Daniluk-Mosquera, G., Gravina, V., Vallejos-Barra, Ó., & Ponce-Donoso, M. (2021b). Tree Risk Assessment: Component analysis of six visual methods applied in an urban park, Montevideo, Uruguay. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127005>
- Departamento Forestal y de Caza y Pesca. (1937). *Decreto que declara Parque Nacional "Molino de Flores Netzahualcóyotl", los terrenos de la hacienda El Molino de Flores, en Texcoco, Méx*. Diario Oficial de la Federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/4560613>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020*. Centro de Transferencia InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <https://www.infostat.com.ar/>
- Dunster, J. A., Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2013). *Tree risk assessment manual*. International Society of Arboriculture.
- Ellison, M. J. (2005). Quantified tree risk assessment used in the management of amenity trees. *Journal of Arboriculture*, 31, 57-65. <https://doi.org/10.48044/jauf.2005.007>
- Forbes-Laird J. (2010). *THREATS - Tree Hazard Risk Evaluation and Treatment System - Guidance note for users*. Forbes-Laird Arboricultural Consultancy. <http://www.flac.uk.com/wp-content/uploads/2010/07/THREATS-GN-June-2010.pdf>
- Gullick, D., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D., Vopenka, P., Murray, J., & Abbatt, J. (2019). Tree risk evaluation environment for failure and limb loss (TREEFALL): An integrated model for quantifying the risk of tree failure from local to regional



- scales. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.001>
- Herrera Ll., A., Luque D., A., Monterroso R., A., Jaimes A., F., & Ramírez G., A. G. (2019). Disposición a pagar por la conservación de los recursos naturales del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, México. *Ciencias Administrativas*, 13, 27-35. <https://doi.org/10.24215/23143738e034>
- Herrera-Llampallas, A., Luque-Delgadillo, A., Ramírez-García, G., Espejel-García, A., Vázquez-Alarcón, A., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2018). Estado de los recursos naturales en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Biología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 16(2), 46-57. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.99>
- Kane, B., & Clouston, P. (2008). Tree pulling tests of large shade trees in the genus *Acer*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(2), 101-109. <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.013>
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Hansen, G., & Escobedo, F. J. (2019). Risk assessment and risk perception of trees: A review of literature relating to arboriculture and urban forestry. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(1), 23-33. <https://doi.org/10.48044/jauf.2019.003>
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Hansen, G., & Escobedo, F. J. (2016). Relationship between perceived and actual occupancy rates in urban settings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.030>
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Miesbauer, J. W., Hansen, G., Warner, L., Dale, A., & Watt, J. (2021). Assessing the consequences of tree failure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127307>
- Koeser, A. K., Hasing, G., McLean, D., & Northrop, R. (2016). *Tree risk assessment methods: a comparison of three common evaluation forms*. University of Florida IFAS Extension ENH1226. <https://ohiodnr.gov/static/documents/forestry/uftoolbox/Tre eRiskAssessment-MethodsComparison.pdf>
- 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>
- Koeser, A. K., Hauer, R. J., Miesbauer, J. W., & Ward, P. (2016). Municipal tree risk assessment in the United States: Findings from a comprehensive survey of urban forest management. *Arboricultural Journal*, 38(4), 218-229. <https://doi.org/10.1080/03071375.2016.1221178>
- Koeser, A. K., Klein, R. W., Hasing, G., & Northrop, R. J. (2015). Factors driving professional and public urban tree risk perception. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 968-974. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.004>
- Koeser, A. K., Klein, R. W., Hauer, R. J., Miesbauer, J. W., Freeman, Z., Harchick, C., & Kane, B. (2023). Defective or just different? Observed storm failure in four urban tree growth patterns. *Forests*, 14(5), 988. <https://doi.org/10.3390/f14050988>
- Li, H., Zhang, X., Li, Z., Wen, J., & Tan, X. (2022). A review of research on tree risk assessment methods. *Forests*, 13(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>
- Matheny, N., & Clark, J. (1994). *A photographic guide to the evaluation of hazard trees in urban areas* (2a ed.) International Society of Arboriculture.
- Meadows, D., & Slater, D. (2020). Assessment of the load-bearing capacity of bark-included junctions in *Crataegus monogyna* Jacq. in the presence and absence of natural braces. *Arboriculture & Urban Forestry*, 46(3). <https://doi.org/10.48044/jauf.2020.016>
- Muñoz G., L., Pérez M., R., Reséndiz M., J. F., & Reyes R., R. (2022). Caracterización de árboles de riesgo en el Parque Nacional Viveros de Coyoacán, Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 201-222. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1227>
- Nelson, M. F., Klein, R. W., Koeser, A. K., Landry, S. M., & Kane, B. (2022). The impact of visual defects and neighboring trees on wind-related tree failures. *Forests*, 13(7), 978. <https://doi.org/10.3390/f13070978>
- Norris, M. B., & Moore, G. M. (2020). How Tree risk assessment methods work: sensitivity analyses of sixteen methods reveal the value of quantification and the impact of inputs on risk ratings. *Arboriculture & Urban Forestry*, 46(6), 402-431. <https://doi.org/10.48044/jauf.2020.030>
- Pérez M., R., Santillán F., A., Narváez Á., F. D., Galeote L., B., & Vásquez B., N. (2018). Riesgo del arbolado urbano: estudio de caso en el Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 208-228. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.143>
- Pokorný, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). *Urban tree risk management: a community guide to program design and implementation*. USDA Forest Service. <https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/na/NA-TP-03-03.pdf>
- Reyes de la B., J., Ponce-Donoso, M., Vallejos-Barra, Ó., Daniluk-Mosquera, G., & Coelho Duarte, A. P. (2018). Comparación de cuatro métodos de evaluación visual del

- riesgo de árboles urbanos. *Colombia Forestal*, 21(2), 161-173. <https://doi.org/10.14483/2256201X.12604>
- Saavedra-Romero, L. de L., Alvarado-Rosales, D., Martínez-Trinidad, T., & Hernández-de la Rosa, P. (2019). Identificación de defectos y riesgos en el arbolado del Bosque de San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(1), 31-47. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.049>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Semarnat y Conanp]. (2017). *Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Noviembre 2017. Catálogo de Metadatos Geográficos*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/anpno_v17gw.xml?_httpcache=yesand_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsland_indent=no
- Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2011a). *Best management practices. Tree risk assessment*. International Society of Arboriculture.
- Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2011b). Tree risk assessment: a foundation. *Arborist News*, 20, 12-20.
- Smiley, E. T., Matheny, N. P., & Lilly, S. J. (2017). Tree risk assessment. En F. Ferrini, C. C. K. Van den Bosch, & A. Fini. (Eds.). *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 478-488). Routledge.
- Speak, A. F., & Salbitano, F. (2023). The impact of pruning and mortality on urban tree canopy volume. *Urban Forestry & Urban Greening*, 79, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127810>
- Stereńczak, K., Kraszewski, B., Mielcarek, M., & Piasecka, Ź. (2017). Inventory of standing dead trees in the surroundings of communication routes – The contribution of remote sensing to potential risk assessments. *Forest Ecology and Management*, 402, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.018>

Manuscrito recibido el 14 de julio de 2023

Aceptado el 22 de abril de 2024

Publicado el 18 de octubre de 2024

Este documento se debe citar como:

Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., Mohedano Caballero, L., Hernández-de la Rosa, P., & González Guillén, M. J. (2024). Características estructurales y nivel de riesgo de arbolado en un parque periurbano. *Madera y Bosques*, 30(2), e3022606. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3022606>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.